

Харківський національний університет радіоелектроніки  
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**СТРІЛКОВА ТЕТЯНА ОЛЕКСАНДРІВНА**

УДК 681.78:681.7.01:621.391.8:519.21

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**РОЗВИТОК СТОХАСТИКО-ДЕТЕРМІНОВАНОЇ ТЕОРІЇ ПРИЙОМУ  
ТА ОБРОБКИ СИГНАЛІВ В ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ**

спеціальність 05.11.07 – оптичні прилади та системи  
технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Т. О. Стрілкова

Науковий консультант Должиков Володимир Васильович  
доктор фізико-математичних наук, професор

Харків – Київ – 2017

## Анотація

*Стрілкова Т.О.* Розвиток стохастико-детермінованої теорії прийому та обробки сигналів в оптико-електронних системах. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.11.07 «Оптичні прилади та системи». – Харківський національний університет радіоелектроніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Київ, 2017.

Основні шляхи і тенденції удосконалення оптико-електронних систем спрямовані на збільшення ефективності і проникної здатності систем. До них можна віднести збільшення часового й енергетичного розрізнення; удосконалення методів оброблення сигналів і зображень; розширення кола завдань, які виконує одна оптико-електронної системи. Основу розвитку цих напрямів становлять фізичні процеси виникнення і поширення оптичного випромінювання, які враховують хвильові і корпускулярні властивості світла; приймання й оброблення оптичних сигналів з урахуванням особливостей їхньої просторово-часової структури; урахування додаткових статистичних особливостей вихідних сигналів.

Необхідність розвитку стохастико-детермінованої теорії оброблення сигналів в оптико-електронних системах зумовлена наявним неоднозначним теоретичним описом як для вхідних, так і вихідних сигналів. Під час розрахунку ефективності систем й установленні їхніх граничних можливостей виникають суперечності при використанні різних теоретичних підходів до опису вхідних і вихідних сигналів систем. Ці суперечності і труднощі пояснюються умовністю приймального критерію ефективності системи, неточністю математичних моделей сигналів в оптико-електронних системах, цілеспрямованим спрощенням моделей сигналів у системах.

Проблемні питання пов'язані зі спостереженням, реєстрацією і розрахунком параметрів малорозмірних і малоконтрастних об'єктів, сигнали від яких характеризуються значеннями енергії, нижчими за поріг чутливості, і перебувають на межі динамічного діапазону систем.

У дисертаційній роботі визначена й розв'язана актуальна **науково-технічна проблема**: підвищення ефективності оптико-електронних систем завдяки розвитку математичних моделей і стохастико-детермінованих методів приймання й оброблення сигналів, що ґрунтуються на спільному застосуванні корпускулярного, хвильового і статистичного опису оптичних сигналів в оптико-електронних системах.

Урахування додаткових властивостей сигналів, таких, як енергетичні, просторово-часові, парнокорельовані, груповані, що підпорядковуються узагальненим граничним теоремам, дозволили усунути суперечності і визначити напрями розроблення більш повних математичних моделей. Застосування такого підходу уможливило більш адекватний опис процесів взаємодії світла з об'єктом спостереження, елементами оптико-механічного тракту, а також перетворення оптичного випромінювання фоточутливими елементами, дало можливість оптимізувати алгоритми приймання й оброблення сигналів, які істотно впливають на виявну здатність оптико-електронних систем та їхню ефективність у цілому.

**Перший розділ** присвячений визначенню напрямів удосконалення і розвитку оптико-електронних систем. Проаналізовані методи, спрямовані на підвищення ефективності оптико-електронних систем, і визначені чинники, що стримують розвиток і вдосконалення систем. До чинників стримування належать фізичні процеси, що впливають на формування вихідних сигналів систем; статистична нестабільність сигналів, які приймають системи, і неоднозначність методів їх опису (наприклад, наявність угруповань, кореляцій фотонів); невизначений стан вхідного оптичного випромінювання; технічні обмеження елементів оптико-електронних систем. Окреслена науково-технічна проблема спрямована на усунення суперечностей у наявних теоре-

тичних методах приймання й оброблення сигналів та експериментальних даних. Сформульовані завдання дослідження.

У **другому розділі** систематизовані теоретичні методи, які становлять основу опису вхідних і вихідних сигналів оптико-електронних систем.

Здійснений аналіз теоретичних методів опису вхідних сигналів з урахуванням корпускулярних і хвильових властивостей. Хвильова теорія дозволяє описати процеси дифракції і взаємодії поля із речовиною, корпускулярна теорія враховує процеси поглинання, оскільки енергія кванта оптичного діапазону досить велика.

Методи опису вихідних сигналів проаналізовані з урахуванням статистичних властивостей сигналів. Основна увага приділена статистичним моделям, які ґрунтуються на пуассонівському, гауссовому, логарифмічно-нормальному, негативно біноміальному розподілах і розподілі Бозе-Ейнштейна. Флуктуації фонові і сигнальних компонент схарактеризовані законами із кінцевою дисперсією, і, відповідно до теорії помилок об'єднані центральною граничною теоремою.

Принцип формування сигналів в оптико-електронних системах розглядається як процес, якому притаманний стохастичний характер електромагнітного випромінювання. Просторово-часові зміни сигналів, як із позиції хвильової, так і з погляду корпускулярної теорії, враховують умови лінійності, інваріантності, фізичної здійсненності і стійкості. Зв'язок між вхідним потоком і вихідним визначається як детермінованою (при хвильовому описі), так і стохастичною (при корпускулярному описі) залежністю.

**Третій розділ** спрямований на проведення теоретичних та експериментальних досліджень статистичних властивостей вихідних сигналів оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном. Створені теоретичні моделі на основі пуассонівської і гауссової статистик, взаємодія оптичного випромінювання з оптичною ланкою системи на основі хвильового і корпускулярного опису. Розроблений підхід до оцінювання ефективності оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном за крите-

рієм величини відношення сигнал/шум. Визначена залежність змінювання величини відношення сигнал/шум від коефіцієнта поглинання оптичної ланки як *детермінований параметр*  $1/\sqrt{k}$  ( $k$  - коефіцієнт послаблення).

Експериментальні дослідження статистичних характеристик вихідних сигналів систем з обмеженим динамічним діапазоном засвідчили, що на характеристики вихідних сигналів впливає якість і склад оптичного скла. Зроблене припущення, що оптичну ланку необхідно розглядати як *стохастичний елемент*, який спричиняє викривлення вихідного сигналу системи. Запропоновано розглядати оптичне скло як *стохастично неоднорідне* середовище, яке може впливати на шляхи проходження фотонів через оптичну ланку, порушуючи принцип лінійної суперпозиції й умови *лінійності, інваріантності, фізичної здійсненності, стійкості*.

Розроблені статистичні моделі взаємодії оптичного сигналу з оптичною ланкою в оптико-електронних системах на основі законів розподілу, яким властива скінченна і нескінченна дисперсії. Модель на основі центральної граничної теореми репрезентована як процес проріджування стохастичного потоку, при якому окремі точки зникають незалежно від інших точок. Експериментальні результати показали, що ця модель застосована при апроксимації густини імовірності вихідних сигналів оптико-телевізійних систем, які не використовують ослаблювачі. Модель на основі сім'ї стійких законів подана як стохастичний процес, що характеризується наявністю імовірності великої, але рідкісної події, якою не можна знехтувати, і робить присутній внесок в опис отримуваних результатів. Експериментально визначені області притягання граничних розподілів вихідних сигналів оптико-електронних систем. Дослідження асимптотичної поведінки хвостів щільностей розподілу вихідних сигналів для оптико-електронних систем довели можливість використання стійких законів розподілу опису вихідних сигналів оптико-електронних систем. Установлена залежність коефіцієнта ослаблення оптичної ланки  $k$  і характеристичного показника ( $0 < \alpha < 2$ ). Сформульоване припущення, що

ефективність оптико-електронної системи може бути обмеженою в різних енергетичних режимах роботи складом і якістю *оптичної ланки*.

Окреслені межі застосовності статистичних моделей на основі центральної й узагальнених граничних теорем. Урахування додаткових чинників, які впливають на формування вихідного сигналу й опис стохастичної поведінки сигналу на основі узагальнених граничних теорем, уможливило визначення єдиного підходу до оцінювання впливу ослаблювачів на статистичні властивості сигналів та ефективність роботи оптико-електронної системи в цілому.

**Четвертий розділ** містить опис статистичних властивостей вихідних сигналів оптико-електронних систем, який враховує стохастичний характер взаємодії вхідного випромінювання з елементами оптико-електронного тракту на межах динамічного діапазону. Розглянута специфіка реєстрації випромінювання, яке супроводжується нелінійними ефектами при формуванні сигналу в площині фотоприймача оптико-електронної системи. До таких процесів зараховані: формування вихідного сигналу на прикладі фотометричних систем при реєстрації надслабкого випромінювання, і формування сигналу при реєстрації випромінювання великої інтенсивності на прикладі оптико-електронної системи, що входить до складу акустооптичних аналізаторів спектра. Процес формування вихідного сигналу оптико-електронних систем схарактеризований як нестационарний потік подій, якому не притаманні властивості пуассонівського розподілу. Опис ґрунтується на умовно пуассонівських потоках зі зміненою дисперсією, які характеризуються властивостями групованих потоків. Розроблена на його основі статистична модель вихідних сигналів оптико-електронних систем, що використовує властивості парнокорельованих потоків. Модель використовує математичний апарат твірних функціоналів, що уможливило виявлення як кількості реєстрованих сигналів, так і координати їхньої появи. Застосування моделі забезпечує виявлення надслабких сигналів на фоні внутрішніх шумів фотоприймачів.

Розроблена модель взаємодії оптичного випромінювання з елементами оптико-електронної системи у складі акустооптичного аналізатора спектра.

Модель ураховує нелінійні ефекти, які характеризуються групованими параметрами, при формуванні сигналу в площині фотоприймача в процесі реєстрації випромінювання великої інтенсивності на верхній межі динамічного діапазону. Основу моделі становить фонон-фононна взаємодія. Нелінійні ефекти, що впливають на дифракцію, схарактеризовані процесами розпаду (злиття) фононів, у результаті яких виникають звукові хвилі з новими хвильовими векторами (нова довжина хвиль). Урахування 3-фононної взаємодії дало можливість ідентифікувати спектр вхідного сигналу з огляду на складність структури сигналу на виході акустооптичного аналізатора спектра.

**П'ятий розділ** присвячений проведенню теоретичних та експериментальних досліджень із забезпечення високої точності визначення просторово-часових характеристик сигналів із підвищеними імовірнісними характеристиками виявлення. Ураховане узгодження просторово-енергетичних властивостей сигналів і параметрів оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном. Здійснені розрахунки виявної здатності на основі розроблених статистичних моделей; вивчені методи просторово-часового накопичення з метою збільшення параметрів виявлення стаціонарних малорозмірних, мало-контрастних об'єктів; створений квазіоптимальний виявник з урахуванням особливостей просторово-часових характеристик статистичних потоків.

Доведено, що статистичні характеристики сигнальної і фонові компоненти, що підпорядковуються центральній граничній теоремі, залежать від часу накопичення. Усереднення флуктуацій стохастичного сигналу не спостерігається, якщо час експозиції незначний, а при тривалому часі експозиції спостерігається їхнє просторово-часове усереднення, що дозволило підвищити ефективність системи за критерієм величини відношення сигнал/шум у 20 разів, за критерієм умовної імовірності хибної тривоги в  $10^2$  разів.

Ураховуючи стохастичну поведінку вихідних сигналів, які підпорядковуються узагальненим граничним теоремам, збільшення часу експозиції не привело до просторово-часового усереднення флуктуацій.

У шостому розділі схарактеризовані розроблені методи збільшення ефективності оптико-електронних систем завдяки створенню методів та алгоритмів оброблення сигналів, що враховують ефекти взаємодії приймально-го оптичного випромінювання з елементами оптико-електронної системи.

На основі підходу, що передбачає спільне використання хвильового і корпускулярного опису сигналів, розроблені методи просторово-часового міжкадрового і внутрішньокадрового оброблення сигналів. Покращена якість зображень рухомих і близькорозміщених малорозмірних, малоконтрастних об'єктів. Досліджено вплив методів компресії на мікроструктуру і статистичні характеристики зображень.

**Практичне значення отриманих результатів.** Ефект від використання запропонованих нових моделей і теоретичних підходів до опису вхідних, оброблення вихідних сигналів полягає у збільшенні проникної здатності систем у *десятки разів*, забезпеченні розширення динамічного діапазону систем, а також збільшенні ефективності оптико-електронних систем за такими критеріями: роздільна здатність, імовірнісні характеристики виявлення, величина відношення сигнал/шум, що підтверджується актами впровадження науково-прикладних досліджень.

**Ключові слова:** оптико-електронні системи, ослаблення оптичних сигналів, фотодетектор, флуктуації сигналу, Пуассонівська модель сигналів, гауссові і негауссові статистики, узагальнені граничні теореми, виявлення сигналів, методи оброблення зображень.

## Summary

*Strilkova T. O.* The development of a stochastic-deterministic theory of signal reception and processing in optoelectronic systems. – Qualification scientific work presented as manuscript.

Thesis for obtaining a scientific degree of Doctor of Technical Sciences on speciality 05.11.07 “Optical instruments and systems”. – Kharkiv National University of Radio Electronics, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2017.

The main ways and tendencies in the improvement of optoelectronic systems are aimed at increasing the efficiency and permeability of systems. These include increasing the time and energy resolution; improvement of methods for processing signals and images; extension of the range of tasks that are solved by a single optoelectronic system. The development of these directions is based on the physical processes of the appearance and propagation of optical radiation, taking into account the wave and corpuscular properties of light; reception and processing of optical signals considering the peculiarities of their space-time structure; consideration of additional statistical features of the output signals.

The actuality for the development of a stochastic-deterministic theory of signal processing in optoelectronic systems is due to the ambiguous theoretical description that exists at the present time, both for input and output signals. When calculating the efficiency and establishing the limiting capabilities of systems, there arise contradictions in using various theoretical approaches to describing both the input and output signals of systems. The emerging contradictions and difficulties can be explained by the conventionality of the adopted criterion for the effectiveness of the system; inaccuracy of mathematical models of signals in optoelectronic systems; purposeful simplification of signal models in systems.

Problematic issues are associated with the observation, recording and calculation of small-size and low-contrast objects whose signals are characterized by ener-

gy values below the threshold of sensitivity that are at the boundary of the dynamic range of systems.

The dissertation thesis contains the statement and solution of the actual *scientific and technical problem*, namely: increasing the efficiency of optoelectronic systems due to the development of mathematical models and stochastic-deterministic methods of receiving and processing signals based on the joint use of corpuscular, wave and statistical descriptions of optical signals in optoelectronic systems.

The inclusion of additional properties of signals, such as energy, space-time, pair-correlated, grouped, subordinate to generalized limit theorems, allowed eliminating contradictions and determining the directions for the development of more complete mathematical models. The application of such an approach made it possible to describe more adequately the processes of interaction of light with the object of observation, elements of the optical-mechanical path, as well as the conversion of optical radiation by photosensitive elements, and optimize the algorithms for receiving and processing signals that have a significant effect on the detectability and efficiency of optoelectronic systems in general.

**The first section** focuses on determining the directions for improving and developing optoelectronic systems. The analysis of methods aimed at increasing the efficiency of optoelectronic systems has been carried out, and the factors constraining the development and improvement of systems have been determined. The constraining factors include physical processes that affect the formation of output signals of systems; statistical instability of signals received by systems and ambiguity of methods of their description (for example, presence of groupings, correlations of photons); uncertain state of the input optical radiation; technical limitations of elements of optoelectronic systems. The scientific and technical problem aimed at eliminating contradictions in the existing theoretical methods of receiving and processing signals and experimental data has been posed. Research problems are formulated.

**The second section** contains systematization of theoretical methods underlying the description of the input and output signals of optoelectronic systems.

The analysis of theoretical methods for describing input signals with allowance for corpuscular and wave properties has been carried out. The wave theory makes it possible to describe the processes of diffraction and interaction of the field with matter; the corpuscular theory takes into account the absorption processes, since the optical range quantum energy is sufficiently large.

An analysis of the methods for describing the output signals has been made with the consideration of the statistical properties of the signals. The main attention has been paid to statistical models based on the Poisson, Gaussian, log-normal, negatively binomial, Bose-Einstein distributions. Fluctuations in the background and signal components are characterized by laws with finite dispersion, and, according to the theory of errors, are united by a central limit theorem.

The principle of signal formation in optoelectronic systems has been considered as a process having the stochastic character of electromagnetic radiation. Spatial-temporal changes in signals, both from the position of the wave and corpuscular theory, take into account the conditions of linearity, invariance, physical feasibility and stability. The relationship between the input and output streams has been defined as deterministic (at the wave description) and stochastic (at the corpuscular description) dependence.

**The third section** is aimed at carrying out theoretical and experimental studies of the statistical properties of the output signals of optoelectronic systems with a limited dynamic range. Based on the Poisson and Gaussian statistics, theoretical models of interaction of optical radiation with the optical link of the system on the basis of wave and corpuscular descriptions have been compiled. An approach to the evaluation of the efficiency of optoelectronic systems with a limited dynamic range has been developed by the criterion of the magnitude of the signal-to-noise ratio. The dependence of the change in the value of the signal-to-noise ratio on the absorption coefficient of the optical link as a *deterministic parameter*  $1/\sqrt{k}$  ( $k$  is the attenuation coefficient) has been determined.

Experimental studies of the statistical characteristics of the output signals of

systems with a limited dynamic range have shown that the quality and composition of the optical glass affect the characteristics of the output signals. The assumption has been made that the optical link must be regarded as a *stochastic element*, which introduces distortions into the output signal of the system. It has been proposed to consider optical glasses as *stochastically inhomogeneous* media that can influence the path of photons passing through the optical link, violating the principle of linear superposition and the *conditions of linearity, invariance, physical feasibility, and stability*.

Statistical models for the interaction of an optical signal with an optical link in optoelectronic systems have been developed on the basis of the distribution laws having finite and infinite variances. The model based on the central limit theorem has been presented as a process of thinning a stochastic flow, in which individual points disappear independently of other points. The experimental results have shown that this model was applied in approximating the probability density of the output signals of optical-television systems that do not use attenuators. The model based on a family of stable laws has been presented as a stochastic process characterized by the presence of the probability of a large but rare event that cannot be neglected and which makes a significant contribution to the description of the results obtained. The regions of attraction of the limiting distributions of the output signals of optoelectronic systems have been determined experimentally. Investigations of the asymptotic behavior of the tailings of the distribution density of the output signals for optoelectronic systems have shown the possibility of using stable laws for the distribution of the description of the output signals of optoelectronic systems. The dependence of the attenuation coefficient of the optical link  $k$  and the characteristic exponent ( $0 < \alpha < 2$ ) has been established. It has been suggested that the efficiency of the optoelectronic system can be limited in different energy modes of operation by the composition and quality of the *optical link*.

The limits of applicability of statistical models on the basis of central and generalized limit theorems have been determined. The consideration of additional factors affecting the formation of the output signal and the description of the stochastic behavior of the signal on the basis of generalized limit theorems have made it possible to deter-

mine a unified approach to assessing the effect of attenuators on the statistical properties of signals and the efficiency of the optoelectronic system as a whole.

**The fourth section** includes a description of the statistical properties of the output signals of optoelectronic systems, taking into account the stochastic character of the interaction of the input radiation with the elements of the optic-electronic tract at the boundaries of the dynamic range. The specific features of radiation detection accompanied by nonlinear effects in the formation of a signal in the photodetector plane of an optoelectronic system have been studied. Such processes include the formation of the output signal by the example of photometric systems for the recording of superweak radiation, and the formation of a signal when recording high-intensity radiation using the example of an optoelectronic system that is part of acousto-optical spectrum analyzers. The process of forming the output signal of optoelectronic systems has been characterized as a nonstationary flow of events not having the properties of the Poisson distribution. The description was carried out on the basis of conditionally Poisson flows with a modified dispersion possessing the properties of grouped flows. A statistical model of the output signals of optoelectronic systems using the properties of pair-correlated flows has been developed on its basis. The model uses the mathematical apparatus of generating functionals, which has made it possible to detect both the number of registered signals and the coordinates of their appearance. The use of the model provides detection of ultra-weak signals against the background of internal noises of the photodetectors.

A model for the interaction of optical radiation with the elements of the optoelectronic system as part of an acousto-optical spectrum analyzer has been developed. The model takes into consideration nonlinear effects, which are characterized by grouped parameters, when a signal is generated in the photodetector plane during the recording of high-intensity radiation at the upper boundary of the dynamic range. The model is based on the phonon-phonon interaction. Nonlinear effects that affect diffraction have been characterized by phonon decay (fusion) processes, which result in sound waves with new wave vectors (new wavelengths). Allowance for the three-phonon interaction has made it possible to identify the spectrum of the input signal,

taking into account the complex structure of the signal at the output of the acousto-optical spectrum analyzer.

**The fifth section** is devoted to theoretical and experimental studies to ensure high accuracy in determining the spatial-temporal characteristics of signals with increased probabilistic detection characteristics. The coordination of the space-energy properties of signals and parameters of optoelectronic systems with a limited dynamic range has been taken into account. Calculations of the detectability on the basis of the developed statistical models have been carried out. The methods of space-time accumulation with the purpose of increasing the detection parameters of stationary small-sized, low-contrast objects have been studied. A quasi-optimal detector considering features of the space-time characteristics of statistical fluxes has been developed.

It has been shown that the statistical characteristics of the signal and background components, which obey the central limit theorem, depend on the accumulation time. At small exposure times, averaging of the fluctuations of the stochastic signal is not observed, and for long exposure times, their space-time averaging is observed, which makes it possible to increase the system efficiency by the criterion of the signal-to-noise ratio by 20 times, according to the conditional probability of false alarm at  $10^2$  times.

Considering the stochastic behavior of the output signals, which obey generalized limit theorems, an increase in the exposure time has not led to a spatiotemporal averaging of fluctuations.

**The sixth section** is dedicated to the development of methods for increasing the efficiency of optoelectronic systems by developing methods and algorithms for processing signals that take into account the interaction effects of the received optical radiation with elements of the optoelectronic system.

Based on the approach involving the sharing of wave and corpuscular signal descriptions, methods of spatio-temporal inter-frame and intra-frame signal processing have been developed. The image quality of moving and closely-spaced small-size and low-contrast objects has been improved. The influence of compres-

sion methods on the microstructure and statistical characteristics of images has been studied.

**Practical significance of the results obtained.** The effect of using the proposed new models and theoretical approaches to describing the input signals and processing the output signals is to increase the permeability of systems in *dozens of times*, to provide an expansion of the dynamic range of systems, and to increase the efficiency of optoelectronic systems by the criteria of resolution, probability detection characteristics, magnitude of the signal-to-noise ratio, which is confirmed by the acts of introducing scientific and applied research.

**Keywords:** optoelectronic systems, attenuation of optical signals, photodetector, signal fluctuations, the Poisson model of signals, the Gaussian and non-Gaussian statistics, generalized limit theorems, signal detection, image processing methods.

#### **Список публікацій здобувача.**

- [1] А. И. Стрелков, С. В. Москвитин, А. П. Лытюга, и Т.А. Стрелкова, *Оптическая локация. Теоретические основы приема и обработки оптических сигналов*. Харьков, Украина: Апостроф, 2010.

*Дисертант розглянув методи виявлення оптичних сигналів; запропонував методи виявлення оптичних сигналів з урахуванням корпускулярних і статистичних властивостей оптичного випромінювання; проаналізував методики розрахунків ефективності оптико-електронних систем за різними критеріями.*

- [2] T. Strelkova, V. Kartashov, A. Lytyuga, and A. Strelkov, Theoretical methods of images processing in optoelectronic systems, in *Developing and Applying Optoelectronics and Machine Vision*. Chapter 6, 2016, pp. 181-206. <http://www.igi-global.com/book/developing-applying-optoelectronics-machine-vision/147652>.

*(Входить до SCOPUS) Здобувач запропонував алгоритми оброблення зображень на основі пуассонівської і субпуассонівської статистики. Алгоритми ґрунтуються на методах покадрового та міжкадрового оброблення.*

- [3] А. И. Стрелков, Е. И. Жилин, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Исследование возможности применения метода детерминированного ослабления сигнала в астрономических оптико-электронных системах», *Системи обробки інформації : зб. наук. пр. НАНУ, ПАНМ, Харківський військовий університет*. Харків, № 3(13), с. 160–163, 2001.

(Входит до Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, CytFactor, ResearchBib). *Здобувач здійснив розрахунки ефективності оптико-електронних систем за критерієм максимуму логарифми відношення правдоподібності, проаналізував густину імовірності вихідних сигналів при реєстрації надслабкого випромінювання.*

- [4] С. И. Калмыков, А. И. Стрелков, А. М. Стадник, и Т. А. Стрелкова, «Оценка интенсивности сверхслабого излучения при хемилюминесцентном анализе», *Радиотехника : Всеукр. Межвед. наук.-техн. сб. Харьковский национальный университет радиоэлектроники*, Вып. 125, с. 66–72, 2002.

*Здобувач запропонував структурну схему квазіоптимального виявника парнокорельованого потоку.*

- [5] Т. А. Стрелкова, А. М. Стадник, и С. И. Калмыков, «Квазиоптимальное обнаружение парнокоррелированных сигналов в сильных пуассоновских шумах», *Системи обробки інформації : зб. наук. пр. НАНУ, ПАНМ, Харківський військовий університет*, № 3 (19), с. 184–192, 2002.

(Входит до Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, CytFactor, ResearchBib). *Дисертант запропонував схему виявлення парнокорельованих імпульсів й оцінив інтенсивність сигнальних фотовідліків для випадку пуассонівського і парнокорельованого потоків).*

- [6] Т. А. Стрелкова, Е. И. Жилин, и С. И. Калмыков, «Применение простейшего фильтра парнокоррелированного потока импульсов фотоотсчетов для повышения точности измерения концентрации специальных биологических примесей», *Системи обробки інформації : зб. наук. пр. НАНУ, ПАНМ, Харківський військовий університет*, № 6(22), с.

351–356, 2002.

(Входить до Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, CytiFactor, ResearchBib). *Здобувач розрахував ефективність оптико-електронної систем при виявленні парнокорельованого потоку.*

- [7] А. И. Стрелков, Т. А. Стрелкова, Е. И. Жилин, и В. В. Марченко, «Пространственное разрешение оптических сигналов акустооптического преобразователя при анализе спектров радиосигналов на близких частотах», *Системи обробки інформації : зб. наук. пр., Харківський університет Повітряних Сил, № 5 (45), с. 144–151, 2005.*

(Входить до Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, CytiFactor, ResearchBib). *Автор дисертаційної роботи описав потік носіїв зарядів фотоприймача на основі пуассонівської статистики, розрахував оптимальну оцінку параметрів просторового положення сигналу в площині фотоприймача).*

- [8] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Алгоритмы обнаружения сигналов в оптико-электронных системах контроля космического пространства», *Радиотехника : Всеукр. Межвед. наук.-техн. сб., Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Вып. 132, с. 7–13, 2003.*

*Здобувач запропонував методикау виявлення слабких сигналів на основі систематизації теоретичних методів аналізу оптичних сигналів.*

- [9] В. И. Барсов, Т. А. Стрелкова, Е. И. Жилин, и А. С. Калмыков, «Анализ электромагнитной обстановки на техногенных объектах сложной пространственной структуры», *Системи обробки інформації : зб. наук. пр., Харківський університет Повітряних Сил, № 8 (57), с. 93- 95, 2006.*

(Входить до Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, CytiFactor, ResearchBib). *Здобувач створив методикау виявлення сигналів у збільшеному частотному діапазоні, урахував особливості просторової структури сигналів в оптико-електронних системах у складі акустооптичних аналізаторів спектра.*

- [10] А. И. Стрелков, Е. И. Жилин, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Угловое разрешение близкорасположенных изображений космических объектов в астрономических оптико-электронных систем», *Радиотехника : Всеукр. Межвед. наук.-техн. сб., Харьковский национальный университет радиоэлектроники*, Вып. 143, с. 58 – 64, 2005.

*Дисертант запропонував метод розрізнення близькорозташованих космічних об'єктів, який ґрунтується на комплексному використанні хвильових і корпускулярних властивостей оптичного випромінювання).*

- [11] А. И. Стрелков, Т. А. Стрелкова, С. Е. Кальной, и В. В. Карнаух, «О работе акустооптического датчика при больших амплитудах звука», *Системы обработки інформації : зб. наук. пр., Харківський університет Повітряних Сил*, Вип.2 (51), с.173 – 179, 2006.

(Входить до Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, Cytifactor, ResearchBib). *Автор запропонував ідею врахування ангармонічного характеру коливань в середовищі при дослідженні впливу різноманітної інтенсивності звуку на дифракцію. Запропоновано використовувати статистичні методи оцінки параметрів сигналів в умовах групованих вибірок.*

- [12] О. І. Стрелков, В. І. Барсов, Т. О. Стрелкова, Є. І. Жилін, та В. В. Марченко, «Підвищення частотної точності акустооптичних засобів спектрального і радіочастотного аналізу (експериментальні дослідження)», *Системи озброєння і військова техніка*, № 4 (8), с. 20 – 25, 2006.

(Входить до Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, Cytifactor, ResearchBib, Open Academic Journals Index). *Здобувач запропонував використовувати стохастико-детерміновані методи оброблення сигналів в оптико-електронних системах, що входять до складу акустооптичних аналізаторів спектра, наголосив на врахуванні квантової природи взаємодії електромагнітного випромінювання з фотоприймачем.*

- [13] А. И. Стрелков, В. И. Барсов, Т. А. Стрелкова, и Е. Н. Кац, «Оценка эффективности метода накопления серии короткоэкспозиционных слабоконтрастных телевизионных кадров», *Збірник наукових праць Харківського*

університету Повітряних Сил : зб. наук. пр., Вип. 1(13), с. 44 – 47, 2007.

(Входить до Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, CytiFactor, ResearchBib). *Здобувач запропонував комплексне використання корпускулярних і хвильових властивостей сигналів в описі відліку оптико-електронної системи для реєстрації рухомих об'єктів, розробив метод виявлення рухомих об'єктів за допомогою поєднання кореляційного методу та методу міжкадрового оброблення сигналів.*

[14] О. І. Стрелков, Т. О. Стрілкова, та С. О. Лісовенко, «Експериментальне дослідження можливості підвищення якості виявлення сигналів в оптико-електронних при обробці слабконтрастних ТВ-кадрів», *Системи озброєння і військова техніка*, № 2(10), с. 8 – 10, 2007.

(Входить до Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, CytiFactor, ResearchBib, Open Academic Journals Index). *Дисертант розробив метод просторово-частотної фільтрації для виявлення малокоонтрасних об'єктів, який ґрунтується на внутрішньокадровому та міжкадровому обробленні телевізійних кадрів.*

[15] А. І. Стрелков, Т. А. Стрелкова, и С. А. Лісовенко, «Анализ возможности обнаружительной способности оптико-электронных систем», *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба* : зб. наук. пр., Вип. 3 (15), с. 48 – 52, 2007.

(Входить до Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, CytiFactor, ResearchBib). *Здобувач запропонував методіку розрахунку величини сигнал/шум для оптико-електронних систем. Методіка враховує умови виявлення корисних сигналів, розмір об'єктів і шумової складової.*

[16] А. І. Стрелков, Е. Н. Кац, и Т. А. Стрелкова, «Имитационное моделирование алгоритма обнаружения изображения, быстродвигающихся объектов известной формы в ТВ кадрах в условиях слабой освещенности», *Системи обробки інформації* : зб. наук. пр., *Харківський університет Повітряних Сил*, вип. 6 (73), с. 110 – 113, 2008.

(Входить до Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing

Service, CytiFactor, ResearchBib). *Здобувач запропонував алгоритм виявлення рухомих об'єктів в умовах низької освітленості.*

- [17] А. И. Стрелков, Д. П. Панасенко, и Т. А. Стрелкова, «Имитационное моделирование метода разрешения изображений близкорасположенных объектов не равноценных по яркости», *Системи обробки інформації : зб. наук. пр., Харківський університет Повітряних Сил*, вип. 6(73), с. 114 – 118, 2008.

(Входить до Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, CytiFactor, ResearchBib). *Дисертант розробив алгоритм розрізнення близько розташованих малорозмірних об'єктів, яким притаманні різні енергетичні характеристики.*

- [18] А. И. Стрелков, Т. А. Стрелкова, и Д. П. Панасенко, «Анализ метода разрешения изображений близко расположенных объектов, не равноценных по яркости, при наличии помех», *Системи управління, навігації та зв'язку : зб. наук. пр., Центральний науково-дослідний інститут навігації та управління*, вип. 4(8), с. 27 – 31, 2008.

(Входить до Україніка Наукова). *Здобувач запропонував ідею вивчення впливу завод на статистичні характеристики визначення параметрів близькорозташованих об'єктів.*

- [19] А. И. Стрелков, С. Е. Кальной, Т. А. Стрелкова, и Е. А. Соломко, «Влияние алгоритма сжатия wavelet на эффективность метода накопления кадров слабоконтрастных крупноразмерных изображений», *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба : зб. наук. пр.*, вип. 1 (19), с. 119 – 122, 2009.

(Входить до Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, CytiFactor, ResearchBib). *Дисертантом використано метод міжкадрового накопичення з метою узгодження енергетичних характеристик об'єктів з виявлювальною здатністю оптико-електронних систем при застосуванні алгоритмів стиску зображень.*

- [20] А. И. Стрелков, Т. А. Стрелкова, Е. И. Жилин, А. П. Лытюга, и

В. В. Карнаух, «Анализ влияния времени накопления оптических сигналов на динамический диапазон акустооптического анализатора спектра радиосигналов», *Системы обработки інформації : зб. наук. пр., Харківський університет Повітряних Сил*, вип. 4 (78), с. 2 – 5, 2009.

(Входить до Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, CytiFactor, ResearchBib). *Автором запропоновано ідею врахування впливу адитивних та мультиплікативних завад на приймальний пристрій. Розглянуто методи погодження енергетичних параметрів сигналів, що мають мультиплікативний характер з параметрами оптико-електронних систем.*

[21] А. И. Стрелков, С. Е. Кальной, Е. И. Жилин, Т. А. Стрелкова, и В. В. Карнаух, «Применение метода дискретного накопления сигналов для повышения динамического диапазона акустооптического анализатора спектра радиосигналов», *Системы управління, навігації та зв'язку: зб. наук. пр., Центральний науково-дослідний інститут навігації та управління*, Вип. 2 (14), с. 58 – 66, 2010.

(Входить до Україніка Наукова). *Здобувач запропонував для опису вихідних сигналів акустооптичних аналізаторів спектра використовувати математичний опис на основі дискретних потоків.*

[22] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Энергетическое обнаружение оптических сигналов в телевизионных системах», *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба : зб. наук. пр.*, вип. 1(23), с. 68 – 71, 2010.

(Входить до Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, CytiFactor, ResearchBib). *Здобувач запропонував використовувати метод узгодження енергетичних характеристик спостережуваних об'єктів із властивостями виявлення оптико-електронних систем).*

[23] А. И. Стрелков, Т. А. Стрелкова, Е. И. Жилин, и Т. В. Бутрым, «Анализ временных ограничения по непрерывному накоплению оптических сигналов в телевизионных оптико-электронных системах», *Системы озброєння і військова техніка*, № 3(27), с. 8 – 10, 2011.

(Входить до Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, CytiFactor, ResearchBib, Open Academic Journals Index). *Здобувачем запропоновано ідею врахування мультиплікативного характеру впливу завад великої інтенсивності при виявленні сигналів в оптико-електронних системах.*

[24] А. И. Стрелков, Е. И. Жилин Т. А., Стрелкова, А. П. Лытюга, и Т. В. Бутрым, «Особенности математического описания процессов ослабления оптического излучения», *Радиотехника : Всеукр. Межвед. наук.-техн. сб., Харьковский национальный университет радиоэлектроники*, Вып. 168, с. 97 – 102, 2012.

*Автор дисертаційної роботи втілює ідею здійснення порівняльного аналізу розрахунку ефективності оптико-електронних систем за критерієм сигнал/шум при використанні різних теоретичних аспектів опису принципів формування вихідних сигналів в оптико-електронних системах.*

[25] А. И. Стрелков, Е. И. Жилин, А. П. Лытюга, Т. А. Стрелкова, и Т. В. Бутрым, «Обнаружение ослабленных оптических сигналов с учетом корпускулярного характера их взаимодействия с веществом», *Системы управления, навигации та зв'язку : зб. наук. пр., Центральний науково-дослідний інститут навігації та управління*, Вып. 3(23), с. 108 – 111, 2012.

(Входить до Україніка Наукова). *Здобувач запропонував здійснити теоретичний аналіз вихідних сигналів в оптико-електронних системах з обмеженим динамічним діапазоном на основі методики розрідження пуассонівських потоків.*

[26] Т. А. Стрелкова, Ю. И. Созонов, и Ю. А. Яновский, «Исследование статистики пространственно-временных сигналов в оптико-электронных системах», *Радиотехника : Всеукр. Межвед. наук.-техн. сб., Харьковский национальный университет радиоэлектроники*, Вып. 170, с. 185 – 188, 2012.

*Дисертант втілює ідею вивчення стохастичної поведінки вихідних сигналів в оптико-електронних системах із метою визначення статистичних характеристик сигналів і перешкод.*

[27] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Стохастико-

детерминированный подход к обработке оптических сигналов в оптико-электронных системах», *Научно-технический журнал "Контенант"*, Том 12, № 1, с. 83 – 88, 2013.

(Входит РИНЦ). *Здобувач описав вихідні сигнали за допомогою математичної моделі сигналів, що враховує стійкі закони розподілення випадкових величин.*

[28] Т. Strelkova, «Influence of Video Stream Compression on Image Microstructure in Medical Systems», *Biomedical Engineering*, vol. 47, pp. 307 – 311, 2014.

(Входит до SCOPUS, Springer, РИНЦ)

[29] Т. А. Стрелкова, «Статистические свойства выходных сигналов оптико-телевизионных систем с ограниченным динамическим диапазоном», *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, № 2/9 (68), с. 38 – 44, 2014.

(Входит до SCOPUS, Index Copernicus, OpenAIRE, WorldCat, Library.ru, ResearchBib, Directory of Open Access Journals, EBSCO Publishing, CiteFactor).

[30] Т. А. Strelkova, «Studies on the Optical Fluxes Attenuation Process in Optical-electronic Systems», *Semiconductor physics, quantum electronics & optoelectronics (SPQEO)*, no. 4. pp. 421 – 424, 2014.

(Входит до Україніка Наукова, Academic OneFile, AGRICOLA, CSA/Proquest, EMBiology, EMCare, Gale, Google Scholar)

[31] Т. А. Стрелкова, «Использование устойчивых законов распределения при оценке эффективности обработки сигналов в оптико-электронных системах», *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, № 2/9 (74), с. 4 – 9, 2015.

(Входит до SCOPUS, Index Copernicus, OpenAIRE, WorldCat, Library.ru, ResearchBib, Directory of Open Access Journals, EBSCO Publishing, CiteFactor)

[32] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Состояние и перспективы развития оптико-электронных приборов специального назначения», на 2-м *Международном Радиоэлектронном Форуме «Прикладная*

- радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2005), Харьков, 9-23 сент. 2005, Том 2, с. 469 – 470.*
- [33] С. А. Лисовенко, А. И. Стрелков, А. С. Калмыков, и Т. А. Стрелкова, «Сравнительный анализ методов ослабления аддитивных шумов в оптико-электронных системах», на *VIII Міжнар. наук.-практ. конф. "Людина і космос". Ракетно-космічна техніка, Дніпропетровськ, 13-14 квіт. 2006, с.135.*
- [34] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, Е. И. Жилин, и Т. А. Стрелкова, «Корреляционная обработка сигналов в астрономических телевизионных оптико-электронных системах», на *Международной конф., "Расширение сотрудничества в наземных астрономических исследованиях государств юго-восточной Европы. Изучение объектов околоземного пространства и малых тел солнечной системы", Николаев, 2006, с. 100 – 102.*
- [35] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Особенности обнаружения оптических сигналов от космических объектов в астрономических телевизионных системах в сумеречное и дневное время», на *Міжнар. наук. конф., „Сучасні проблеми астрономії”*, Одеса, 12-18 серп., 2007, с. 34.
- [36] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Имитационное моделирование обнаружения низкоорбитальных космических объектов в сумеречных и дневных условиях астрономическими телевизионными системами», на *Седьмая Украинская конференция по космическим исследованиям НЦУИКС, Евпатория, 3-8 сент., 2007, с. 203.*
- [37] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Обнаружение оптических сигналов от низкоорбитальных космических объектов астрономическими телевизионными системами в условиях сильных аддитивных и мультипликативных помех», на *3-м Международном радиоэлектронном форуме. «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2008, Том I. «Современные и перспективные системы радиолокации, радиоастрономии и спутниковой навигации»,*

- Харьков, 22-24 окт., 2008. с. 160 – 161.
- [38] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, Е. И. Жилин, и Т. А. Стрелкова, «Возможности обнаружения объектов оптико-электронными системами в условиях сильных аддитивных и мультипликативных помех», in *VI International Conference on Optoelectronic Information Technologies “Photonics-ODS 2008”*, Vinnytsia, VNTU, 30 Sept. – 2 Oct., 2008, pp. 22.
- [39] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, Ю. А. Яновский, и Т. А. Стрелкова, «Исследование качества изображений при передаче в телемедицинских информационных сетях», на *8-ї Міжнар. міждисциплінарної наук.-практ. конф. Сучасні проблеми науки та освіти, Українська Асоціація „Жінки в науці та освіті”*, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Алушта 30 квіт. -10 трав., 2009, с. 97 – 98.
- [40] Т. А. Стрелкова, и И. А. Пашенко, «Стандарты для передачи радиологических изображений в телемедицинских сетях», на *II-ой Междунар. науч.-практ. конф., «Качество технологий – качество жизни»*, Судак 15-19 сент. 2010, с. 99 – 100.
- [41] Т. А. Стрелкова, и А. С. Калмыков, «Оптико-электронная система для изучения собственного оптического излучения живых систем», на *II-ой Междунар. науч.-практ. конф. «Качество технологий – качество жизни»*, Судак 15-19 сент. 2010, с. 113.
- [42] Т. А. Strelkova, V. A. Timanyuk, E. A. Romodanova, and A. P. Lytyuga, «Effects of coherent and incoherent optical radiation on pathologically functioning spermatozoa», in *International Congress “Photodiagnosis and Photodynamic therapy” Official Journal of the European Platform for Photodynamic Medicine*, Helsinki, Finland, 24 – 29 Aug. 2012, № 17, P. S 6.
- [43] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга., и Т. А. Стрелкова, «Перспективы развития оптико-электронных систем специального назначения с использованием методов стохастико-детерминированной обработки оптических сигналов», на *Междунар. науч.-практ. конф., «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных*

*систем*», Москва, 28-30 март., 2013, с. 50 – 53.

- [44] Т. А. Стрелкова, и В. А. Сауткин, «Стохастический подход к оценке качества оптического стекла», на *науч.-практ. конф. «Технологии обработки оптических элементов и нанесения вакуумных покрытий*», Минск, 26-27 сент., 2013. с. 85 – 86.
- [45] Т. А. Стрелкова, В. А. Сауткин, «Стохастический подход к оценке качества оптического стекла. Проблемные вопросы», на *Междунар. историко-научном симпозиуме «История оптики и современность*», Санкт-Петербург, 28-30 окт., 2013, с. 58 – 59.

## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ЗМІСТ.....	27
ВСТУП.....	31
РОЗДІЛ 1 СТАН ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ.....	45
1.1. Системологічний аналіз проблеми теоретичних методів приймання й оброблення оптичних сигналів в оптико-електронних системах.....	45
1.2. Потенційні можливості оптико-електронних систем.....	50
1.3. Визначення проблеми дослідження .....	57
1.4. Висновки .....	59
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ МЕТОДИ АНАЛІЗУ ВХІДНИХ И ВИХІДНИХ СИГНАЛІВ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАМ .....	61
2.1. Теоретичні методи опису електромагнітного випромінювання, яке приймають оптико-електронні системи .....	62
2.2. Системний підхід до проектування оптико-електронних систем .....	67
2.3. Узагальнена характеристика оптико-електронних систем.....	70
2.4. Формування вихідного сигналу в оптико-електронних системах ...	73
2.5. Вихідний сигнал оптико-електронних систем – стохастичний процес	76
2.6. Статистичні характеристики сигналів на виході фотоприймача .....	80
2.6.1. Характеристики сигналу при постійній інтенсивності світлового потоку.....	81
2.6.2. Характеристики сигналу при випадкових флуктуаціях інтенсивності світлового потоку.....	83
2.6.3. Характеристики сигналу при детермінованій зміні інтен- сивності світлового потоку .....	85
2.6.4. Статистичні властивості реальних сигналів і перешкод на виході фотоприймача .....	87
2.7. Опис процесу формування вихідного сигналу оптико-електронної системи на основі корпускулярної теорії .....	88

2.8. Опис процесу формування вихідного сигналу оптико-електронної системи на основі хвильової теорії .....	94
2.9. Висновки .....	99
РОЗДІЛ 3 СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З ОПТИЧНОЮ ЛАНКОЮ ДЛЯ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ З ОБМЕЖЕНИМ ДИНАМІЧНИМ ДІАПАЗОНОМ	102
3.1. Моделі взаємодії оптичного випромінювання з оптичною ланкою оптико-електронної системи на основі хвильового і корпускулярного опису вхідного випромінювання .....	106
3.1.1. Послаблення оптичного сигналу оптичною ланкою. Хвильовий опис систем, які формують зображення .....	107
3.1.2. Послаблення оптичного сигналу оптичною ланкою. Корпускулярний опис систем, які формують зображення ..	112
3.2 Експериментальні дослідження статистичних характеристик вихідних просторово-часових сигналів в оптико-електронних системах .....	116
3.3. Оптична ланка оптико-електронних систем .....	124
3.3.1. Оптичне скло .....	126
3.3.2. Процеси в оптичній ланці, що відбуваються під впливом атмосфери .....	128
3.4. Статистичні властивості вихідних сигналів оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном .....	135
3.5. Експериментальні дослідження процесу взаємодії вхідного потоку з оптичною ланкою системи. Дослідження статистичних характеристик вхідного потоку .....	139
3.6. Статистична модель взаємодії оптичного сигналу з оптичною ланкою в телевізійних системах. Центральна гранична теорема .....	146
3.7. Статистична модель взаємодії оптичного сигналу з оптичною ланкою в телевізійних системах. Узагальнені граничні теореми .....	148
3.8. Визначення граничних розподілів вихідних сигналів оптико-електронних систем. Області притягання .....	156

3.9. Формування вихідного сигналу оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном .....	165
3.10. Межі застосування статистичних моделей вихідних сигналів оптико-електронних систем .....	169
3.11. Висновки .....	172
<b>РОЗДІЛ 4 СТОХАСТИЧНІ МОДЕЛІ ВИХІДНИХ СИГНАЛІВ, ЯКІ ВРАХОВУЮТЬ ВЗАЄМОДІЮ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З ЕЛЕМЕНТАМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ З ОБМЕЖЕНИМ ДИНАМІЧНИМ ДІАПАЗОНОМ.....</b>	<b>176</b>
4.1. Статистичні властивості розсіяного світла .....	179
4.2. Потоки групованих точок .....	184
4.3. Статистична модель сигналів в оптико-електронних системах при реєстрації надслабкого випромінювання. Парнокорельований потік сигналів .....	187
4.4. Модель взаємодії оптичного випромінювання з елементами оптико-електронної системи в складі акустооптичного аналізатора спектра.....	196
4.5. Висновки .....	208
<b>РОЗДІЛ 5 ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ В ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ З УРАХУВАННЯМ РОЗВИТКУ СТОХАСТИКО-ДЕТЕРМІНОВАНИХ МЕТОДІВ ПРИЙМАННЯ Й ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....</b>	<b>212</b>
5.1. Аналіз характеристик виявлення в оптико-електронних системах .....	215
5.2. Оцінювання виявної здатності оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном .....	218
5.3. Характеристики виявлення сигналу з випадковою амплітудою....	223
5.4. Характеристики виявлення сигналів в оптико-електронних системах при використанні методів накопичення послідовності кадрів .....	225
5.5. Виявлення сигналу за перевищенням порога в послідовності з М кадрів.....	229
5.5.1. Виявлення сигналу за L перевищення сигналу в серії з М кадрів .....	230

5.6. Виявлення ослаблених оптичних сигналів із використанням методів накопичення .....	236
5.7. Виявлення парнокорельованого потоку сигналів на тлі пуассонівського шуму .....	243
5.8. Рекомендації щодо забезпечення високої точності визначення просторово-часових характеристик сигналів із підвищеними ймовірнісними характеристиками виявлення в оптико-електронних системах.....	252
5.9. Висновки .....	254
<b>РОЗДІЛ 6 СТВОРЕННЯ МЕТОДІВ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ В ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВІ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ СТОХАСТИКО-ДЕТЕРМІНОВАНОГО ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....</b>	<b>258</b>
6.1. Імітаційне моделювання методу виявлення зображення рухомих об'єктів відомої форми в телевізійних кадрах в умовах слабкої освітленості .....	260
6.2. Оцінювання характеристик роботи алгоритму отримання зображення рухомих об'єктів відомої форми в умовах слабкої освітленості.....	266
6.2.1. Оцінювання просторового положення зображення об'єкта... ..	271
6.3. Імітаційне моделювання методу розрізнення зображень близько розміщених об'єктів, які мають різну яскравість .....	279
6.4. Дослідження впливу методів компресії відеопотоків на мікроструктуру зображень .....	288
6.5. Висновки.....	296
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>299</b>
<b>ПОСИЛАННЯ.....</b>	<b>306</b>
Додаток А. Акт впровадження результатів дослідження у навчальний процес.....	333
Додаток Б. Акт впровадження результатів досліджень на підприємстві.....	334
Додаток В. Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	336

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Динамічний розвиток техніки і технологій протягом останніх десятиліть сприяв технічній реалізації потенційно високих можливостей оптико-електронних і телевізійних систем. Основними перевагами систем є висока точність визначення координат об'єктів, висока роздільна здатність за дальністю, кутова роздільна здатність, тобто здатність розрізняти два сусідні рівновіддалені об'єкти. Усе назване дає можливість широкого застосування оптико-електронних систем телевізійного типу в багатьох галузях науки і техніки, наприклад, в астрономії, системах технічного зору, біології та медицині.

Розвиток сучасних телевізійних систем дає можливість поглиблювати знання про навколишній світ і дозволяє робити відкриття в галузі природничих наук. Удосконалення систем вимагає покращених теоретичних знань про фізичні процеси поширення, приймання й оброблення оптичного випромінювання. Створення таких систем ґрунтується на глибокому розумінні фізичних процесів виникнення, поширення оптичного випромінювання, а також теорії приймання та оброблення оптичних сигналів з урахуванням особливостей їхньої просторово-часової структури, хвильових і корпускулярних властивостей. Урахування додаткових властивостей оптичного випромінювання зумовлює необхідність розроблення більш повних математичних моделей, нової елементної бази оптико-електронних систем, оптимізації алгоритмів приймання та оброблення оптичних сигналів.

Загальній теорії побудови оптико-електронних систем присвячені роботи А. А. Курикші, М. М. Мірошнікова, Г. М. Мосягіна, В. М. Нікітіна, О. І. Стрелкова, В. М. Фоміна, О. Г. Шереметьєва, Ю. Г. Якушенкова та багатьох інших.

Існують кілька теоретичних аспектів опису оптичних приймальних сигналів, на основі яких будуються алгоритми приймання, оброблення й передавання сигналів у системах. Праці Г. Н. Долі, В. І. Коленькова,

В. Г. Колобродова, Л. Ф. Купченко, В. Є. Саваневича, В. В. Сауткіна, Ю. Є. Федосєєва та ін. присвячені проблемам створення методів і алгоритмів оброблення сигналів в оптико-електронних системах.

Приймальні сигнали в оптико-електронних системах аналізуються з позиції хвильової теорії, що ґрунтується на системі диференціальних рівнянь Максвелла, які описують напруженості електричного і магнітного полів, електричної та магнітної індукції і густини електричного заряду. У систему рівнянь Максвелла також входять матеріальні рівняння, що характеризують поведінку різних середовищ в електромагнітному полі. З урахуванням матеріальних рівнянь і граничних умов, система рівнянь Максвелла є повною і дозволяє вивчити всі властивості електромагнітного поля і багато процесів взаємодії поля з речовинами. Хвильова теорія дозволяє ґрунтовно пояснити процеси інтерференції і дифракції світла.

Однак в оптичному діапазоні спектра енергія квантів значна, процес поглинання електромагнітної енергії має квантовий характер, що приводить до появи випадкових флуктуацій як сигнальної, так і фонових компонент. Аналізуючи системи з позиції корпускулярної теорії, коли електромагнітне випромінювання оптичного діапазону потрактовується як потік дискретних частинок (фотонів), зручно описувати явища поглинання в нейтральних фільтрах і в речовині фотокатода.

На сучасному етапі спостерігається суперечність перспектив розвитку оптико-електронної техніки (сучасних можливостей наявних засобів) і апріорної інформації про можливості спостереження об'єктів природознавства. Потенційними можливостями систем є необхідність розширення динамічного діапазону оптико-електронних систем, як у бік сильних сигналів, так і в бік слабких і надслабких сигналів.

Крім того, проблемними питаннями є реєстрація, виявлення та обчислення параметрів малорозмірних і малоконтрастних об'єктів, які мають важливе значення при розробленні та вдосконаленні оптико-електронних систем. Сигнали від таких об'єктів характеризуються значеннями енергії майже зав-

жди нижчими за значення порога чутливості системи. Виявлення оптико-електронними системами телевізійного типу і визначення параметрів спостережуваних об'єктів (при величині відношення сигнал/шум менше, ніж 5) у цей час не проводяться, проте є доцільними і необхідними в різних галузях. Наприклад, виявлення сильних сигналів на фоні сильних перешкод необхідне під час астрономічних спостережень, радіомоніторингу простору (акустооптичні аналізатори спектра); виявлення надслабких сигналів актуальне під час астрономічних спостережень, в дослідженні процесу біохемілюмінесценції та лізису клітин у біології та медицині, при розрізненні близько розташованих об'єктів.

Існують шляхи розширення динамічного діапазону систем:

1. Необхідною умовою розширення потенційних можливостей оптико-електронних і телевізійних систем є зниження порогів у пристроях первинної інформації. Однак це спричиняє високу трудомісткість наявних методів оброблення і складність їх практичної реалізації.

2. Необхідність застосування спектральних і нейтральних фільтрів під час реєстрації оптичних сигналів для узгодження динамічного діапазону оптико-електронної системи приводить до зміни статистики приймальних сигналів.

3. Необхідність використання фотоприймальних пристроїв, яким властиві більша енергетична чутливість і збільшення кількості елементів розрізнення. Це вказує на доцільність розроблення нових технологій фотоприймальних елементів.

Розширення динамічного діапазону системи з використанням кожного із запропонованих методів зумовлює необхідність виявляти й обчислювати характеристики сигналів, порівнянних із рівнем шуму, тобто працювати на межі динамічного діапазону оптико-електронних систем. У наш час для опису явищ, що відбуваються на межі динамічного діапазону, використовують різні теоретичні моделі опису сигналів. Найважливішими **недоліками** наявних теоретичних моделей, що лежать в основі принципів приймання, оброблення й передавання сигналів в оптико-електронних системах, є неоднозначний опис із використанням різних підходів, взаємозв'язку основних показни-

ків ефективності оптико-електронних систем і критеріїв, що визначають ефективність систем, таких, як роздільна здатність, імовірнісні характеристики виявлення, величина відношення сигнал/шум.

Аналіз цих фактів сприяє усвідомленню внутрішніх суперечностей між наявними методами приймання та оброблення телевізійної інформації і показниками якості характеристик спостережуваних об'єктів. Для усунення цих суперечностей необхідно запропонувати підхід, який систематизує теоретичні знання методів опису оптичних сигналів в оптико-електронних системах.

Таким чином, тема дисертаційної роботи є актуальною, спрямованою на розв'язання **науково-технічної проблеми**, а саме: підвищення ефективності оптико-електронних систем завдяки розвитку математичних моделей і стохастико-детермінованих методів приймання та оброблення сигналів, в основі яких – сумісне використання корпускулярного, хвильового і статистичного описів оптичних сигналів в оптико-електронних системах.

Застосування комплексного використання хвильових і корпускулярних властивостей з урахуванням статистичних характеристик оптичного випромінювання **дозволить** більш адекватно описати процеси взаємодії світла з об'єктом спостереження, елементами оптико-механічного тракту, а також перетворення оптичного випромінювання фоточутливими елементами.

Використання розроблених методів стохастико-детермінованого оброблення оптичних сигналів, що ґрунтуються на запропонованих математичних моделях, **дозволить** розширити динамічний діапазон систем в області приймання сильних сигналів в умовах складних перешкод, зменшити порогову чутливість в області приймання слабких сигналів, розробити методи, що підвищують роздільну проникну здатність системи, а також забезпечити розширені можливості систем при реєстрації сигналів різних енергетичних, відбивальних, просторових і часових властивостей.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки. Тематика роботи відповідає Закону України від 09.09.2010

№ 2519-VI «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки» та Закону України від 08.09.2011 № 3715-VI «Про пріоритетні напрямки інноваційної діяльності в Україні». Дослідження пов'язані із планом науково-дослідних робіт університету, спрямованих на розробку систем локації в різних середовищах та оптоелектронних системи подвійного призначення, які виконувались в період 2001-2010 років при участі автора:

– НДР «Розроблення принципів побудови пристрою виявлення пачок коротких оптичних сигналів блоку Ч-1»; тема № 01-27, № ДР 0104U0902072, 2001 – 2005 рр.;

– НДР «Розроблення методів підвищення роздільної здатності, збільшення динамічного діапазону акустооптичного аналізатора спектра» № 05-22, № ДР 0105U007073, 2005 – 2008 рр.;

– НДР «Методи підвищення динамічного діапазону блоку Ч1 та розроблення пропозицій щодо їх реалізації» № 09-20, № ДР 0109U008535, 2009 – 2010 рр.

**Мета і завдання дослідження.** Розширення динамічного діапазону і покращення характеристик виявлення оптико-електронних систем на основі розроблення і розвитку стохастико-детермінованих методів приймання та оброблення сигналів.

Основні завдання дисертаційної роботи, виконання яких зумовлюється окресленою метою:

1. Проведення аналізу існуючих моделей вхідних та вихідних сигналів, методів приймання та оброблення сигналів, спрямованих на підвищення ефективності оптико-електронних систем за прийнятими критеріями при спостереженні малорозмірних та малоконтрастних об'єктів на межі динамічного діапазону.

2. Дослідження впливу оптичних систем та процесу послаблення оптичного випромінювання оптичною ланкою на ефективність оптико-електронних систем з обмеженими динамічним діапазоном.

3. Дослідження впливу середовища розповсюдження та фотоприймачів на ефективність оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном.

4. Розроблення й обґрунтування адекватних математичних моделей взаємодії електромагнітного випромінювання з усіма (елементами) трактами проходження сигналів, які враховують стохастико-детермінований характер оптичних сигналів і перешкод.

5. Дослідження додаткових статистичних властивостей приймальних сигналів в оптико-електронних системах із використанням розроблених математичних моделей оптичних сигналів та урахування їх при оптимізації характеристик виявлення складних оптичних сигналів, яким притаманні різні просторові і часові характеристики в оптико-електронних системах.

6. Розроблення й оптимізація методів оброблення сигналів на основі запропонованих математичних моделей, спрямованих на розширення динамічного діапазону оптико-електронних систем, як у бік реєстрації надслабких, так і в бік сильних сигналів на фоні перешкод. Вивчення можливості розроблених методів під час їхнього практичного використання.

7. Розроблення методів і рекомендацій щодо проектування нових і вдосконалення наявних оптико-електронних систем, що забезпечують підвищення ефективності оптико-електронних систем, вимірювання просторових і часових характеристик реєстрованих сигналів із покращеними ймовірнісними характеристиками виявлення.

**Об'єкт дослідження** – процес взаємодії оптичного випромінювання з об'єктами спостереження, елементами оптико-механічного тракту в оптико-електронних системах.

**Предмет дослідження** – моделі і методи приймання оптичних сигналів і алгоритми їхнього оброблення в оптико-електронних системах.

**Методи дослідження.**

У дисертації використані теоретичні та експериментальні методи дослідження: для опису перетворення сигналів в оптико-електронних системах, вивчення статистичних характеристик сигналів в оптико-електронних системах використані положення хвильової і корпускулярної теорії світла, теорії випадкових потоків, теорії ймовірностей, теорії побудови оптико-

електронних систем; для розроблення принципів підвищення ефективності систем і виявлення вихідних сигналів використані методи статистичного синтезу й основні положення теорії ухвалення рішень; для підтвердження дієвості розроблених методів були проведені дослід з використанням методів оптимального планування експерименту і математичної статистики.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в тому, що теорія стохастико-детермінованого оброблення сигналів в оптико-електронних системах набула подальшого розвитку:

1. Для опису перетворення стохастичних сигналів оптичною системою розроблена нова математична модель вихідного сигналу в оптико-електронних системах з обмеженим динамічним діапазоном при формуванні просторово-часового розподілу оптичного випромінювання в площині фотоприймача на основі корпускулярної теорії світла і статистичної теорії потоків. Відмінністю є те, що модель враховує залежність граничних законів розподілу флуктуацій вихідного сигналу від коефіцієнта послаблення нейтрального фільтра, включеного до складу оптичної ланки системи [43], [47], [136] – [140].

2. Для опису перетворення сигналів приймачем випромінювання розроблена нова математична модель вихідного сигналу в оптико-електронних системах при реєстрації надслабкого випромінювання. Відмінним є те, що модель враховує природу виникнення парнокорельованих сигналів і дозволяє розробити і дослідити метод реєстрації та аналізу надслабкого випромінювання, що визначає ступінь узгодження просторових і енергетичних характеристик випромінювання об'єктів із виявленими властивостями оптико-електронної системи [145], [146], [160].

3. Опис процесу виявлення сигналів уможливив удосконалення методу виявлення на основі критерію узгодження просторових і енергетичних характеристик об'єктів із виявленими властивостями оптико-електронної системи. Критерій враховує розмір і контраст об'єктів і відображає взаємозв'язок цих характеристик зображення з частотно-контрастною чутливістю системи. Обчислені характеристики виявлення малорозмірних і малоко-

нтрастних об'єктів на спеціалізованих зображеннях [14], [151], [152], [204], [207], [212], [213], [215].

4. Набула подальшого розвитку математична модель взаємодії оптичного випромінювання з елементами оптико-електронної системи, що входить до складу акустооптичних аналізаторів спектра, яка враховує стохастико-детермінований характер оптичних сигналів і перешкод різних просторово-частотних і енергетичних параметрів [14], [141] – [143], [147] – [149].

5. Удосконалений метод збільшення ефективності оптико-електронних систем, який відрізняється від відомих тим, що вибір параметрів внутрішньо-кадрового і міжкадрового накопичення враховує ефекти взаємодії оптичного випромінювання з елементами системи [14], [139], [148], [150], [152], [153], [197], [207], [209], [210].

#### **Практичне значення отриманих результатів:**

1. Систематизація теоретичних методів аналізу вхідних оптичних сигналів в оптико-електронних системах дозволяє описувати роботу систем більш адекватно у різноманітних умовах сигналів та завад, а також залежно від умов експлуатації систем.

2. Застосування корпускулярних властивостей та врахування статистичних характеристик вхідного оптичного випромінювання дозволяє підвищити ефективність систем за рахунок врахування процесів взаємодії світла з об'єктом спостереження, елементами оптико-механічного тракту, перетворення оптичного випромінювання фоточутливими елементами, а також при розрахунках та обиранні критеріїв ефективності системи.

3. Використання граничних розподілів при описі вихідних сигналів оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном дозволяє визначати характеристики виявлення сигналів, які знаходяться на межі динамічного діапазону системи.

4. Встановлення меж застосування основних граничних теорем при статистичному аналізі вихідних сигналів оптико-електронних систем дозволить уникнути суттєвих помилок при виявленні сигналів, які характеризують

ються низькою величиною відношення сигнал/шум.

5. Використання запропонованих методів обробки сигналів дозволяє розширити діапазон систем в області приймання сильних сигналів в умовах складної заводої обстановки та знизити порогову чутливість системи при реєстрації слабких сигналів.

6. Розроблений метод виявлення сигналів на основі критерію узгодження просторових та енергетичних характеристик об'єктів із властивостями виявлення оптико-електронних систем дозволив підвищити ефективність систем за критеріями величини відношення сигнал/шум та імовірнісних характеристик виявлення в десятки разів. При прийнятті гауссової моделі вихідних сигналів за критерієм величини відношення сигнал/шум у 20 разів, за критерієм умовної імовірності хибної тривоги в  $10^2$  разів. При прийнятті моделі вихідного сигналу на основі  $\alpha$ -стійких законів ефективність системи за критерієм умовної імовірності хибної тривоги не змінюється, при загальному покращенні якості зображення у вислідному зображенні і збільшенні амплітуди сигнальної складової в рази.

7. Запропоновані методи та алгоритми оброблення сигналів в оптико-електронних системах дозволили істотно розширити діапазон значень енергій вхідних сигналів. На прикладі оптико-електронної системи, яка входить до складу радіотехнічної системи моніторингу радіопростору показано, що спектральний діапазон систем збільшився на 30 %; динамічний діапазон систем – на 40 %.

8. Запропонований метод збільшення ефективності оптико-електронних систем, заснований на внутрішньокадровому та міжкадровому накопиченні та синтезованих алгоритми, які сумісно застосовують поетапне міжкадрове і внутрішньокадрове оброблення та методи ослаблення дозволили підвищити ефективність виявлення сигналів за критерієм величини сигнал/шум у 5–10 разів.

**Реалізація роботи.** Результати наукового дослідження впроваджені у

Відкритому акціонерному товаристві «Спеціальне конструкторське бюро радіотехнічних приладів» – дочірньому підприємстві Державної акціонерної холдингової компанії «Топаз» Міністерства промислової політики, м. Донецьк при розробленні перспективних акустооптичних засобів аналізу радіочастотного аналізатора спектра радіосигналів. Під час виконання науково-дослідних і конструкторських робіт результати впроваджені у вигляді розроблених математичних моделей взаємодії оптичного вивчення з елементами оптико-електронної системи, яка входить до складу акустооптичних аналізаторів спектра радіосигналів. Урахований стохастико-детермінований характер оптичних сигналів і перешкод різних просторово-часових і енергетичних параметрів при прийманні складних оптичних сигналів, а також при розробленні методів і алгоритмів фільтрації фонових складових вихідних сигналів. Отримані результати дозволили збільшити спектральний діапазон системи на 30% і збільшити динамічний діапазон систем на 40%, а також засвідчили можливість виявляти радіосигнали зі складною внутрішньоімпульсною структурою.

У процесі виконання НДР № ДР 0104U0902072 «Розроблення принципів побудови пристрою виявлення пачок коротких оптичних сигналів блоку «Ч-1» описані й проаналізовані оптичні сигнали, що формуються блоком «Ч-1»; розроблена математична модель виявлення оптичних сигналів, здійснене її моделювання за допомогою методів математичної статистики; розроблені квазіоптимальні алгоритми виявлення пачки коротких оптичних сигналів; обчислені умовні ймовірності характеристик виявлення пачки коротких оптичних сигналів.

Під час виконання НДР № ДР 0105U007073 «Розроблення методів підвищення роздільної здатності, збільшення динамічного діапазону акустооптичного аналізатора спектра» були вироблені методи підвищення роздільної здатності за частотою акустооптичних аналізаторів спектра й оцінена їхня ефективність; сформульовані пропозиції щодо реалізації методу підвищення роздільної здатності за частотою акустооптичних аналізаторів спектра; розроблені методи збільшення динамічного діапазону акустооптичних аналізаторів спектра за інтенсивністю сигналів й оцінена їхня ефективність; вироб-

лені методи розпізнавання вхідних сигналів за нелінійними відгуками акустооптичного аналізатора спектра.

Виконання НДР № ДР 0109U008535 «Методи підвищення динамічного діапазону блоку Ч1 та розроблення пропозицій щодо їх реалізації» уможливило здійснення математичного опису оптичних сигналів, що дозволило підвищити ефективність використання відомих статистичних методів оцінювання параметрів сигналів в умовах невизначеності і групованих вибірок; розроблення методів і створення алгоритмів оброблення сигналів блоку «Ч-1» з метою збільшення динамічного діапазону блоку в бік слабких і сильних сигналів; створення рекомендацій щодо практичної реалізації запропонованих алгоритмів під час аналізу частотних характеристик радіосигналів різних енергій.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес Української інженерно-педагогічної академії Міністерства освіти і науки України, м. Харків у курсах «Цифрове оброблення сигналів і зображень», «Комп'ютерна електроніка» при підготовці магістрів, спеціалістів за спеціальністю «Професійне навчання. Електроніка» і «Професійне навчання. Телекомунікації та зв'язок» у вигляді методу статистичного оброблення сигналів із детермінованими і стохастичними параметрами; методики дослідження енергетичних і просторово-часових параметрів сигналів за допомогою математичної статистики; методики створення оптимальних і квазіоптимальних алгоритмів оброблення сигналів і зображень; методики обчислення динамічного діапазону фоточутливих елементів систем та їх узгодження із параметрами сигналів.

**Достовірність наукових результатів і висновків**, сформульованих у дисертації підтверджується коректним використанням методів теорії побудови оптико-електронних систем. У дисертації застосовані теоретичні й експериментальні методи, а саме: для опису процедур перетворення вхідних оптичних сигналів в оптико-електронних системах, їхніх енергетичних, просторово-часових характеристик використані основні положення хвильової і корпускулярної теорії світла; для опису статистичних характеристик вихідних сигналів систем використані положення теорії ймовірності та теорії випадкових

потоків; для синтезу і розв'язання проблем виявлення використані методи статистичного синтезу й основні положення теорії прийняття рішень; для підтвердження адекватності результатів теоретичних досліджень і перевірки дієвості розроблених методів проведені досліди з використанням методів оптимального планування експерименту і математичної статистики.

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні результати, які становлять сутність дисертаційної роботи й відображені в пунктах новизни, наукової та практичної значущості, автор отримав самостійно. У роботах, написаних у співавторстві, які наведені в списку опублікованих праць за темою дисертації автору належать ідеї й такі результати:

У роботі [43] втілена ідея проведення порівняльного аналізу розрахунків ефективності оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном за критерієм сигнал/шум при використанні теоретичних аспектів опису принципів формування вихідних сигналів в оптико-електронних системах.

У роботі [47] запропонована ідея визначення стохастичної поведінки вихідних сигналів в оптико-електронних системах із метою визначення статистичних характеристик сигналів і перешкод.

У роботі [136] використана ідея опису вихідних сигналів на основі математичної моделі сигналів, яка враховує стійкі закони розподілу випадкових величин.

У роботі [139] дисертантка запропонувала провести теоретичний аналіз вихідних сигналів в оптико-електронних системах з обмеженим динамічним діапазоном на основі методики розрідження пуассонівських потоків.

У роботах [141] – [143], [148], [151] на основі систематизації теоретичних методів опису й аналізу оптичних сигналів запропоновані методики виявлення сигналів із фіксованими характеристиками виявлення, які забезпечують виявлення сигналів у збільшеному частотному і динамічному діапазонах.

У роботах [142], [147] запропоновано використання стохастико-детермінованих методів оброблення сигналів в оптико-електронних системах, що входять до складу акустооптичних аналізаторів спектра. Запропоно-

вано врахувати квантову природу взаємодії електромагнітного випромінювання з фотоприймачем. Потік носіїв зарядів описаний на основі пуассонівської статистики. Знайдена оптимальна оцінка параметрів просторового положення сигналу в площині фотоприймача.

У роботах [144], [153], [207], [210], [211], [215] запропоновано використовувати метод узгодження просторових та енергетичних характеристик об'єктів із виявленою здатністю оптико-електронних систем.

У роботі [145] запропонована схема виявника парнокорельованих імпульсів й оцінена інтенсивність сигнальних фотозвітів для випадку пуассонівського і парнокорельованих потоків.

У роботі [146] обчислена ефективність оптико-електронних систем за критерієм максимуму логарифма відношення правдоподібності; проаналізована густина ймовірностей вихідних сигналів при реєстрації надслабкого випромінювання.

У роботах [150], [197], [209], [212] на основі комплексного використання корпускулярних і хвильових властивостей вихідних сигналів і пуассонівської статистики вихідних потоків запропонований метод визначення параметрів рухомих об'єктів, який поєднує кореляційний, різницевий, пороговий методи, а також сформульовані принципи оптимізації методів міжкадрового оброблення.

У роботах [152], [213] запропонований алгоритм розділення (розрізнення) близько розміщених малорозмірних об'єктів, що мають різні енергетичні характеристики послідовності аналізованих кадрів.

У роботі [160] синтезований квазіоптимальний виявник парнокорельованого потоку на фоні пуассонівського шуму.

**Апробація результатів дисертаційної роботи.** Основні результати дослідження були представлені як доповіді на II Міжнародному радіоелектронному форумі «Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку» (Харків, 2005), VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Людина і космос. Ракетно-космічна техніка» (Дніпропетровськ, 2006), Міжнародній конференції «Розширення співпраці в наземних астрономічних дослідженнях

держав південно-східної Європи. Вивчення об'єктів навколоземного простору та малих тіл сонячної системи» (Миколаїв, 2006), Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми астрономії» (Одеса, 2007), VII Українській конференції з космічних досліджень НЦУВКС (Евпаторія, 2007), III Міжнародному радіоелектронному форумі «Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку» (Харків, 2008), VI International Conference on Optoelectronic Information Technologies «Photonics-ODS 2008» (Vinnytsia, 2008), VIII Міжнародній міждисциплінарній науково-практичній конференції «Українська Асоціація „Жінки в науці та освіті”» (Алушта, 2009), II Міжнародній науково-практичній конференції «Якість технологій – якість життя» (Судак, 2010), International Congress Helsinki, Finland «Photodiagnosis and Photodynamic therapy» (Helsinki, 2012), Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» (Москва, 2013), Науково-практичній конференції «Технологии обработки оптических элементов и нанесения вакуумных покрытий» (Мінськ, 2013), Міжнародному історико-науковому симпозиумі «История оптики и современность» (Санкт-Петербург, 2013).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи відображені у 45 наукових працях, серед яких 2 монографії [14], [204], 29 статей в провідних фахових виданнях, з них 24 роботи опубліковані у виданнях, що цитуються у міжнародних наукометричних базах: Україніка Наукова, SCOPUS, Academic OneFile, AGRICOLA, EMBiology, Gale, Google Scholar, INIS Atomindex, Inspec, OCLC, Index Copernicus, Directory Indexing of International Research Journals, РИНЦ; 5 статей в інших виданнях; 14 тез доповідей на міжнародних та вітчизняних науково-технічних конференціях.

**Структура дисертації.** Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і двох додатків. Загальний обсяг роботи становить 343 сторінок, із них дисертації без додатків – 332 сторінок, 89 рисунків, список використаних джерел включає 249 найменувань і займає 27 сторінок, а також 3 додатки на 11 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

### СТАН ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

**Метою розділу** є визначення напрямів удосконалення і розвитку оптико-електронних систем.

Для досягнення окресленої мети необхідно провести аналіз методів підвищення ефективності оптико-електронних систем і визначити чинники, які стримують розвиток і вдосконалення систем.

1.1. Системологічний аналіз проблеми теоретичних методів приймання й оброблення оптичних сигналів в оптико-електронних системах

Розвиток оптико-електронної техніки зумовлений збільшуваним потоком візуальної інформації, яка використовується в усіх галузях наукових природознавчих досліджень, оскільки людина отримує приблизно 60 % інформації про навколишній світ за допомогою зору.

Основні тенденції розвитку й удосконалення оптико-електронних систем розглядаються в [1] – [5]. З урахуванням викладеного в цих роботах наводимо їх класифікацію:

1. Розширення кола завдань, які виконує одна й та сама оптико-електронна система.
2. Підвищення тимчасового та енергетичного розділення (розрізнення) системи.
3. Удосконалення методів оброблення сигналів і зображень.
4. Збільшення динамічного діапазону реєстрованих і оброблюваних сигналів.
5. Зменшення габаритів, маси й енергоспоживання системи.
6. Зниження вартості системи.

При побудові оптико-електронної системи оцінюються функціональ-

ність, потреби і реалізованість системи. На рис. 1.1 поданий методичний підхід до розроблення оптико-електронної системи. Розглядаючи підхід до розроблення системи, необхідно зіставляти потреби галузей природознавства й основні характеристики системи для забезпечення точності і достовірності отримуваних результатів у широкому динамічному діапазоні приймального оптичного випромінювання.

Аналіз потреб галузей природознавства засвідчив, що необхідно реєструвати оптичне випромінювання, яке характеризується різними енергетичними параметрами. Наприклад, під час реєстрації надслабкого випромінювання при хемілюмінісценції випромінювання характеризується потужністю від 1 фотона за 1 секунду. При реєстрації оптичного випромінювання Сонця, необхідно реєструвати  $-27$ -му зоряну величину, яке характеризується потужністю до 20000 фотонів за 1 секунду на  $1\text{см}^2$ .

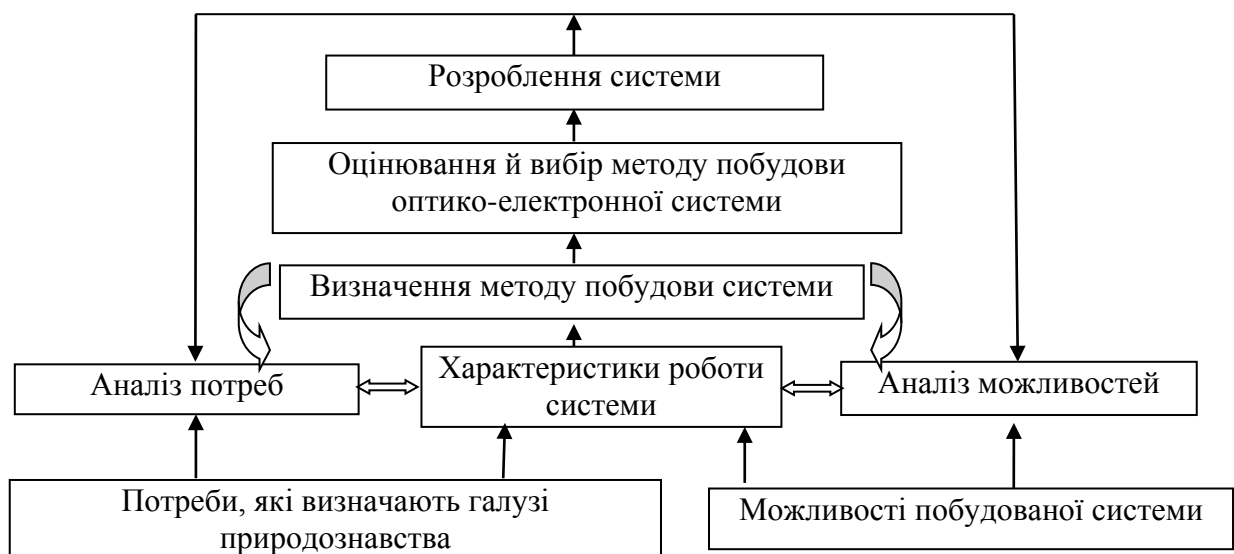
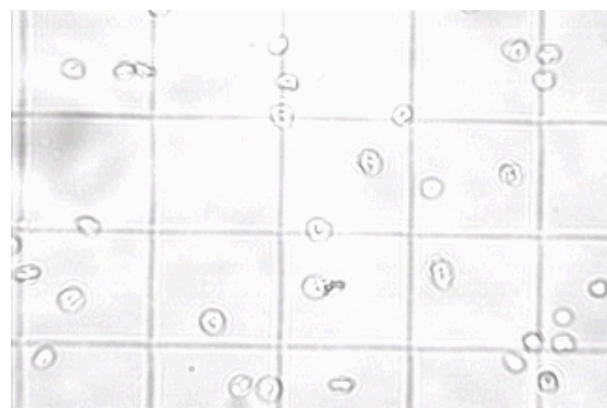
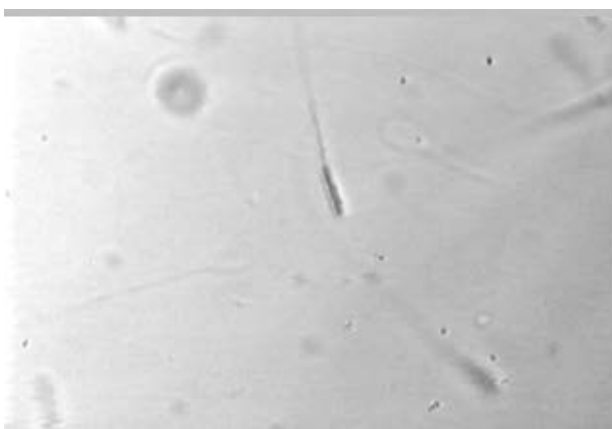


Рисунок 1.1 – Методичний підхід до розроблення оптико-електронної системи

У різних галузях природознавства за допомогою оптико-електронних систем реєструють і аналізують різні зображення [6] - [10]. Наприклад, зображення відеоспостереження, мікроскопічні дослідження біологічних об'єктів, астрономічні спостереження, наведені на рис. 1.2. Як видно, об'єкти, аналізовані в цих кадрах, мають великий спектр енергетичних і просторових характеристик.



а) фрагменти зображень, сформованих системою відеспостереження



б) фрагменти зображень, сформованих системою дослідження біологічних об'єктів



в) фрагменти зображень, сформованих системою астрономічних спостережень

Рисунок 1.2 – Приклади зображень, зареєстрованих оптико-електронними системами різного призначення

Аналіз можливостей побудови оптико-електронних систем показав, що в наш час значного поширення набули системи виявлення, вимірювання, спостереження. Обчислення параметрів таких систем передбачає з'ясування їхньої ефективності під час аналізу приймальних сигналів (рис. 1.3). Параметри і критерії ефективності залежать від призначення оптико-електронних систем. Наприклад, для систем виявлення критерієм ефективності можуть бути умовні ймовірності правильного виявлення і хибної тривоги. Для систем, призначених для вимірювання параметрів об'єктів – точність і похибка. На формування статистичної поведінки вихідних сигналів оптико-електронних систем впливають властивості оптичного випромінювання, властивості середовища поширення, властивості оптичної ланки і властивості приймача випромінювання.

На сучасному етапі пошуки основних теоретичних і практичних підходів удосконалення, розвитку оптико-електронних систем приймання та оброблення оптичних сигналів, підвищення їхньої ефективності та розширення їхнього динамічного діапазону здійснюються в кількох напрямках:

- розроблення нових технологій створення елементів оптичної ланки;
- розроблення нових технологій фотоприймальних елементів;
- розроблення методів додетекторного і післядетекторного оброблення сигналів;
- розроблення фізико-математичних моделей опису інформації, яка перетворюється в оптико-електронних системах.



Рисунок 1.3 – Ефективність оптико-електронних систем

## 1.2. Потенційні можливості оптико-електронних систем

Оцінюванню граничних можливостей, аналізу шляхів підвищення ефективності і визначення (класифікації) режимів, що обмежують граничну чутливість оптико-електронних систем, присвячені роботи [11] – [14].

Порогову чутливість приймального пристрою розуміємо як мінімальну енергію (потужність) сигналу на вході фотоприймача, при якій забезпечується його виявлення із заданими характеристиками (ймовірністю правильного виявлення та ймовірністю хибної тривоги). У загальному вигляді порогова чутливість або проникна здатність  $m_{\text{пр}}$ , що застосовується при спостереженні астрономічних об'єктів подана функцією [11]:

$$m_{\text{пр}} = f(m_{\text{дв}}, L_{\text{ф}}, D_{\text{вх зін}}, f'_{\text{ос}}, k_{\text{аб}}, \tau_{\text{омт}}, d_{\text{ел}}, S_{\lambda}, \xi_{\text{кв}}, T_{\text{к}}, \lambda, F, D), \quad (1.1)$$

$m_{\text{дв}}$  – граничний блиск джерела випромінювання;

$L_{\text{ф}}$  – яскравість фонового випромінювання;

$D_{\text{вх зр}}$  – діаметр входної зіниці оптичної системи;

$f'_{\text{ос}}$  – задня фокусна відстань оптичної системи;

$k_{\text{аб}}$  – узагальнений коефіцієнт аберацій оптичної системи;

$\tau_{\text{омт}}$  – коефіцієнт пропускання світлового потоку оптико-механічного тракту;

$d_{\text{ел}}$  – розмір елемента розрідження фотоприймача;

$S_{\lambda}$  – спектральна чутливість (або коефіцієнт квантової ефективності);

$\xi_{\text{кв}}$  – коефіцієнт використання випромінювання;

$T_{\text{к}}$  – тривалість кадру;

$\lambda$  – довжина хвилі світлового потоку;

$F$  – значення умовної ймовірності хибної тривоги;

$D$  – значення умовної ймовірності правильного виявлення.

**Методика розрахунку порогової чутливості.** Розрахунок порогової чутливості оптико-електронних систем передбачає оцінювання характеристики виявлення.

При заданих значеннях імовірності правильного виявлення  $D$  і ймовірності хибної тривоги  $F$  обчислюється потрібне середнє число сигнальних фотоелектронів  $\bar{n}_c$  на виході фотоприймача.

Середнє число сигнальних фотоелектронів пропорційне енергії (потужності) сигналу на вході фотоприймача і залежить від його параметрів (квантової ефективності  $\eta$ , спектральної чутливості  $S_\lambda$  тощо).

Отже, розрахунок чутливості приймального пристрою зводиться до розрахунку потрібного середнього числа сигнальних фотоелектронів  $\bar{n}_c$  і перерахунку його на вхід фотоприймача. Послідовність розрахунку можна відтворити таким чином:

$$\left. \begin{array}{l} \bar{n}_1 \\ \bar{n}_2 \end{array} \right\} \rightarrow \bar{n}_n \xrightarrow{F} n_0 \xrightarrow{D} \bar{n}_c + \bar{n}_n \xrightarrow{\bar{n}_n} \bar{n}_c \xrightarrow{\eta, S} W_{\text{пор}} (P_{\text{пор}}). \quad (1.2)$$

Над стрілкою, що позначає етап розрахунку, позначені апріорі задані параметри, які використовуються на цьому етапі. Так, після розрахунку  $\bar{n}_n$  використовується перше співвідношення  $F = f(\bar{n}_n, n_0)$  – функція, що залежить від двох аргументів, перший з яких  $\bar{n}_n$  визначається з урахуванням характеристик фотоприймача ( $\bar{n}_n$ ) й умов приймання ( $\bar{n}_\phi$ ), а значення самої функції  $F$  задано.

Для визначення функції  $n_0$  використовуються таблиці, запропоновані в довідниках з імовірнісних розрахунків [15] – [16], або графіки функцій, наведені на рис. 1.4.

Наступний етап розрахунку аналогічний визначенню  $n_0$ : використовується значення функції  $D = f(\bar{n}_n + \bar{n}_c, n_0)$  і відоме значення  $n_0$ , а сума  $\bar{n}_n + \bar{n}_c$  за таблицями або графіками визначається.

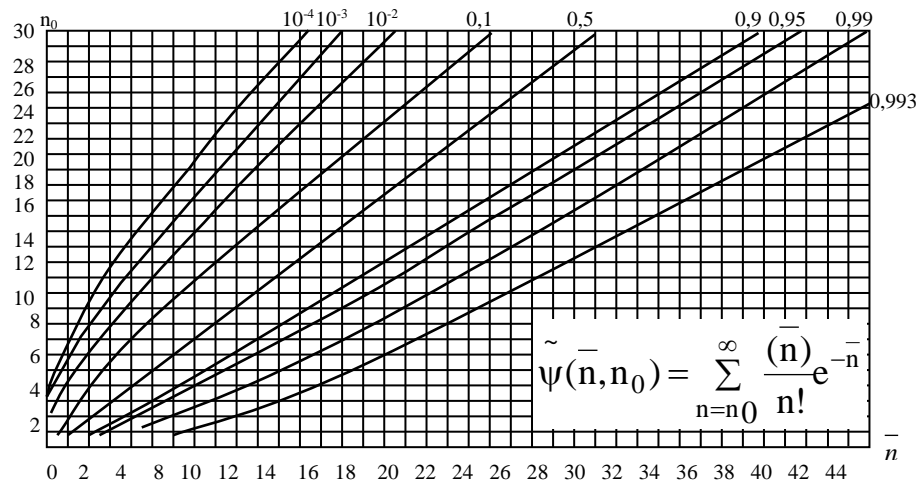


Рисунок 1.4 – Залежність виявлення сигналу на фоні шуму

При аналізі характеристик виявлення, при  $\bar{n}_n > 100$ , можна користуватися класичними співвідношеннями для виявлення оптичного сигналу з відомими параметрами в гауссовому шумі. При цьому розрахунок чутливості приймального пристрою істотно спрощується, якщо використовуються криві виявлення рис. 1.4. За цими кривими при заданих значеннях  $D$  і  $F$  визначається необхідне відношення сигналу до шуму  $\phi$ , а потім розраховується потрібне середнє число сигнальних фотоелектронів:

$$\bar{n}_c = \phi \sqrt{\bar{n}_n}. \quad (1.3)$$

Останній етап розрахунку – перерахунок потрібного середнього числа сигнальних фотоелектронів на вхід фотоприймача – здійснюється за виразами:

$$W_{\text{пор}} = \frac{\bar{n}_c \cdot h \cdot \nu}{\eta} \quad \text{або} \quad W_{\text{пор}} = \frac{\bar{n}_c \cdot e}{S_\lambda}, \quad (1.4)$$

де  $h\nu$  – енергія кванта приймального сигналу;

$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  кл – заряд електрону;

$\eta$  – квантова ефективність фотоприймача.

Порогова чутливість оптико-електронних систем визначається характеристиками фотоприймального пристрою (власні шуми фотоприймача) і рівнем зовнішніх перешкод  $\bar{n}_n$ , зумовлених випромінюванням небесного скле-

піння, випромінюванням дискретних джерел (Сонце, Місяць, планети, зірки тощо), і квантовою природою оптичного сигналу.

Фотоприймальні пристрої розвиваються шляхом збільшення роздільної здатності, зниження рівня темнових шумів і збільшення енергетичної чутливості. Основні характеристики фотоприймальних пристроїв на ПЗЗ структурах, наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1.

Параметр	Значення параметрів						
	496x475	244x190	640x480	640x480	1024x1024	1024x1024	3072x2042
Число елементів, шт	496x475	244x190	640x480	640x480	1024x1024	1024x1024	3072x2042
Світлочутлива площа, мм <sup>2</sup>	123	25	123	123	208	67	905
Площа елемента зображення, мкм <sup>2</sup>	530	540	400	400	164	55	144
Темновий сигнал, число електронів	10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	6,5·10 <sup>3</sup>	65	40	42	30
Порогова енергетична освітленість, Вт/м <sup>2</sup>	9,4·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-4</sup>	6,5·10 <sup>-4</sup>	6,5·10 <sup>-6</sup>	477·10 <sup>-5</sup>	1,47·10 <sup>-5</sup>	2,52·10 <sup>-5</sup>
Порогова чутливість, лк	0,64	0,14	0,44	4,4·10 <sup>-3</sup>	1,38·10 <sup>-3</sup>	4,44·10 <sup>-3</sup>	2,36·10 <sup>-3</sup>

На рис. 1.5 показана зареєстрована оптико-електронною системою адитивна суміш сигнальної і фонові складових.

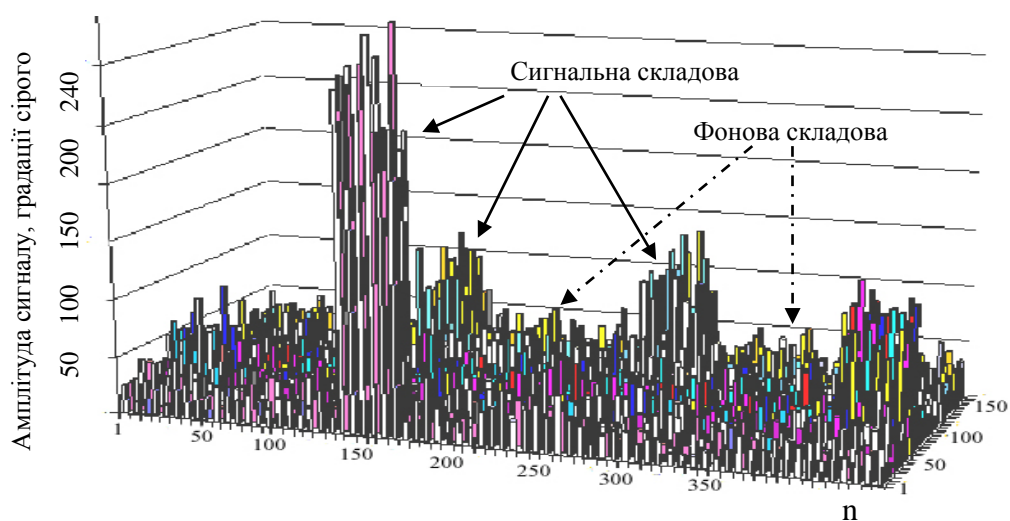


Рисунок 1.5 – Фрагмент зображення для різних рівнів сигнальної компоненти (чутливість фотоприймача 0,1 лк) рівень фонові складові 5 градацій сірого, рівень сигнальних складових 200, 50 і 20 градацій сірого

***Чинники, що обмежують потенційні можливості оптико-електронних систем:***

1. Фізичні процеси, що впливають на формування вихідних сигналів систем, наприклад, процеси, які відбуваються в атмосфері (фотопроцеси, турбулентність, вологість тощо).

2. Статистична нестабільність прийнятих системами сигналів і неоднозначність методів їхнього опису, наприклад, наявність угруповань, кореляцій фотонів.

3. Невизначений стан вхідного оптичного випромінювання. Фотон-квант може проявляти як властивості частинок, так і хвилі.

4. Технічні обмеження елементів оптико-електронних систем, наприклад, характеристики оптичних ланок, фотоприймача і передавальних елементів.

Стохастико-детермінована теорія оброблення сигналів в оптико-електронних системах включає вивчення та врахування процесів перетворення стохастичних сигналів основними елементами системи, а також оптимізацію процесів виявлення сигналів на фоні шуму.

Оптичне випромінювання, яке потрапляє на вхід оптико-електронної системи, взаємодіє з речовиною оптичної ланки і речовиною фотоприймального пристрою. Загальний механізм відклику фотоприймача на вхідне оптичне випромінювання пояснимо в рамках електромагнітного уявлення про взаємодію квантів світла з речовиною. При описі необхідно враховувати найважливіші механізми взаємодії квантів із речовиною – поглинання, випромінювання, відображення і пропускання.

Під час оброблення оптичних сигналів в оптико-електронних системах рішення приймається за вихідним сигналом фотоприймача. Вихідний сигнал фотоприймача є наслідком квантових переходів, що відбуваються під дією квантів світла при утворенні носіїв заряду, а також у результаті теплових коливань атомів або молекул речовини. Статистичні характеристики відклику фотоприймача відповідають законам розподілення оптичного сигналу в наслідок квантової природи сигналу і квантового характеру взаємодії світла з

речовиною.

Елементи оптико-електронних систем вважаються *лінійними*, тобто можна стверджувати, що встановлюється *детермінований* зв'язок між стохастичним вхідним потоком (оптичним сигналом) і стохастичним вихідним потоком (сигналом із виходу фотоприймача).

Інтенсивність світлового потоку  $I(t)$ , що потрапляє на вхід фотоприймача, змінюється за відповідним законом. Пропорційно інтенсивності світлового потоку змінюється й інтенсивність потоку носіїв зарядів у фотоприймачі  $\mu(t)$ . Для урахування характеру зміни потоку носіїв зарядів у фотоприймачі  $\mu(t)$  необхідно схарактеризувати послідовність носіїв заряду не тільки їхнім числом  $n$ , а й фіксованими моментами часу  $(t_1, t_2, \dots, t_n)$  і просторовими координатами  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  їх формування.

Стохастичний процес поширення оптичного випромінювання можна схарактеризувати броунівським рухом частинок (фотонів), який враховує, що кожна частинка за кінцевий час може подолати кінцевий шлях, а будь-яка з її координат є функція, яка не має похідної і яка приймає нескінченне число разів мінімальні і максимальні значення в будь-якому інтервалі.

Для розгляду формування вихідних сигналів в оптико-електронних системах можна використовувати розривні випадкові функції. Такий процес істотно відрізняється від функції лінійного броунівського руху, гауссового процесу, тим, що функція розривна.

Стохастичний процес формування вихідного сигналу в оптико-електронних системах з урахуванням процесів поглинання, відображення і пропускання можна розглядати як стрибкоподібний процес із *дискретним втручанням випадку*. Наприклад, випадкова величина (фотон), потрапляючи в певну точку простору, проводить у ній випадковий позитивний відрізок часу, після чого стрибком, випадково, потрапляє в іншу точку простору, в якій вона знову проводить випадковий час. Траєкторії динамічної величини у випадкові моменти часу мають розриви внаслідок випадкових стрибків. Та-

кий стохастичний процес пов'язаний із законом Пуассона. Моменти часу і просторові координати формування відклику фотоприймача можуть не відповідати вхідному потоку. При цьому детермінований зв'язок між стохастичним вхідним потоком і стохастичним вихідним потоком порушується.

Вивчення та опис *стохастичного* зв'язку між вхідним (оптичним сигналом) і вихідним потоком (сигналом із виходу фотоприймача), і відповідно проблеми, які виникають під час приймання й оброблення сигналів, вимагають нового погляду на відомі явища, наприклад, поширення оптичного випромінювання в турбулентній атмосфері, взаємодія оптичного випромінювання з оптичною ланкою і фотоприймальним пристроєм. Змінювана статистика фотонів може істотно впливати під час виконання прикладних завдань формування зображення і виявлення сигналів на фоні перешкод в оптико-електронних системах.

Порушення детермінованого зв'язку між вхідними та вихідними потоками залежно від енергетичних характеристик складних оптичних сигналів вимагає додаткового врахування характеристик передавальних ланок оптико-електронних систем. Вивчення стохастико-детермінованих процесів взаємодії оптичного випромінювання з елементами системи вимагає прийняття певного рівня абстракції.

Кожному рівню *абстракції* властиве застосування певного фізичного і математичного апарату. Для опису вихідних сигналів оптико-електронних систем доцільно використовувати різні рівні абстрагування для різних структурних частин оптико-електронних систем.

Таким чином, моделі сигналів в оптико-електронних системах і межі їхньої застосовності будуть залежати від того, наскільки повно в них враховані чинники, що характеризують умови роботи системи і параметри реєстрованих сигналів.

### 1.3. Визначення проблеми дослідження

Здійснений аналіз потреб галузей експлуатації оптико-електронних систем і можливостей побудови систем дозволяє визначити, що потенційні можливості систем визначаються оптимальним узгодженням характеристик елементів системи з енергетичними і просторово-часовими характеристиками сигналів. Тобто можливістю систем реєструвати вхідне випромінювання на фоні шуму з параметрами, достатніми для відтворення достовірних результатів із найкращими ймовірнісними характеристиками спостережуваних об'єктів. У межах системи «світло-сигнал» граничні можливості оптико-електронних систем будуть досягнуті тільки за умови однозначної реєстрації сигналів у системі «фотон-електрон». Однак на сучасному етапі розвитку оптико-електронних систем їхній динамічний діапазон обмежений і визначається чутливістю фотоприймальних пристроїв, якістю оптичної ланки і статистичними характеристиками приймального випромінювання.

Шляхи підвищення ефективності та розширення динамічного діапазону оптико-електронних систем доцільно розділити на окремі теоретичні і практичні методи дослідження й удосконалення:

1. Розроблення нових технологій фотоприймальних елементів.
2. Розроблення нових технологій створення елементів оптичної ланки.
3. Розроблення та удосконалення фізико-математичних моделей опису прийнятих сигналів при взаємодії з усіма елементами оптико-електронних систем.
4. Розроблення та удосконалення методів аналізу статистичних властивостей приймальних сигналів.
5. Розроблення й удосконалення алгоритмів оброблення інформації, що перетворюється в оптико-електронних системах.

При реєстрації та виявленні малоконтрастних і малорозмірних об'єктів, сигнали від яких характеризуються значеннями енергії, майже завжди нижчим за значення порога чутливості системи, проблема зниження порогів чут-

ливості, і тим самим підвищення ефективності системи, постає особливо гостро. З огляду на наявні технічні можливості розширення динамічного діапазону, зокрема зниження порогів у пристроях первинного оброблення інформації; застосування спектральних і нейтральних фільтрів; застосування методів фільтрації шумових складових, труднощі, що виникають при цьому, передусім пояснюються такими чинниками:

- умовністю міри критерію якості ефективності системи, оскільки точний спосіб вираження думки про якість не може існувати;
- неточністю математичних моделей вхідних і вихідних сигналів оптико-електронних систем;
- цілеспрямованим спрощенням цих моделей.

Таким чином, можна сформулювати *науково-технічну проблему дослідження*: підвищення ефективності оптико-електронних систем завдяки розвитку математичних моделей і стохастико-детермінованих методів приймання й оброблення сигналів, що ґрунтуються на комплексному використанні корпускулярного, хвильового і статистичного опису оптичних сигналів в оптико-електронних системах.

Розв'язання поставленої проблеми **дозволить** більш адекватно описати процеси взаємодії світла з об'єктом спостереження, елементами оптико-механічного тракту, перетворення оптичного випромінювання фоточутливими елементами. А також **уможливить** розширення динамічного діапазону систем у галузі приймання сильних сигналів в умовах складних перешкод, зменшення граничної чутливості в області приймання слабких сигналів, а також розроблення методів підвищення проникної здатності системи.

#### 1.4. Висновки

З огляду на такі особливості оптико-електронних систем, як:

– істотні відмінності природи і способів опису багатовимірних оптичних сигналів;

– велика різноманітність умов роботи оптико-електронних систем, і зокрема фонів і перешкод, а також неможливість у багатьох випадках достатньо адекватного апріорного опису цих умов;

– складність узагальненого опису сигналів оптико-електронних систем, що виконують різні завдання, оскільки можуть бути суттєві відмінності структурних схем, конструкцій, умов експлуатації та інші ознак систем конкретного призначення;

– складність досягнення адекватності моделі сигналів оптико-електронних систем у багатьох практичних випадках;

розв'язання окресленої науково-технічної проблеми можливе шляхом послідовного виконання основних *завдань* дисертаційної роботи, зумовлених поставленою метою:

1. Проведення аналізу існуючих моделей вхідних та вихідних сигналів, методів приймання та оброблення сигналів, спрямованих на підвищення ефективності оптико-електронних систем за прийнятими критеріями при спостереженні малорозмірних та малоконтрастних об'єктів на межі динамічного діапазону.

2. Дослідження впливу оптичних систем та процесу послаблення оптичного випромінювання оптичною ланкою на ефективність оптико-електронних систем з обмеженими динамічним діапазоном.

3. Дослідження впливу середовища розповсюдження та фотоприймачів на ефективність оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном.

4. Розроблення й обґрунтування адекватних математичних моделей взає-

модії електромагнітного випромінювання з усіма (елементами) трактами проходження сигналів, які враховують стохастико-детермінований характер оптичних сигналів і перешкод.

5. Дослідження додаткових статистичних властивостей приймальних сигналів в оптико-електронних системах із використанням розроблених математичних моделей оптичних сигналів та урахування їх при оптимізації характеристик виявлення складних оптичних сигналів, яким притаманні різні просторові і часові характеристики в оптико-електронних системах.

6. Розроблення й оптимізація методів оброблення сигналів на основі запропонованих математичних моделей, спрямованих на розширення динамічного діапазону оптико-електронних систем, як у бік реєстрації надслабких, так і в бік сильних сигналів на фоні перешкод. Вивчення можливості розроблених методів під час їхнього практичного використання.

7. Розроблення методів і рекомендацій щодо проектування нових і вдосконалення наявних оптико-електронних систем, що забезпечують підвищення ефективності оптико-електронних систем, вимірювання просторових і часових характеристик реєстрованих сигналів із покращеними ймовірнісними характеристиками виявлення.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНІ МЕТОДИ АНАЛІЗУ ВХІДНИХ Й ВИХІДНИХ СИГНАЛІВ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

**Мета розділу:** Систематизувати теоретичні методи, на яких ґрунтується опис вхідних і вихідних сигналів оптико-електронних систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати теоретичні методи опису вхідних сигналів з урахуванням корпускулярних і хвильових властивостей та методи опису вихідних сигналів з урахуванням статистичних особливостей. Матеріали, подані в розділі, опубліковані в [14].

Теорія стохастико-детермінованого оброблення сигналів в оптико-електронних системах ґрунтується на теоретичних методах опису вхідних і вихідних сигналів. Для успішного оброблення сигналів необхідно мати конкретний опис фізичних і статистичних процесів, що впливають на формування сигналів. Розгляд основних шляхів підвищення ефективності оптико-електронних систем, спрямованих на удосконалення фізико-математичних і статистичних моделей опису сигналів, які перетворюються в системах, передбачає, що основним їхнім завданням є оптимізація енергетичних розрахунків при прийманні складних оптичних сигналів, і при цьому необхідно враховувати теоретичні методи опису як вхідних, так і вихідних сигналів.

Вхідне оптичне випромінювання можна описувати з позицій хвильової теорії, при цьому зручно описувати дифракційні явища, інтерференцію, спектральні і поляризаційні властивості оптичних сигналів [24], [29]. При описі оптичного випромінювання з використанням фотонного уявлення можна врахувати явища, що мають імовірнісний характер, наприклад, генерації випромінювання, поглинання в ослаблювачах і в речовині фотокатода [31] – [33].

За допомогою оптико-електронних систем, як показав огляд ділянок застосування систем, приймаються сигнали різних енергій. При цьому гранична порогова чутливість визначає потенційні можливості оптико-електронних систем. Граничними можливостями оптико-електронних систем при енерге-

тичному виявленню сигналів є динамічний діапазон систем, обмежений на верхній межі режимом насичення, а на нижній – внутрішніми шумами фотоприймальних пристроїв.

Сигнали в оптико-електронних системах є багатопараметричними і, як корисні сигнали, так і перешкоди мають стохастичний і детермінований характер. Граничні можливості виявлення системи визначаються співвідношенням енергії корисного сигналу і рівнем флуктуацій шуму.

На статистичні характеристики сигналів впливає багато чинників, у тому числі тимчасові характеристики фотодетектування. Для опису статистичних характеристик оптичних сигналів можна використовувати як елементи корпускулярної теорії світла, подаючи оптичне випромінювання як випадковий потік подій – фотонів, так і елементи хвильової теорії. Застосування хвильової теорії для опису оптичних сигналів малої інтенсивності, коли за час спостереження реєструється мале число фотонів, призводить до результатів, що суперечать експериментальним даним [13], [14]. Статистичні характеристики вихідних сигналів при різних умовах роботи системи можуть характеризуватися різною густиною ймовірності [13], [14]. Отже, потенційні можливості оптико-електронних систем при реєстрації сигналів також будуть різними.

При підвищенні ефективності оптико-електронних систем у межах системного підходу необхідно розглядати оптико-електронні системи, встановлюючи залежність між показниками ефективності, вхідними сигналами системи, елементами системи і вихідними параметрами.

У розділі систематизовано теоретичні знання про процеси формування вихідних сигналів при реєстрації некогерентного випромінювання видимого діапазону в оптико-електронних системах.

2.1. Теоретичні методи опису електромагнітного випромінювання, яке приймають оптико-електронні системи

Відомо, що у фізиці використовуються такі теорії опису випроміню-

вання і поширення світла в просторі [17–20]:

- корпускулярна теорія І. Ньютона;
- електромагнітна теорія світла;
- квантова теорія;
- спеціальна теорія відносності А. Ейнштейна;
- балістична теорія В. Рітца.

Прямолінійне поширення світла наводило вчених на думку про те, що світло являє собою потік дрібних частинок (корпускул), які випускаються із джерела і рухаються в однорідній речовині прямолінійно і рівномірно. Такі погляди на природу світла отримали назву корпускулярної теорії. Прихильником цієї теорії був англійський фізик і математик І. Ньютон (1643–1727). У своєму фундаментальному трактаті «Оптика», виданому в 1704 році, учений описав теоретичні та експериментальні дослідження оптичних явищ. За допомогою корпускулярної теорії І. Ньютон пояснив явища відбиття і заломлення світла. Відповідно до цієї теорії, коли світло наближається до більш щільного середовища і переходить в нього, всі корпускули притягуються до цього середовища і тому при похилому потраплянні променів на його межу відхиляються: чим більша частинка, тим менше відхилення. Відбувається заломлення світла і просторове розділення різнорідних променів. На граничній поверхні більш щільного середовища світло не тільки заломлюється, але й відбивається. Отже, це середовище як притягує світлові корпускули, так і відштовхує їх.

Голландський фізик Х. Гюйгенс (1626–1695) створив хвильову теорію світла. Свої погляди він виклав у «Трактаті про світло», опублікованому в 1690 році. Х. Гюйгенс уважав, що Всесвіт заповнений якнайтоншим, якнайрухливішим, пружним і легким середовищем – світовим ефіром. Якщо в будь-якому місці ефіру частинка почне коливатися (наприклад, під дією джерела світла), то це коливання передається сусіднім частинкам і в просторі з величезною швидкістю пробігає ефірна хвиля, центр якої – перша частинка. Хвильові уявлення дозволили Х. Гюйгенсу теоретично вивести закони від-

биття й заломлення світла. Окрім того, цей дослідник запропонував принцип, за яким кожна точка поверхні, до якої дійшли світлові коливання, сама стає центром елементарних світлових хвиль. До кінця XIX століття результати багатьох фундаментальних оптичних і електромагнітних явищ, ефектів і дослідів однозначно підтвердили принципову неспроможність класичної ефірної хвильової теорії світла. Однак, незважаючи на це, класична ефірна хвильова теорія світла за певних припущень дозволяє виконувати багато завдань сучасної науки і техніки.

У 1865 році Максвелл (1831–1879) створив електромагнітну теорію світла, яка дала можливість розглядати хвилі як хвилі електромагнітні, яким властива певна енергія і які поширюються зі швидкістю світла.

У 1888 році німецький фізик Г. Герц (1857–1894) виявив електромагнітні хвилі і довів, що вони мають такі самі властивості як і світло. Вони відбиваються, заломлюються, інтерферують, дифрагують, поляризуються, мають таку саму швидкість поширення, як і світло. Електромагнітне поле почали розглядати як особливу форму матерії, яка існує поряд зі звичайним видом – речовиною. Так виникла електромагнітна теорія світла.

На початку XX століття німецький фізик М. Планк висунув теорію, за якою енергія електромагнітного випромінювання випускається і поглинається не безупинно, а дискретно, тобто окремими порціями – квантами. Теорія квантів була підтверджена численними дослідженнями. За допомогою квантів можна пояснити хімічні перетворення під дією світла, фотоефект, люмінесценцію. Однак ця теорія не може пояснити інтерференцію, дифракцію, поляризацію і багато інших явищ, які легко описуються за допомогою хвильової теорії.

До кінця XIX століття у фізиці остаточно утвердився механічний принцип відносності Галілея і пов'язане з ним поняття механічних інерційних систем відліку: в будь-яких інерційних, тобто таких, що рухаються без прискорення, системах усі механічні процеси відбуваються однаково. Водночас, накопичені дослідні дані підтверджували справедливність принципу відносності не лише для механічних, але й для всіх інших фізичних явищ. А. Ейнштейн

поклав в основу своєї теорії відносності два постулати: спеціальний принцип відносності, що є узагальненням механічного принципу відносності Галілея на будь-які фізичні явища (механічні, електричні, теплові), і принцип постійності швидкості світла у вакуумі (швидкість світла у вакуумі не залежить від руху джерела або спостерігача, тобто однакова в усіх інерційних системах і дорівнює  $3 \cdot 10^8$  м/с).

У 1908 році швейцарський фізик і математик Вальтер Рітц (1878–1909) створив балістичну (або емісійну) теорію. Балістична теорія ґрунтується на такій гіпотезі – усі елементарні заряди постійно випускають у всіх напрямках найдрібніші елементарні частинки (реони), що розлітаються зі швидкістю світла. Удари цих частинок об інші заряди і спричиняють електричний вплив.

Потоки реонів переносять світло, задаючи його швидкість. За теорією В. Рітца світло – це потік частинок, які викидає нерухоме джерело зі швидкістю  $C$ , а якщо джерело рухається, швидкість світла обчислюють як векторну суму швидкості джерела і швидкості викиду частинок  $C$ . Тому в балістичній теорії немає обмежень на надсвітлові швидкості.

У ХХ столітті проведено велику кількість теоретичних і експериментальних досліджень із вивчення поширення світла в просторі. У роботах М. І. Дупліцева 1981 року висвітлені результати експериментальних досліджень і описані закономірності явища випромінювання й поширення світла в просторі, що підтверджують правомірність корпускулярної (балістичної) теорії світла Ньютона-Рітца, і запропоновані такі висновки:

1. Швидкість поширення світла в просторі являє собою геометричну суму швидкості випромінювання світла щодо випромінювача і швидкості переносного руху джерела випромінювання в будь-якій інерційній системі.

2. Явища випромінювання – поширення світла в просторі узгоджуються з класичним Галілеївським механічним принципом відносності: у будь-якій інерційній системі відліку постійна швидкість руху джерела світла (випромінювача або відбивача), будучи переносною, не змінює напрямку но-

рмалі до фронту випромінювання.

3. Будь-яка фізична поверхня є самостійним джерелом випромінювання, незалежно від того, яким чином вона була збуджена.

Ту істину, що світло існує незалежно від нас, об'єктивно, не можна спростувати. Правильність нашого пізнання об'єктивного світу перевіряється практикою. Практика ж доводить, що світ, природа і світло, як її частина, існують об'єктивно, незалежно від нас, що наше пізнання правильно відображає властивості природи, бо на основі наших знань про природу ми можемо свідомо змінювати її.

Академік Сергій Іванович Вавилов (1891–1951), досліджуючи властивості світла, відкрив чимало закономірностей, не погодився з твердженням фізиків, що хвильові і корпускулярні властивості світла спостерігаються лише в різних дослідах (в показаннях різних приладів) і ніколи не спостерігаються разом в одному досліді. С. І. Вавилов стверджує, природа не роз'єднує, а об'єднує ці властивості в одному досліді. С. І. Вавилов вказує, що надзвичайно слабке світло одночасно виявляє як хвильові властивості, так і властивості частинок – фотонів. При потужному світловому потоці на його корпускулярні властивості ми не зважаємо, хоча вони й існують. Результати вивчення явищ дифракції або інтерференції засвідчують, що світло, яке існує незалежно від нас має хвильові властивості. А спостереження за фотоефектом, що існує незалежно від нас, вказують на те, що світлу притаманні не лише властивості хвиль, але й властивості частинок.

Немає світла як об'єкта, що існує незалежно від нас. Ми працюємо лише з показаннями приладів; в одних приладах ми насправді спостерігаємо хвильові явища, а в інших – корпускулярні.

Отже, на питання про те, що таке світло можна відповісти: *світло – це лише наше уявлення, фантазія, витвір нашої думки*. Цю фантазію ми будемо не довільно, а на основі показань приладів (точніше на основі нашого чуттєвого сприйняття показань цих приладів), які ми комбінуємо зручним для нас способом.

## 2.2. Системний підхід до проектування оптико-електронних систем

Основні принципи методології системного підходу проектування систем викладені в [21], [22]:

1. Принцип фізичності – будь-якій системі незалежно від її природи притаманні фізичні закони, що визначають внутрішні причиново-наслідкові зв'язки її існування і функціонування. Ніяких інших законів (крім фізичних) для пояснення дії оптико-електронних систем не потрібно.

2. Принцип модельованості – будь-який відклик оптико-електронної системи може бути поданий як кінцева множина описів, кожен з яких відтворює певну грань її сутності.

3. Принцип цілеспрямованості – функціональна тенденція, спрямована на досягнення системою заданої цільової функції.

На початкових етапах проектування оптико-електронних систем найбільш зручно застосовувати аналітичні моделі, що зв'язують в явному вигляді вхідні і вихідні параметри й характеристики оптико-електронних систем. На наступних етапах, включаючи конструювання, теоретичні й експериментальні дослідження, зручно використовувати імітаційні моделі як найбільш наочні з позиції оцінювання функціонування оптико-електронних систем.

Одним з етапів формування структури оптико-електронних систем є оптимізація – вибір властивостей систем і окремих її вузлів, що забезпечують задану якість функціонування оптико-електронних систем при певних обмеженнях, або локальна оптимізація, яка виконується не по всій сукупності показників якості об'єкта оптимізації, а по одному. Наприклад, у режимі виявлення за критерієм величини сигнал/шум.

При проектуванні оптико-електронних систем слід враховувати такі чинники, як *нестационарність* окремих параметрів системи, тобто *нестабільність* параметрів і характеристик окремих її вузлів і елементів, наприклад, оптичної ланки або фотоприймача (детально в Розділі 3 і Розділі 4).

В оптико-електронних системах виділяють оптичну, електронну та інші підсистеми. Такі структури розрізняються за характером відображальних властивостей, тобто за фізичною природою. Відповідний їм опис може бути виражений, наприклад, через спектр сигналу, просторово-частотні характеристик, динамічні характеристики.

Найбільш поширені моделі як вихідних сигналів, так і оптико-електронних систем у цілому, призначені, як правило, для виконання будь-якого конкретного завдання, що значно обмежує можливості використання для виконання нових завдань, що виникають на практиці. Труднощі створення єдиної математичної моделі, що дозволяє виконувати різнопланові завдання, здебільшого пояснюють великою варіативністю можливих ситуацій, в яких може працювати оптико-електронна система і які необхідно передбачити при описі алгоритму роботи системи.

Крім того, складання єдиної моделі вихідних і вхідних сигналів оптико-електронної системи, яка охоплює все різноманіття енергетичних, динамічних, геометричних та інших параметрів і характеристик джерел випромінювання, середовищ поширення оптичних сигналів і враховує вплив усіх елементів системи, є досить складним завданням.

У роботі [21] запропоновано основні етапи моделювання оптико-електронної системи. Розроблено комп'ютерну модель оптико-електронної системи, яка передбачає послідовне виконання чотирьох основних етапів, наведених на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – Етапи моделювання оптико-електронних систем

Аналітична модель оптико-електронної системи, ґрунтується на функціональному описі, виражає залежності, що існують між цільовою функцією (або показниками ефективності її реалізації), вхідними сигналами системи, внутрішніми параметрами структури системи, фазовими змінними структури системи, зовнішніми і вихідними параметрами в області функціонування. Область функціонування потрактовуємо як багатовимірний простір змінних, в якому працює система, і до яких належать, наприклад, система координат, довжина хвилі, час, стан поляризації тощо.

У роботі [21] модель оптико-електронної системи аналітично описується такою системою:

$$\left. \begin{aligned}
 d(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i) &= F_1(u(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i), v(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i), a(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i)) \\
 c(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i) &= F_2(u(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i), v(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i), d(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i), a(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i)) \\
 w(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i) &= \\
 &= F_3(u(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i), v(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i), d(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i), c(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i), a(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i))
 \end{aligned} \right\}$$

де  $d(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i)$ ,  $u(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i)$ ,  $c(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i)$ ,  $v(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i)$ ,  $a(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i)$ ,  $w(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i)$  – елементи масивів фазових змінних, що характеризують властивості, які змінюються в області функціонування структурних частин ОЕС ( $d$ ); вхідних сигналів ОЕС ( $u$ ); вихідних параметрів ( $c$ ); зовнішніх параметрів, що характеризують властивості зовнішнього середовища стосовно досліджуваного об'єкта середовища ( $v$ ); внутрішніх параметрів, що описують властивості структурних частин ОЕС ( $a$ ); показників ефективності в області функціонування ОЕС ( $w$ ), яка визначається параметрами:  $x,y,z$  – системою координат,  $\lambda$  – довжиною хвилі,  $t$  – часом,  $\varphi$  – станом поляризації, відповідно;  $F_1(\cdot)$ ,  $F_2(\cdot)$ ,  $F_3(\cdot)$  – оператори (аналітичні, алгоритмічні вирази), що описують зміни залежних і незалежних змінних і показників ефективності в області функціонування.

### 2.3. Узагальнена характеристика оптико-електронних систем

Структура оптико-електронної системи визначається завданнями, які виконують з її допомогою. Залежно від призначення і завдань, які виконує оптико-електронна система, до її складу можуть бути включені ті чи ті технічні пристрої, що приймають, перетворюють й обробляють сигнали, з метою найбільш ефективного, обґрунтованого прийняття рішення про наявність об'єкта спостереження в полі зору або значення параметрів сигналу.

Схема узагальненої оптико-електронної системи включає структурну схему оптичної системи, схему оптичного приймача, схему перетворення оп-

тичного сигналу на електричний сигнал, схему післядетекторного оброблення сигналу (рис. 2.2.).

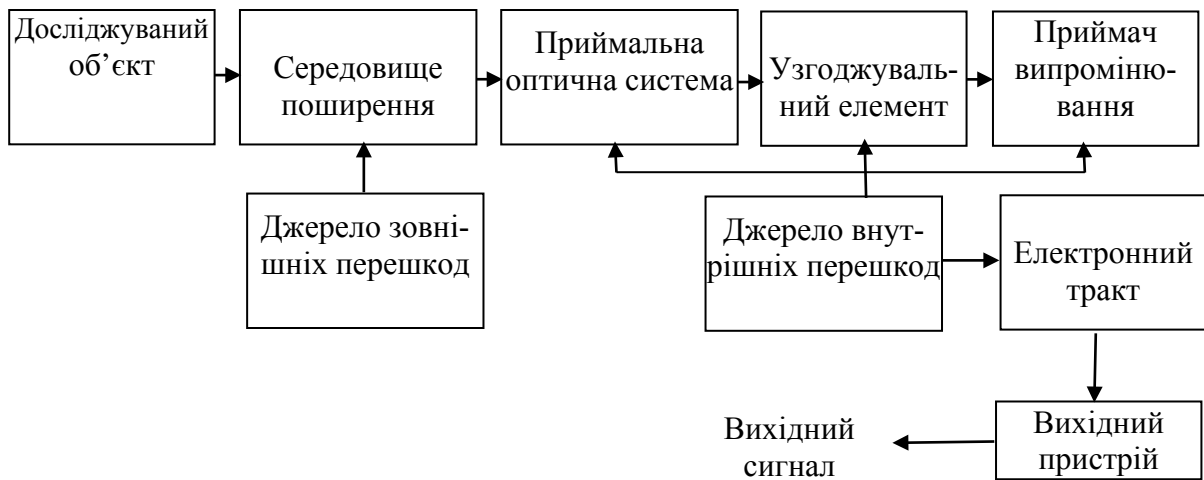


Рисунок 2.2 – Структурна схема узагальненої оптико-електронної системи

Оптичний сигнал у вигляді світлового поля або променя поширюється в каналі, збирається оптичною системою, детектується фотодетектором. Оптичне поле корисного сигналу викривлюється середовищем поширення, дифракційними й інтерференційними ефектами. На вхід оптичного приймача потрапляє фонове або шумове оптичне поле, зумовлене зовнішніми засвіченнями. У процесі перетворення в електронному тракті до адитивної суміші оптичних полів корисного і фонового випромінювання підсумовуються шуми оптичного приймача.

У роботах [22], [23] побудова оптико-електронних систем заснована на традиційних уявленнях радіотехніки, без застосування статистики теорії рішень.

Критерій якості системи має функціональний, а не статистичний характер, вплив шумових складових сигналу враховувався лише величиною відношення сигнал/шум. Основними особливостями загального статистичного підходу до теорії синтезу оптимальних систем є строгість математичного розв'язку і його достовірність та аналітичні вирази для розділення сигналів і

перешкод. У [24] передбачається, що джерело інформації генерує послідовність дискретних символів, обраних із кінцевого ансамблю, аналогові сигнали набувають дискретної форми за рахунок тимчасової дискретизації і квантування за амплітудою.

Статистична природа каналу виявляється в тому, що джерело інформації є стохастичним, а також кодування і модуляція (частотна, фазова і амплітудна) вносять свої випадкові помилки. При проходженні сигналів у каналі мультиплікативні збурення середовища ослаблюють випадковим чином корисний сигнал і спричиняють випадкові фазові затримки. У приймальній частині системи суміш зовнішнього фонового випромінювання і корисного сигналу адитивно комбінується з внутрішнім шумом приймача, викликаючи випадкову емісію фотоелектронів.

Сучасні моделі сигналів в оптико-електронних системах враховують фізичні і статистичні характеристики прийнятого оптичного поля. Теоретичні методи опису прийнятих оптичних сигналів створюються з позиції хвильової теорії [22] – [24] і корпускулярної теорії світла [13], [14], [25].

*Опис сигналів із позиції хвильової теорії світла.* У теорії оптико-електронних систем моделі оптичних сигналів ґрунтуються на фізичній теорії Максвелла, тобто впливають з електромагнітної теорії світла. Така модель добре описує реальні процеси за умови, що енергія оптичного сигналу не велика.

*Описи прийнятих оптичних сигналів із позиції корпускулярної теорії світла.* Основу моделі становить уявлення оптичного поля у вигляді потоку дискретних частинок адитивної суміші сигнальних і фонових фотонів. Чутливий елемент приймальної системи може бути по трактований як лічильник фотоіонізованих переходів, що еквівалентно енергетичному виявленню, яке ґрунтується на вимірюванні й фіксуванні елементарних порцій енергії, яку містить сигнал.

Багатоелементний фотоприймач телевізійної системи реєструє зображення контрольованої ділянки простору і перетворює отримуваний потік фотонів на просторово-часове розподілення зарядів всередині фоточутливого шару.

Якість математичної моделі сигналів і межі її застосування залежать від того, наскільки повно в ній враховані чинники, які характеризують умови спостереження та їхній вплив на параметри описуваних сигналів.

#### 2.4. Формування вихідного сигналу в оптико-електронних системах

На вхід оптико-електронної системи потрапляє вхідний сигнал  $x(t)$ , взаємодіє з елементами системи, вплив яких можна схарактеризувати передавальною функцією системи,  $h(t)$  формуючи вихідний сигнал  $y(t)$ . Це проілюстровано на рисунку 2.3.

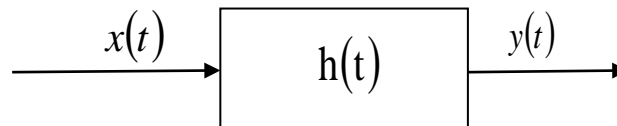


Рисунок 2.3 – Формування сигналу в оптико-електронних системах

Вхідні сигнали  $x(t)$  можна класифікувати як періодичні, несталі або випадкові. При описі сигналів у системах слід враховувати такі умови.

*Умова лінійності:* сумі двох сигналів на вході відповідає сума вихідних сигналів. Наприклад, при подвоєнні вхідного сигналу вихідний сигнал також подвоюється.

*Умова інваріантності:* форма вихідного сигналу не повинна змінюватися при зміщенні початку відліку на осі часу.

*Умова фізичної здійсненності:* реакція не може з'явитися доти, доки на вхід не подається сигнал. Таким чином забезпечується вилучення ефектів випередження.

*Умова стійкості:* будь-який кінцевий сигнал на вході системи дає кінцевий сигнал на її виході.

При поширенні оптичного випромінювання спостерігаються амплітудні та просторові ефекти, пов'язані з процесами поглинання й розсіяння ви-

промінювання. Амплітудні ефекти проявляються у вигляді тимчасових змін поля, що приводять в основному до зменшення потужності, флуктуації потужності і частотної фільтрації випромінювання. Просторові ефекти проявляються у вигляді змін напрямку променя або викривлення променя в напрямку, поперечному фронту.

*Амплітудні ефекти.* З позиції хвильової теорії при проектуванні оптичної системи обґрунтовано обирається значення оптичної частоти з метою максимального уникнення впливу спостережуваних просторових неоднорідностей. Втрати потужності випромінювання, зумовлені ефектами поглинання і розсіювання, можуть бути враховані на приймальному боці множенням значення прийнятої потужності на коефіцієнт передавання каналу:

$$Z_t = e^{-\alpha_t L},$$

де  $L$  – дальність поширення;

$\alpha_t$  – коефіцієнт втрат на одиницю довжини.

Коефіцієнт втрат  $\alpha_t$  представлений у вигляді суми коефіцієнтів поглинання  $\alpha_{\Pi}$  і розсіювання  $\alpha_p$  [22], [24], [31]:

$$\alpha_t = \alpha_{\Pi} + \alpha_p.$$

Коефіцієнт розсіювання  $\alpha_p$  враховує два типи розсіювання: розсіювання Релея – дифузне і Мі-розсіювання, викликане великими частинками, наприклад, краплями дощу, туманом або димом. Також можливі варіації амплітуди поля, зумовлені поляризаційними флуктуаціями.

Цей вираз дозволяє розрахувати середнє значення коефіцієнта втрат потужності сигналу. Однак розсіювання випромінювання частинками іноді характеризується миттєвими ефектами багатопроменевого поширення. Багатопроменево поширення спричиняє випадкове завмирання сигналу в приймачі.

Теоретичне дослідження поширення електромагнітних хвиль в атмосфері, яке здійснив С. М. Ритов на основі розв'язання хвильового рівняння методом теорії збурень, засвідчує, що в оптичному діапазоні хвиль нормоване посилення каналу задовольняє логарифмічно-нормальний розподіл. Густина

ймовірності  $G_c$  нормованого посилення має такий вигляд [31], [36]:

$$P_{G_c} = (1/\sqrt{2\pi}\sigma_1 G) \exp\left[\left(\ln G + \sigma_1^2\right)/2\sigma_1^2\right].$$

Густина ймовірності залежить від одного параметра  $\sigma_1^2$  – дисперсії логарифма від  $G_c$ .

Середнє значення визначається:

$$\bar{G}_c = e^{-\sigma_1^2/2}.$$

Дисперсія визначається:

$$D(G_c) = 1 - e^{-\sigma_1^2}.$$

Аналіз зв'язку параметра  $\sigma_1^2$  з характеристиками атмосфери через складну залежність великої кількості різних параметрів – довжини хвилі, довжини шляху поширення, розмірів розсіюваних частинок – є досить непростим завданням.

Додатково до такого ослаблення при поширенні оптичного випромінювання можуть спостерігатися тимчасові варіації поля, що призводить до нелінійних фазових затримок. Причиною цього є зміни коефіцієнта заломлення середовища зі зміною довжини хвилі, що спричиняє варіації часу поширення коливань модульовальних частот (тобто спостерігаються тимчасові затримки).

*Просторові ефекти.* Розсіювання оптичного поля частинками призводить до просторових ефектів у промені. Просторові ефекти поділяють на дві категорії: такі, що слабо розсіюють, і такі, що сильно розсіюють. Ефекти зі слабим розсіюванням зміщують промінь, зберігаючи незмінною структуру фронту променя. Сильне розсіювання викликає просторове викривлення про-

меня. При слабкому розсіюванні відбувається розфокусування променя середовищем, що спричиняє блукання променя; нахилу фронту хвилі; розмивання променя (ширина променя збільшується, послаблюється його потужність).

Сильне розсіювання виявляється у тих випадках, коли частинки середовища особливо щільні, а діаметр променя значно більший за поперечний перерізу домішкових включень у середовищі. Кожна частинка діє як окремий і незалежний розсіювач для різних точок фронту променя. Це призводить до багаторазового розсіювання і розфокусування різних областей променя. Сукупним результатом є повне руйнування хвильового фронту променя на трасі поширення. Оскільки розташування, переміщення і концентрація розсіювачів випадкові, то й викривлення променя стохастичне.

## 2.5. Вихідний сигнал оптико-електронних систем – стохастичний процес

Схематичне зображення фрагмента рядка кадру в оптико-електронних системах наведено на рис. 2.4.

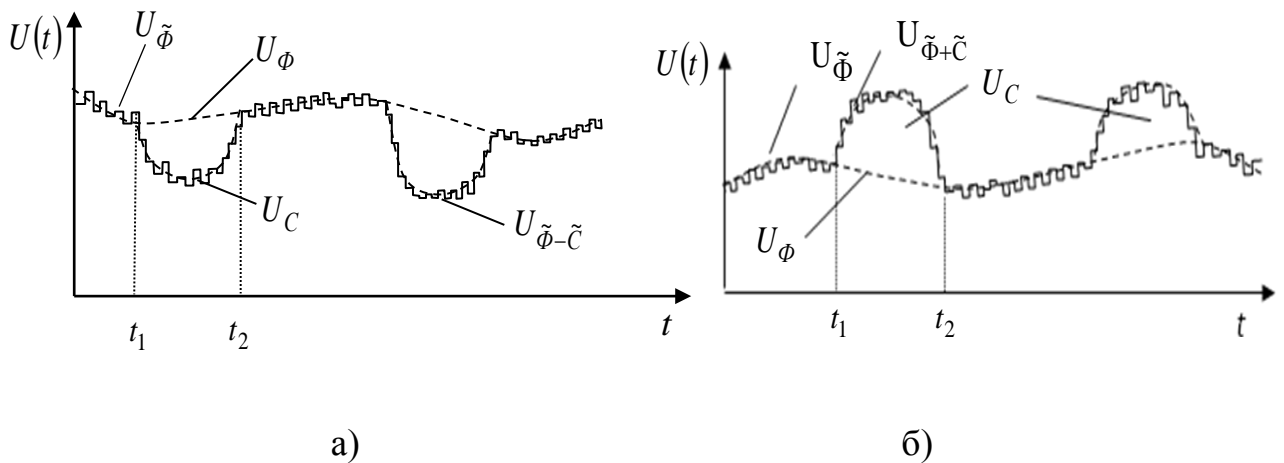


Рисунок 2.4 – Вихідний сигнал в оптико-електронних системах

а) при спостереженні об'єктів, які поглинають випромінювання;

б) при спостереженні випромінювання, відбитого від об'єктів.

$U_{\Phi}$  – фонові складова, яка змінюється в просторі (матриці ПЗЗ);

$U_C$  – сигнальна складова (постійна в часі і змінюється в просторі);

$U_{\tilde{\Phi}}$  – флуктуаційна складова фону (що змінюється в часі і просторі);

$U_{\tilde{C}}$  – флуктуаційна складова сигналу (що змінюється в часі і просторі).

Як видно із рис. 2.4, якість інформації про спостережувані об'єкти залежить як від низькочастотної  $U_{\Phi}$  (тобто повільно змінюваної в просторі), так і від флуктуацій високочастотних шуму  $U_{\tilde{\Phi}}$  і сигналу  $U_{\tilde{C}}$ . Низькочастотна складова може бути зумовлена, наприклад, нерівномірністю освітленості сцени. Високочастотні складові шуму і сигналу можуть бути зумовлені квантовою природою потоку випромінювання і внутрішніми шумами фотоприймача.

Флуктуаційні складові  $U_{\tilde{\Phi}}$  і  $U_{\tilde{C}}$  можна описувати згідно з теорією помилок:

$$X = a + \Delta$$

де  $a$  – досліджувана величина;

$\Delta$  – випадкова помилка.

При прийманні оптичного випромінювання, впливом флуктуаційної складової знехтувати неможливо, однак при збільшенні часу накопичення (інтенсивності вхідного випромінювання) обчислюється середнє арифметичне виміряних величин  $X_1 \dots X_n$  і:

$$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_j = a + \Delta_n,$$

де  $\Delta_n$  – залежна від кількості повторних вимірювань  $n$  випадкова помилка, яка при великих  $n$ , відповідно до закону великих чисел відповідає гауссовий закон розподілу.

За центральною граничною теоремою випадкові величини  $X_j$  незалежні, однаково розподілені із середнім значенням  $\langle x \rangle = a$  і дисперсією  $\sigma^2 < \infty$ .

Тоді відповідно до [15], [35]:

$$\frac{\sum_{j=1}^n X_j - na}{\sqrt{n\sigma}} \sim G,$$

де  $G$  – випадкова величина зі стандартною гауссовою щільністю розподілу:

$$P_G(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right).$$

Вхідний потік можна вважати випадковим процесом. Процес реєстрації оптичного випромінювання можна пояснити як стохастичний процес і процес релаксації при встановленні параметрів системи, наприклад, вибору часу експозиції.

Характеристики полів яскравості природних фонів дуже різні, практично їх неможливо описати точними математичними співвідношеннями, тому прийнято вважати параметри сигнальних і фонових складових випадковими й описувати їх статистично.

Система являє собою поєднання нелінійних безінерційних та інерційних елементів із лінійними елементами. Це значно ускладнює виявлення статистичних характеристик випадкового сигналу на виході всієї системи.

При аналізі перетворення випадкового процесу нелінійним елементом постає таке завдання: визначити статистичні характеристики процесу на виході  $S_{\text{вих}}(t)$ , що впливають із припущення відомих параметрів елемента і статистичних характеристик вхідного випадкового процесу  $S_{\text{вх}}(t)$ . Якщо відома густина ймовірності  $P(S_{\text{вх}})$  випадкової величини  $S_{\text{вх}}$ , необхідно знайти густину ймовірності  $P(S_{\text{вих}})$  вихідної величини. Зв'язок між  $S_{\text{вх}}$  і  $S_{\text{вих}}$  можна задати як детермінованою, так і випадкової залежністю відповідно:

$$S_{\text{вих}} = \psi(S_{\text{вх}}),$$

$$S_{\text{вих}} = \xi(S_{\text{вх}}).$$

Якщо  $\psi(S_{\text{вх}})$  визначає однозначну відповідність між  $S_{\text{вх}}$  і  $S_{\text{вих}}$  у кож-

ний даний момент часу незалежно від значень  $S_{\text{вх}}$  у попередні моменти часу, то  $S_{\text{вих}} = \psi(S_{\text{вх}})$  і ймовірності подій на вході і виході дорівнюють:

$$P(S_{\text{вх}})dS_{\text{вх}} = P(S_{\text{вих}})dS_{\text{вих}}.$$

На практиці значного поширення набув підхід щодо виконання завдання оптимального виявлення оптичних сигналів. Прийнято вважати, що квантова природа оптичного сигналу і квантового характеру взаємодії світла з фотоприймачем мають однакові закони розподілу, тобто квантів оптичного сигналу і квантових переходів. Тому квантова природа оптичного сигналу враховується в характеристиках вихідного струму фотоприймача.

Оброблення оптичних полів до фотоприймача і електричних сигналів після нього оптимізується окремо. Оптичні системи, які перетворюють прийнятий світловий потік, не пов'язаний із формуванням зображення, за своїми функціями часто аналогічні спрямованим антенам радіодіапазону. Оптичні системи можуть підвищувати густину енергії приймального сигналу, польові діафрагми в системах обмежують поле зору оптико-електронних пристроїв.

Фотодетектори, які реагують на кожний окремий квант світла уможливають дослідження корпускулярного характеру оптичних полів. Однак сучасні фотодетектори чутливі тільки до обмеженої кількості фотонів і характеризуються інерцією, тому вимірюється лише інтенсивність, усереднена за порівняно великим проміжкам часу. Подальший розвиток детекторів дозволить визначати більш тонкі характеристики і вимірювати ймовірності знаходження квантів у будь-якій сукупності точок простору в довільні моменти часу.

Кількість фотонів, яке фотодетектор зареєструє в будь-який інтервал часу, флюктує випадковим чином. Характер флюктуацій біля свого середнього значення знаходять, коли відома функція розподілу функції і її моменти.

На сьогодні відомі роботи [27] – [31], в яких розглядаються властивості оптичних сигналів і встановлюється взаємозв'язок між характеристиками вхідних і вихідних сигналів.

## 2.6. Статистичні характеристики сигналів на виході фотоприймача

Відповідно до корпускулярної теорії вхідний сигнал розглядають як потік дискретних частинок. Згідно з прийнятими математичними моделями в [9], [13], [14], [31] – [33] потік дискретних частинок описаний за допомогою пуассонівського закону розподілу.

Інтенсивність потоку або ймовірність інтенсивності потоку подій  $\lambda$  має розмірність, яка обернена часу. Позначимо через  $N_{t,t+h}$  випадкову величину, яка визначається як число подій, що відбуваються в інтервалі  $t, t+h$ , де  $h > 0$ . Пуассонівський процес інтенсивності  $\lambda$  визначається:

$$P\{N_{t,t+h} = 0\} = 1 - \lambda h + o(h) \text{ при } h \rightarrow 0$$

$$P\{N_{t,t+h} = 1\} = \lambda h + o(h) \text{ при } h \rightarrow 0.$$

Випадкова величина  $N_{t,t+h}$  статистично не залежить від числа і розташування подій в інтервалі  $(0, t)$ . Це рівняння повинно розв'язуватися для всіх  $t, h > 0$ . Із рівностей випливає, що

$$P\{N_{t,t+h} \geq 2\} = o(h) \text{ при } h \rightarrow 0$$

Основними властивостями, які визначають пуассонівський процес, є [15], [16], [34] – [36]:

1. Імовірність не змінюється з часом, тому відповідна послідовність не має тренду.
2. Імовірність одночасного настання двох чи більше подій дуже мала.
3. Імовірність настання події в інтервалі  $(t, t+h)$  абсолютно не залежить від того, що сталося до моменту  $t$ ; зокрема, вона не залежить від часу, що минув із моменту настання попередньої події.

Таким чином, для того щоб число реалізацій події залежало від цього закону, достатньо, щоб ці реалізації були незалежними протягом інтервалів

часу, що не перекриваються, і щоб для будь-якого дуже малого інтервалу часу ймовірність здійснення події була дуже мала.

Для визначеності як квантові переходи будемо розглядати моменти формування фотоелектронів.

Уведемо такі позначення:

$\mu(t)$  – інтенсивність потоку фотоелектронів (середнє число фотоелектронів, сформованих за одиницю часу);

$\bar{n}$  – середнє число фотоелектронів, сформованих на інтервалі  $\tau$ .

Ці величини пов'язані співвідношенням:

$$\bar{n} = \int_0^{\tau} \mu(t) dt .$$

Інтенсивність потоку фотоелектронів пропорційна інтенсивності світлового потоку, тобто  $\mu(t) \sim I(t)$ . Через квантову природу сигналу і квантовий характер взаємодії світла з фотоприймачем моменти формування фотоелектронів і число фотоелектронів сформованих за час  $\tau$  будуть випадковими. Відповідно до положень квантової механіки, ймовірність формування фотоелектрону на малому інтервалі часу пропорційна тривалості цього інтервалу й інтенсивності сигналу  $I(t)$ . Тому характеристики сигналів на виході фотоприймача визначаються з урахуванням тимчасової залежності інтенсивності світлового потоку [14].

### 2.6.1. Характеристики сигналу при постійній інтенсивності світлового потоку

Якщо інтенсивність світлового сигналу на вході фотоприймача незмінна (не флюктує) в часі  $I(t) = I_0$ , то ймовірність формування фотоелектронів на інтервалі  $\tau$  залежить тільки від його тривалості і не залежить від розташування інтервалу на тимчасовій осі. Такий потік фотоелектронів можна вважа-

ти стаціонарним. Наступні моменти формування фотоелектронів не залежать від попередніх (відсутність післядії). У цьому випадку розподіл числа електронів  $n$  на інтервалі будь-якої тривалості описується законом Пуассона [13], [14], [25], [31], [32]:

$$P(n) = \frac{\bar{n}^n}{n!} e^{-\bar{n}}, \quad (2.1)$$

де  $P(n)$  – імовірність вильоту  $n$  фотоелектронів на інтервалі  $\tau$ .

Математичне сподівання числа фотоелектронів на інтервалі

$$M(n) = \sum_{n=0}^{\infty} n P(n) = \bar{n}.$$

Дисперсія числа вильотів фотоелектронів

$$\sigma^2 = \langle (n - \bar{n})^2 \rangle = \sum_{n=0}^{\infty} (n - \bar{n})^2 P(n) = \bar{n}.$$

Дисперсія і математичне сподівання дорівнюють середньому числу фотоелектронів на інтервалі спостереження. Окрім стаціонарності й відсутності післядії, пуассонівський потік характеризується ординарністю (проходженням фотоелектронів поодиночі, а не парами або трійками).

Важливою властивістю закону Пуассона є те, що сума  $N$  процесів із пуассонівськими розподілами є також пуассонівським процесом із середнім значенням, що дорівнює сумі середніх значень  $N$  процесів [35], [36].

При  $n \gg 10$  розподіл Пуассона добре апроксимується нормальним законом розподілу [15], [16], [35]:

$$P(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi n}} e^{-\frac{(n - \bar{n})^2}{2n}}. \quad (2.2)$$

### 2.6.2. Характеристики сигналу при випадкових флуктуаціях інтенсивності світлового потоку

Розглянемо випадок, коли  $\mu(t)$  є випадковою функцією, що спостерігається при флуктуаціях світлового потоку, який потрапляє на вхід фотоприймача. При цьому ймовірність появи фотоелектрону на малому інтервалі спостереження (експозиції)  $\tau$  буде залежати від величини  $\mu(t)$ , тобто буде змінюватися в часі випадковим чином.

Для більш зручного опису введемо нормовану випадкову функцію  $\xi(t)$ , таку, що  $\mu(t) = \xi(t)\bar{\mu}$ , де:

$$\bar{\mu} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \mu(t) dt,$$

$$\bar{\xi} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \xi(t) dt = 1.$$

Випадкову функцію  $\xi(t)$  можна схарактеризувати інтервалом корекції  $\tau_K$ . Від співвідношення інтервалів  $\tau$  і  $\tau_K$  залежать статистичні характеристики сигналу на виході фотоприймача.

Якщо час спостереження (тривалість реалізації)  $\tau \ll \tau_K$ , то на цьому інтервалі значення  $\xi(t)$  можна вважати постійним і не залежним від часу. Середнє число фотоелектронів на інтервалі спостереження  $\tau$  буде дорівнювати  $n_1 = \xi \bar{n}$ , де  $\bar{n} = \bar{\mu} \tau$ .

Розподіл фотоелектронів на інтервалі при фіксованому значенні  $\xi$  відповідає розподілу Пуассона:

$$P(n/\xi) = \frac{(\xi \bar{n})^n}{n!} e^{-\xi \bar{n}}. \quad (2.3)$$

Для того щоб знайти розподіл  $P(n)$ , необхідно усереднити спільний розподіл  $n$  і  $\xi P(n, \xi)$  по  $\xi$ . При цьому:

$$P(n, \xi) = P(n / \xi)P(\xi).$$

Відклик сигналу, відбитого від об'єкта, і фону на вході приймача має нормальні флуктуації. Це відбувається внаслідок того, що сигнал від об'єкта створюється в результаті інтерференції статистично незалежних полів, відбитих від великої кількості «блискучих точок» розсіювальної поверхні. Фонове випромінювання також створюється великою кількістю випадково розташованих розсіювачів (частинок). При нормальних флуктуаціях напруженості миттєва інтенсивність сигналу, а отже, й інтенсивність потоку фотоелектронів, які характеризуються величиною  $\xi$ , флуктує за експоненціальним законом:

$$P(\xi) = e^{-\xi}. \quad (2.4)$$

Із (2.3) і (2.4) отримаємо

$$\begin{aligned} P(n) &= \int_0^{\infty} P(n / \xi)P(\xi)d\xi = \\ &= \int_0^{\infty} \frac{(\xi \bar{n})^n}{n!} e^{-\xi \bar{n}} e^{-\xi} d\xi = \frac{1}{n+1} \left( \frac{\bar{n}}{n+1} \right)^n. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Такий розподіл називається геометричним, або розподілом Бозе-Ейнштейна. Математичне сподівання цього розподілу  $M(n) = \bar{n}$ , а дисперсія:

$$\sigma^2 = \bar{n} (1 + \bar{n}) \quad (2.6)$$

Інший практично важливий випадок трапляється, коли час спостереження  $\tau \gg \tau_K$ . Значення інтенсивності потоку електронів  $\mu(t)$  через інтервали часу

$\Delta t \gg \tau_K$  статистично незалежні. Якщо розбити час спостереження  $\tau$  на  $m = \frac{\tau}{\tau_K}$

інтервалів, то на кожному інтервалі матимемо розподіл  $P(n)$ , що підпорядковується закону Бозе-Ейнштейна із середнім значенням  $\bar{n}_m = \bar{\mu}\tau_K = \bar{n}/m$ . За інтервал  $\tau$  відбувається додавання  $m$  статистично незалежних величин, кожна з яких має розподіл Бозе-Ейнштейна. При цьому переходимо до негативного біноміального розподілу:

$$P(n) = \frac{(m+n-1)!}{(m-1)!n!} \left( \frac{\bar{n}_m}{\bar{n}_m+1} \right)^n \cdot \left( \frac{1}{\bar{n}_m+1} \right)^m. \quad (2.7)$$

Математичне сподівання цього розподілу дорівнює середньому числу фотоелектронів, що вилітають за інтервал  $\tau$ :

$$M(n) = \bar{n} = \bar{n}_m \cdot m,$$

а дисперсія

$$\sigma^2 = \bar{n} \left( 1 + \frac{\bar{n}}{m} \right). \quad (2.8)$$

### 2.6.3. Характеристики сигналу при детермінованій зміні інтенсивності світлового потоку

Розглянемо випадок, коли інтенсивність оптичного випромінювання на вході фотоприймача  $I(t)$  змінюється за певним законом (при змінюванні орієнтації об'єкта, при прийманні імпульсних сигналів тощо). Пропорційно  $I(t)$  змінюється й інтенсивність потоку фотоелектронів  $\mu(t)$ . Спостережувана реалізація вихідного струму фотоприймача відповідає послідовності формування фотоелектронів. Для врахування детермінованої зміни  $\mu(t)$  необхідно послідовність формування фотоелектронів характеризувати не тільки їхнім числом  $n$ , а й фіксованими моментами формування  $(t_1, t_2, \dots, t_n)$ . Для ансамб-

лю реалізацій вихідного сигналу фотоприймача при повторюваному змінюванні інтенсивності світлового потоку можна ввести багатовимірну умовну густину ймовірності моментів  $n$  незалежних фотоелектронів, яка зводиться до множення одновимірних густин ймовірності:

$$P(t_1, t_2, \dots, t_n / n) = \prod_{i=1}^n P(t_i / n). \quad (2.9)$$

Густини ймовірності  $P(t_i / n)$  пропорційні інтенсивності потоку фотоелектронів у момент спостереження  $\mu(t_i)$ , тобто можна записати  $P(t_i / n) = c\mu(t_i)$ .

Коефіцієнт  $c$  визначається з умови нормування, при якому ймовірність формування  $i$ -го фотоелектрону за час спостереження  $\tau$   $P(t_i, \tau) = 1$ .

$$\text{Оскільки } P(t_i, \tau) = \int_0^{\tau} P(t) dt = c \int_0^{\tau} \mu(t) dt = \bar{n}, \text{ то } c = 1 / \bar{n}$$

і, отже,

$$P(t_i / n) = \frac{\mu(t_i)}{\bar{n}}. \quad (2.10)$$

Спільна щільність числа  $n$  і зазначених моментів формування фотоелектронів дорівнює множенню багатовимірної умовної густини ймовірності моментів формування  $n$  фотоелектронів на ймовірність формування  $n$  фотоелектронів:

$$P(t_1, t_2, \dots, t_n) = P(t_1, t_2, \dots, t_n / n) \cdot P(n).$$

Підставляючи (2.1) в (2.10), отримаємо

$$P(t_1, t_2, \dots, t_n) = \frac{e^{-\bar{n}}}{n!} \prod_{i=1}^n \mu(t_i). \quad (2.11)$$

Отриманий пуассонівський розподіл потоку фотоелектронів у зміненому вигляді для випадку детермінованої зміни інтенсивності світлового потоку використовується при синтезі алгоритмів оптимального виявлення за умови некогерентного фотодетектування оптичних сигналів.

#### 2.6.4. Статистичні властивості реальних сигналів і перешкод на виході фотоприймача

Статистичні властивості вхідних сигналів достатньо повно описуються розглянутими моделями. При дифузному відображенні сигналу відбувається руйнування його тимчасової і просторової когерентності. Реєстрована реалізація буде складатися з  $m_\tau$  тимчасових і  $m_\rho$  просторових статистично незалежних вибірок. Немонохроматичність реального випромінювання і геометричні розміри об'єкта спостереження спричиняють виділення в реалізації  $m_f$  частотно незалежних вибірок. Загальна кількість статистично незалежних вибірок у реалізації  $m = m_\tau \cdot m_\rho \cdot m_f$ . Тому розподіл приймального сигналу, є негативно-біноміальним.

Оскільки при великих значеннях інтенсивності зовнішнього освітлення  $m \gg 1$ , а при виконанні завдань виявлення, значення інтенсивності сигналу мале, при цьому  $\bar{n}_m \ll 1$ , то розподіл його зводиться до пуассонівського. Розподіл складової вихідного сигналу фотоприймача, зумовлений зовнішньою перешкодою, при строгому теоретичному описі слід вважати негативно-біноміальним. Реально ж інтенсивність її така, що середнє число перешкодових квантових переходів у фотоприймачі, що припадають на інтервал кореляції фонового випромінювання,  $\bar{n}_m \ll 1$ . Тому їхній розподіл можна вважати пуассонівським.

Поява темнових імпульсів рівноймовірна в будь-який інтервал часу, тому їхній розподіл відповідає закону Пуассона. Але для приймачів із внутрішнім фотоефектом через великі власні шуми можна знехтувати квантовою

структурою сигналу і перешкод, оскільки при цьому пуассонівські розподіли наближаються до нормальних [15], [16].

2.7. Опис процесу формування вихідного сигналу оптико-електронної системи на основі корпускулярної теорії

Модель формування вихідного сигналу можна схарактеризувати, ґрунтуючись на підходах, описаних у [9], [13], [14], [32], й використовуючи положення геометричної оптики і корпускулярної теорії. Потік фонів від слабого некогерентного джерела має три властивості – стаціонарність, ординарність і відсутність післядії, отже, він є пуассонівським. Статистичні параметри математичне сподівання і дисперсія випадкової величини, розподіленої за законом Пуассона, відповідно до виразу (2.1), рівні між собою і визначаються параметром розподілу:

$$m_1 = \mu_2 = \lambda. \quad (2.12)$$

Густина ймовірності тимчасових інтервалів між сусідніми точками в пуассонівському потоці є експоненціальною:

$$p(\tau) = \lambda e^{-\lambda\tau}. \quad (2.13)$$

Середнє значення і дисперсія інтервалів між точками дорівнює:

$$M(\tau_k) = \frac{1}{\lambda}; D(\tau_k) = \frac{1}{\lambda^2}. \quad (2.14)$$

Для визначення статистичних характеристик стохастичних потоків, що визначають як потік, сформований сигналом, так і сформований фоном, розглянемо процес перетворення стохастичного сигналу середовищем поширення та елементами оптико-електронної системи.

Етапи процесу формування зображення наведені на рис. 2.5. Шлях по-

ширення випромінювання розбитий на області, у кожній з яких взаємодію світла з речовиною можна описати за допомогою одного механізму. При взаємодії світлового потоку  $\xi(t)$  з середовищем (як проаналізовано в п. 2.4) виявляються амплітудні і просторові ефекти, що визначаються явищами поглинання, випромінювання, відбиття і пропускання квантів. Наступною областю поширення випромінювання є об'єкт спостереження. Залежно від енергетичних характеристик об'єктів (як проаналізовано в п. 2.5) також виявляються явища поглинання, випромінювання, відбиття і пропускання квантів. Далі світловий потік взаємодіє з оптичною ланкою, яка характеризується параметрами, розглянутими в п. 1.2: діаметром вхідної зіниці оптичної системи; фокусною відстанню оптичної системи; коефіцієнтом аберацій; коефіцієнтом пропуску світлового потоку; коефіцієнтом поглинання нейтральних фільтрів (НФ)  $k \geq 1$ .

Потім світловий потік взаємодіє з фотоприймачем, що характеризується (згідно з п. 1.2): розміром елемента розподілення (розрізнення); коефіцієнтом квантової ефективності  $q$ ; тривалістю кадру  $T_k$ . Зображення, сформоване потоком  $\xi(t)$ , являє собою імпульси, енергетичний рівень яких визначається адитивною сумішшю сигнальної і фонові компонент. Поетапний розгляд формування вихідного сигналу оптико-електронних систем уможливить визначення параметрів, які характеризують сигнал  $\xi_{c+п}(t)$  і перешкоду  $\xi_{п}(t)$ .

Світловий потік  $\xi_0(t)$  характеризується середнім значенням  $\bar{N}_0$  – кількість фотонів за одиницю часу:

$$\bar{N}_0 = \frac{P_{\text{вип}}}{h\nu}, \quad (2.15)$$

де  $P_{\text{вип}0}$  – щільність потоку випромінювання, що припав на одиничну площу  $S$ ;

$h\nu$  – енергія кванту світла.

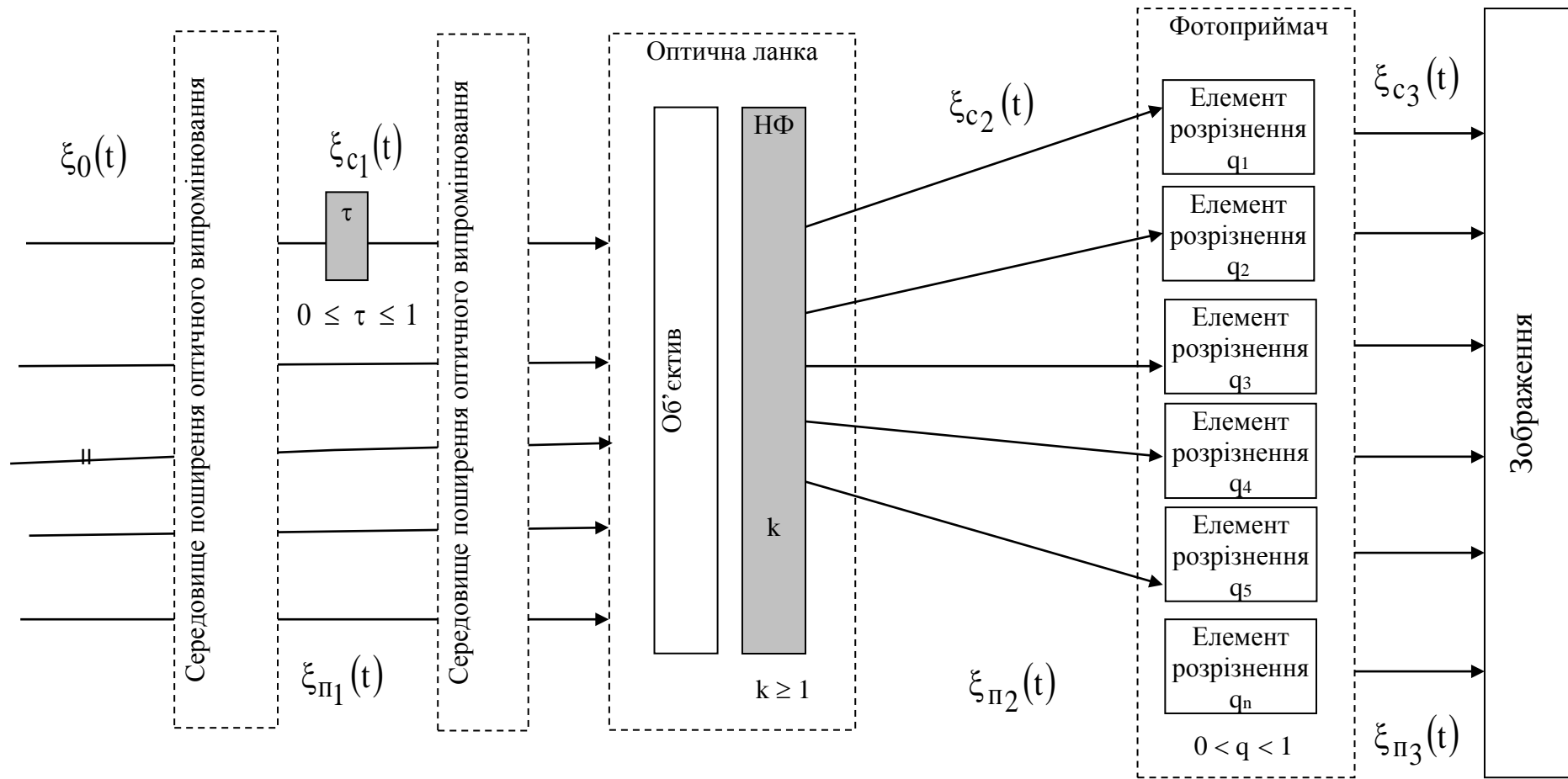


Рисунок 2.5 – Схема формування зображення в оптико-електронних системах

Розглянемо проходження потоку фотонів. Подамо реалізацію потік фотонів як сукупність точок на осі часу (рис. 2.6, а). Реалізація потоку на виході області взаємодії з середовищем поширення наведена на рис. 2.6, б. З урахуванням явищ поглинання, випромінювання, відбиття і пропускання квантів, вихідний випадковий потік фотонів характеризується зміненою кількістю фотонів (подій). Інтервали між точками розподілені за експоненціальним законом.

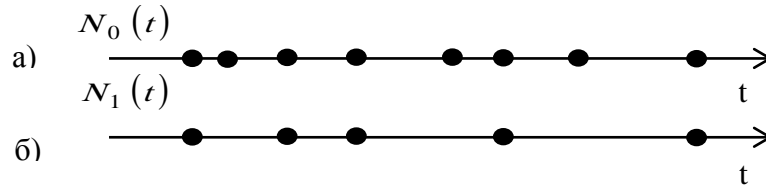


Рисунок 2.6 – Реалізації випадкових потоків

Потік  $\xi(t)$ , проходячи через середовище поширення  $\tau_{cp}$  і об'єкт спостереження  $\tau_{об}$ , послаблюється імовірнісним чином і реалізація потоку  $N_{c1}(t)$  не дорівнює реалізації вхідного потоку  $N_0(t)$ , послабленого в  $1/\tau_{\Sigma}$  разів:

$$N_{c1}(t) \neq N_0(t)\tau_{\Sigma}. \quad (2.16)$$

Однак для середніх значень цих потоків буде дійсним таке рівняння:

$$\bar{N}_{c1} = \bar{N}_0\tau_{\Sigma}. \quad (2.17)$$

Після проходження оптичної ланки, світловий потік  $\xi_{c2}(t)$  можна визначити:

$$\xi_{c2}(t) = \xi_{c1}(t) \frac{1}{k \cdot \tau_{омт} \cdot k_{аб}} = \frac{\xi_0(t)\tau_{\Sigma}}{k \cdot \tau_{омт} \cdot k_{аб}}, \quad (2.18)$$

де  $\tau_{\text{омт}}$  і  $k_{\text{аб}}$  – коефіцієнти аберацій і пропускання оптико-механічного тракту;

$k$  – детермінований коефіцієнт послаблення оптичної ланки.

Для реалізації потоку  $N_{c2}(t)$  і середнього значення  $\bar{N}_{c2}$  справедливі співвідношення:

$$N_{c2}(t) \neq \frac{N_0(t)\tau_{\Sigma}}{k \cdot \tau_{\text{омт}} \cdot k_{\text{аб}}}, \quad (2.19)$$

$$\bar{N}_{c2} = \frac{\bar{N}_0\tau_{\Sigma}}{k \cdot \tau_{\text{омт}} \cdot k_{\text{аб}}}. \quad (2.20)$$

На фотокатод елементарного фотоприймача з площею фотокатода  $S_{\text{пр}}$  падає потік квантів світла, який перетворюється фотоприймачем з квантовою ефективністю  $S_{\lambda}$  на потік електронів  $\xi_{c3}(t)$ , що дорівнює:

$$\xi_{c3}(t) = \xi_{c2}(t)S_{\lambda}S_{\text{пр}}. \quad (2.21)$$

Використовуючи вираз (2.18), отримаємо:

$$\xi_{c3}(t) = \frac{\xi_0(t)\tau_{\Sigma}}{k \cdot \tau_{\text{омт}} \cdot k_{\text{аб}}} S_{\lambda}S_{\text{пр}}. \quad (2.22)$$

Аналогічно (2.16) і (2.19) для реалізації потоку зарядів у фотоприймачі запишемо:

$$N_{c3}(t) \neq \frac{N_0(t)\tau_{\Sigma}}{k \cdot \tau_{\text{омт}} \cdot k_{\text{аб}}} S_{\lambda}S_{\text{пр}}, \quad (2.23)$$

й аналогічно (2.17) і (2.20) для середнього значення потоку зарядів запишемо

$$\bar{N}_{c3} = \frac{\bar{N}_0 \tau_\Sigma}{k \cdot \tau_{\text{омт}} \cdot k_{\text{аб}}} S_\lambda S_{\text{пр}}. \quad (2.24)$$

Оскільки фотоприймач характеризується часом накопичення  $T_{\text{н}} = T_{\text{к}}$   $T_{\text{н}} = T_{\text{к}}$ , то зареєстрована кількість імпульсів  $N_{c4}(nT_{\text{к}})$  можна визначити:

$$N_{c4}(nT_{\text{к}}) = \sum_{(n-1)T_{\text{к}}}^{nT_{\text{к}}} N_{c3}(t), \quad (2.25)$$

де символ  $\sum_{(n-1)T_{\text{к}}}^{nT_{\text{к}}}$  означає підсумовування потоку імпульсів на інтервалі  $T_{\text{к}}$ ;

$n$  – номер телевізійного кадру.

Таким чином, вираз для середнього значення вихідного потоку  $\bar{\xi}_{c_{\text{аб}}}$

можна записати:

$$\bar{\xi}_{c_{\text{вих}}} = \bar{N}_{c_{\text{вих}}} = \frac{P_{\text{вип}}}{h\nu} \frac{\tau_\Sigma}{k \cdot \tau_{\text{омт}} \cdot k_{\text{аб}}} S_\lambda S_{\text{пр}} T_{\text{к}}. \quad (2.26)$$

При формуванні потоку, що не взаємодіє з об'єктом спостереження, вираження для визначення його середнього значення, аналогічно до попереднього викладеного, можна записати:

$$\bar{\xi}_{\text{пвих}} = \bar{N}_{\text{пвих}} = \frac{P_{\text{вип}}}{h\nu} \frac{\tau_{\text{об}}}{k \cdot \tau_{\text{омт}} \cdot k_{\text{аб}}} S_\lambda S_{\text{пр}} T_{\text{н}}. \quad (2.27)$$

При формуванні відклику фотоприймача під час спостереження прозорих об'єктів інтенсивність, сформована сигнальними фотонами в елементах розділення (розрізнення) фотоприймача буде меншою за інтенсивність, сформовану фоновими фотонами. Відповідно середнє значення вислідного потоку  $\bar{\xi}_{\text{вис}}$  можна визначити:

$$\bar{\xi}_{\text{вис}} = \bar{N}_{\text{вис}} = \bar{N}_{\text{пвих}} - \bar{N}_{c_{\text{вих}}} = \bar{N}_0 \frac{S_\lambda S_{\text{пр}}}{k \cdot \tau_{\text{омт}} \cdot k_{\text{аб}}} T_{\text{к}} (1 - \tau_{\text{об}}). \quad (2.28)$$

Знайдемо вираз для закону розподілу випадкової величини  $\xi_{\text{рез}}(nT_K)$ . Випадкова величина  $\xi_{\text{вис}}(nT_K)$  є різницею випадкових величин  $\xi_{\text{ПВІХ}}(nT_K)$  і  $\xi_{\text{СВІХ}}(nT_K)$ , кожна з яких розподілена за законом Пуассона. Закон розподілу для різниці незалежних випадкових величин, що мають пуассонівський розподіл із параметрами  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$ , визначається виразом [23]:

$$p(\eta = n) = \begin{cases} e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)} I_0(2\sqrt{\lambda_1 \lambda_2}), & \text{при } n = 0, \\ e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)} \left[ \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{\frac{n}{2}} + \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{\frac{n}{2}} \right] I_n(2\sqrt{\lambda_1 \lambda_2}), & \text{при } n = 1, 2, \dots \end{cases}, \quad (2.29)$$

де  $I_n(2\sqrt{\lambda_1 \lambda_2})$  – функція Бесселя  $n$ -го порядку.

Зауважимо, що в нашому випадку  $\lambda_1 = \bar{\xi}_{\text{СВІХ}} = \bar{N}_{\text{СВІХ}}$  і  $\lambda_2 = \bar{\xi}_{\text{ПВІХ}} = \bar{N}_{\text{ПВІХ}}$ , а  $\eta = \xi_{\text{вис}} = N_{\text{вис}}$ .

На відміну від розподілу Пуассона, обвідна якої асиметрична, особливо при невеликих значення  $\lambda$ , обвідна розподілу ймовірності різниці пуассонівських потоків прямує до симетричної для великих  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  [13], [14].

## 2.8. Опис процесу формування вихідного сигналу оптико-електронної системи на основі хвильової теорії

На вхід оптичної системи потрапляє оптичне випромінювання від об'єкта. Якщо розглядати спостережуваний об'єкт як точковий, сигнальну складову можна вважати плоскою електромагнітною хвилею. Із погляду хвильової теорії світла розподіл амплітуди світлового збурення у фокальній площині є дифракційною картиною Фраунгофера при дифракції на вхідному отворі [14], [37], [38].

З огляду на це просторовий розподіл інтенсивності сигнальної компоненти в площині фотоприймача (фокальній площині оптичної системи) вважають відомим і описують безперервною функцією. Так, для прямокутного отвору з розмірами  $a$  і  $b$  розподіл має такий вигляд [38], [63]:

$$E_{\text{фк}} \approx E_0 \frac{\sin\left[c(u-u_0)\frac{a}{2}\right]}{c(u-u_0)\frac{a}{2}} \frac{\sin\left[d(v-v_0)\frac{b}{2}\right]}{d(v-v_0)\frac{b}{2}}, \quad (2.30)$$

де  $u$ ,  $v$  – координати в площині фотоприймача;

$c$ ,  $d$  – коефіцієнти, які залежать від параметрів оптичної системи.

Графічно відклик фотоприймача на вплив сигнальної складової має такий вигляд, як запропоновано на рис. 2.7.

Розподіл, наведений на рис. 2.7, симетричний і досягає максимуму в центральній плямі, в якій концентрується близько 85% всієї енергії світлового випромінювання, отриманого від об'єкта. Лінійний розмір центральної плями  $d_{\text{кр}}$  для дифракційно обмеженої оптичної системи визначається довжиною хвилі прийнятого випромінювання  $\lambda$ , діаметром вхідного отвору  $D$ , фокусною відстанню оптичної системи  $F$  й описується виразом:  $d_{\text{кр}} = 1,22 \frac{\lambda F}{D}$

Оптичне поле в довільній точці простору  $\vec{r}$  у момент часу  $t$  описується деякою скалярною функцією  $U(\vec{r}, t)$ .

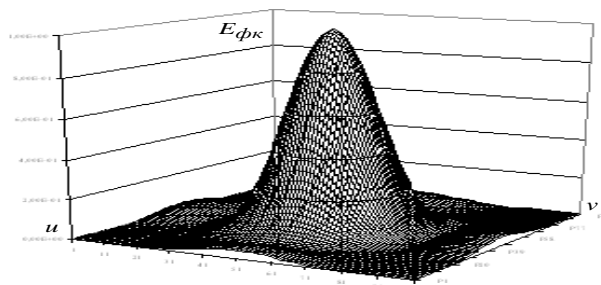


Рисунок 2.7 – Просторовий розподіл сигнальної складової у фокальній площині при реєстрації сигналу від об'єкта, отриманий із використанням хвильової теорії світла

У кожній точці простору, де немає джерел, функція  $U(\vec{r}, t)$  повинна задовольняти таке хвильове рівняння:

$$\nabla^2 U(\vec{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 U(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (2.31)$$

де  $c^2$  – швидкість світла;

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \text{ – оператор Лапласа.}$$

Функція  $U(\vec{r}, t)$  може описувати або електричний вектор  $\vec{E}(\vec{r}, t)$ , або магнітний вектор  $\vec{H}(\vec{r}, t)$  поля у вільному просторі. Тут  $\vec{r}$  – радіус-вектор деякої площини, перпендикулярної напрямкові поширення хвилі.

Оскільки нас буде цікавити форма хвилі, а не її фізична природа, обмежимося розглядом лише вектора  $\vec{E}$ . Найпростішим типом сигналу є лінійно-поляризована плоска монохроматична хвиля:

$$E = A \cos(\omega t - k\vec{r}), \quad (2.32)$$

де  $A$  – амплітуда хвилі;

$\omega = 2\pi f$  – кругова частота;

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – хвильове число;

$\lambda$  – довжина хвилі.

Напруженість поля лінійно-поляризованої монохроматичної хвилі можна подати так:

$$E(\vec{r}, t) = A \cdot (\vec{r}) \cos(\omega t - \varphi(\vec{r})) \quad (2.33)$$

або

$$E(\vec{r}, t) = \text{Re}\{E(\vec{r}) \cdot e^{j\omega t}\}, \quad (2.34)$$

де  $E(\vec{r}) = A \cdot (\vec{r}) \exp\{-j\varphi(\vec{r})\}$  – комплексна амплітуда хвилі.

Підставляючи (2.34) в (2.31), отримуємо:

$$(\nabla^2 + K^2)E(\vec{r}) = 0. \quad (2.35)$$

Із хвильового рівняння (2.35) випливає, що монохроматична хвиля задовольняє хвильове рівняння, в якому залежність поля від часу не простежується. Це дає можливість при описі завдань дифракції сигналу на об'єкті не враховувати множник  $\exp\{j\omega t\}$ . Розглядаючи як сигнал плоску хвилю, що поширюється перпендикулярно картинній площині, доходимо висновку про те, що при описі напруженості такого сигналу можна знехтувати його залежністю від просторової координати.

Сигнал з яскраво вираженою просторовою структурою можна подати як результат інтерференції  $N$  формувальних пучків у картинній площині:

$$E(\vec{r}, t) = \sum_{n=1}^N A_n(t) \exp\{j(-\vec{K}_n \vec{r} + \varphi_n)\}, \quad (2.36)$$

де  $A_n(t)$  – амплітуда поля  $n$ -го пучка;

$\vec{K}_n$  – хвильовий вектор поля випромінювання  $n$ -го випромінювача;

$\varphi_n$  – початкова фаза.

Поле найпростішого просторового сигналу, який формується при інтерференції двох плоских світлових хвиль, описується співвідношенням:

$$E(\vec{r}, t) = A_1(t) \exp\{j(-\vec{K}_1 \vec{r} + \varphi_1)\} + A_2(t) \exp\{j(-\vec{K}_2 \vec{r} + \varphi_2)\}.$$

Якщо амплітуди електромагнітних полів рівні між собою  $|A_1(t)| = |A_2(t)| = A$  і площини поляризації випромінювань перпендикулярні площині сходження хвиль, то просторовий розподіл інтенсивності поля такого сигналу в картинній площині можна описати співвідношенням:

$$\begin{aligned}
I(\vec{r}) &= |\mathbf{E}(\vec{r})|^2 = \mathbf{E}(\vec{r}) \mathbf{E}^*(\vec{r}) = \\
&= [A \exp\{j(-\vec{K}_1 \vec{r}_1 + \varphi_1) + A \exp\{j(-\vec{K}_2 \vec{r} + \varphi_2)\}] [A \exp\{j(\vec{K}_1 \vec{r} - \varphi_1)\} + \\
&+ A \exp\{j(\vec{K}_2 \vec{r} - \varphi_2)\}] = 2|E|^2 + |E|^2 \exp\{j[(\vec{K}_2 - \vec{K}_1) \vec{r} - (\varphi_2 - \varphi_1)]\} + \\
&+ |E|^2 \exp\{j[-(\vec{K}_2 - \vec{K}_1) \vec{r} + (\varphi_2 - \varphi_1)]\} = 2I_{cp} \{1 + \cos[(\vec{K}_2 - \vec{K}_1) \vec{r} - (\varphi_2 - \varphi_1)]\},
\end{aligned} \tag{2.37}$$

де  $I_{cp} = |E|^2$  – середнє значення інтенсивності інтерферуючих хвиль.

Цей вислів визначає розподіл інтенсивності в стоячій хвилі уздовж вектора  $(\vec{K}_2 - \vec{K}_1)$ . При симетричному щодо лінії візування розташуванні випромінювачів і рівності частот випромінювань вектор  $(\vec{K}_2 - \vec{K}_1)$  лежить у картинній площині. Для опису інтерференційної картини, що формується в цій площині, зручно використовувати поняття просторової частоти і просторової фази, якими активно послуговуються в сучасній Фур'є-оптиці. При цьому співвідношення (2.37) можна записати таким чином:

$$I(\vec{r}) = 2I_{cp} \{1 + \cos(2\pi \vec{f}_0 \vec{r} + \psi)\},$$

де  $\vec{f}_0$  – вектор просторової частоти інтерференційної картини

$$\vec{f}_0 = \frac{1}{2\pi} (\vec{K}_2 - \vec{K}_1),$$

де  $\psi$  – просторова фаза інтерференційної картини в сигналі:

$$\psi = -(\varphi_2 - \varphi_1).$$

Просторова частота інтерференційного сигналу  $\vec{f}_0$  визначається величиною й орієнтацією бази  $\vec{\rho}$  між випромінювачами, відстанню  $R$  до об'єкта і довжиною хвилі випромінювання  $\lambda$ :

$$\vec{f}_0 = \frac{1}{\lambda R} \vec{\rho}.$$

Просторова фаза інтерференційної картини в зондувальному сигналі  $\psi$  характеризує просторове розміщення її максимуму в картинній площині. Так, якщо база між випромінювачами паралельна осі  $I$  картинній площині, то  $\psi = 2\pi f_0 x_0$ , де  $x_0$  – зміщення максимуму інтерференційної картини щодо початку координат.

Таким чином, опис оптичних сигналів із позиції хвильової теорії враховує процеси інтерференції, дифракції, поляризації. Однак при оптимізації процесів виявлення сигналів опис оптичних полів до фотоприймача й після нього характеризуються окремо. Процес взаємодії оптичного випромінювання з фотоприймачем має квантовий характер, й утворення зарядів у фотоприймачі можна розглядати з погляду корпускулярної теорії.

Обговорення проблеми формування вихідного сигналу оптико-електронної системи, як показано на рис. 2.5, уможливорює опис шляхів послідовних перетворень оптичного випромінювання середовищем поширення, об'єктом спостереження, оптичною ланкою за допомогою хвильової і корпускулярної теорії, при аналізі відклику елементів фотоприймача необхідно враховувати квантовий характер взаємодії. Із позиції хвильової теорії і статистичної теорії потоків сигнали в оптико-електронних системах описуються безперервними гауссовими потоками.

## 2.9. Висновки

Для виконання визначеного в роботі завдання – розробити й обґрунтувати адекватні математичні моделі взаємодії електромагнітного випромінювання з елементами і трактами оптико-електронних систем при проходженні сигналів, що дозволяють врахувати стохастико-детермінований характер сигналів і перешкод, – проаналізовані теоретичні методи опису вхідних і вихідних сигналів.

Результати здійсненого аналізу дозволяють зробити такі висновки:

1. Вхідні сигнали можна описувати з позицій хвильової і корпускулярної

теорій, оскільки оптичні сигнали виявляють як властивості хвилі, так і корпускули. Хвильова теорія дозволяє описувати процеси дифракції та інтерференції, а також процеси взаємодії поля з речовиною. Оскільки енергія кванта оптичного діапазону досить велика, взаємодію поля з речовиною можна описати і за допомогою корпускулярної теорії з урахуванням процесів поглинання.

2. Стохастичний характер електромагнітного випромінювання впливає просторово-часовими змінами. При цьому принцип формування сигналів в оптико-електронних системах враховує умови лінійності, інваріантності, фізичної здійсненності і стійкості.

3. Флуктуації фонові і сигнальних компонент описуються відповідно до теорії помилок за допомогою центральної граничної теореми і мають гауссів розподіл. Однак при перетворенні електромагнітного випромінювання, що має стохастичний характер, зв'язок між вхідним і вихідним потоком може визначатися як детермінованою, так і стохастичною залежністю.

4. Аналіз методів опису вихідних сигналів з урахуванням статистичних властивостей засвідчив, що при описі вихідних сигналів оптико-електронних систем, які реєструють сигнали з різними стохастико-детермінованими властивостями, використовують пуассонівський і гауссів, логарифмічно-нормальний, негативно-біноміальний Бозе-Ейнштейна розподіл.

5. Сигналам із постійною інтенсивністю потоку, притаманні всі властивості пуассонівського закону. Інваріантність пуассонівських потоків зумовлює опис адитивної суміші сигнального і фонового потоків за допомогою пуассонівського потоку.

6. Аналіз сигналів із випадковими флуктуаціями інтенсивності потоку довів, що випадкова функція залежить від співвідношення часу спостереження  $\tau$  (експозиції) й інтервалу кореляції  $\tau_k$ . При  $\tau \ll \tau_k$  випадкову функцію можна вважати постійною і такою, що не залежить від часу. Розподіл такого потоку подій можна описувати пуассонівським законом. При  $\tau \gg \tau_k$  випадкова величина, що характеризує такий потік, буде підпорядковуватися закону Бозе-Ейнштейна.

7. Найбільшу дисперсію (по відношенню до середнього) із розглянутих має розподіл Бозе-Ейнштейна, найменшу – розподіл Пуассона. При негативно-біноміальному розподілі додавання величин, що флюктуюють незалежно, зменшує дисперсію (згладжує) флюктуації).

Матеріали підрозділу 2.6 (в тому числі 2.6.1 – 2.6.4) опубліковані в [14].

Уважаємо за доцільне проаналізувати методи збільшення проникної здатності і розширення динамічного діапазону на основі опису вхідних потоків із позиції хвильового і корпускулярного опису, спираючись на здійснений аналіз методів опису вхідних і вихідних сигналів в оптико-електронних системах і приймаючи пуассонівську статистику вихідних потоків.

Розглянемо метод розширення динамічного діапазону, що ґрунтується на введенні в оптичну ланку нейтральних фільтрів. Це дозволяє узгоджувати динамічний діапазон фотоприймачів із вхідним потоком випромінювання і реєструвати сигнали в збільшеному діапазоні інтенсивностей.

### РОЗДІЛ 3

## СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З ОПТИЧНОЮ ЛАНКОЮ ДЛЯ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ З ОБМЕЖЕНИМ ДИНАМІЧНИМ ДІАПАЗОНОМ

**Мета.** Провести теоретичні й експериментальні дослідження статистичних властивостей вихідних сигналів оптико-електронних систем, що враховують стохастичний характер взаємодії вхідного випромінювання з оптичною ланкою в умовах обмеженого динамічного діапазону.

Для досягнення поставленої мети проаналізовано процес послаблення оптичного випромінювання оптичною ланкою, статистичні характеристики вихідних сигналів та ефективність оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном за критеріями ефективності. Матеріал, поданий у розділі, опублікований у [14], [43], [47], [136] – [140].

Розділ спрямований на виконання визначених у роботі завдань: дослідити впливу оптичних систем та процесу послаблення оптичного випромінювання оптичною ланкою на ефективність оптико-електронних систем з обмеженими динамічним діапазоном; розробити й обґрунтувати математичні моделі взаємодії електромагнітного випромінювання з оптичною ланкою; дослідити зміни статистичних характеристик приймальних сигналів.

У розділі для окреслення потенційних можливостей оптико-електронних систем, до складу яких включені послаблювачі, з метою розширення їхнього динамічного діапазону проаналізовані процес послаблення оптичного випромінювання оптичною ланкою й ефективність оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном за критеріями оцінювання ефективності (рис. 1.3), вивчені статистичні властивості вихідних сигналів оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном й емпірично отримані закони розподілу вихідних сигналів оптико-електронних

систем з обмеженим динамічним діапазоном, з'ясовані фізичні причини, що впливають на формування вихідного сигналу.

Динамічний діапазон оптико-електронних систем визначається відношенням освітленості на верхній межі діапазону, при якій настає насичення фотоприймача, до освітленості на нижній межі діапазону, при якій величина відношення сигнал/шум дорівнює граничному значенню, що визначається внутрішніми шумами фотоприймача.

Теоретичні методи оброблення сигналів в оптико-електронних системах, спрямовані на розширення динамічного діапазону, включають послідовний розгляд процесів перетворення сигналів оптичною ланкою і приймачем випромінювання. Урахування цих процесів необхідний при подальшому розробленні алгоритмів вимірювання параметрів і виявлення сигналів в оптико-електронних системах.

Одним із шляхів розширення динамічного діапазону оптико-електронних систем на верхній межі є використання послаблювачів у складі оптичної ланки, які узгоджують динамічний діапазон фотоприймальних пристроїв з енергетичними характеристиками вхідного випромінювання.

Опис процесів послаблення і перетворення сигналів оптичною ланкою проводиться з використанням хвильової [21], [22], [24], [40] і корпускулярної теорій оптичних сигналів [13], [25], [31], [33], [61] з використанням статистичного аналізу [15], [16], [34] - [36]. Дослідження процесів послаблення і перетворення оптичних сигналів зводиться до аналізу їхньої просторово-координатної і просторово-частотної поведінки.

Із позиції хвильової теорії оптична система описується як Фур'є-перетворювальна і зображувальна система [22], [37], враховується вплив аберцій на передавальні функції оптичної системи [39] - [41], [56], [57], [63]. Процеси послаблення вхідного потоку враховані відповідно до *детермінованих* енергетичних характеристик пропускання і поглинання. Опис процесу послаблення ґрунтується на перетворенні безперервних випадкових потоків.

Із позиції хвильової теорії оптична система описується як *стохастич-*

ний послаблювач [9], [13], [43]. Основу опису процесу послаблення становить перетворення дискретних пуассонівських потоків як процес проріджування подій зі зберіганням властивостей пуассонівських потоків.

При вивченні процесу взаємодії оптичного випромінювання з оптичною ланкою флуктуаційні складові як сигналу, так і шуму враховуються з позиції теорії випадкових процесів, і в прикладних завданнях оптико-електронних систем вихідний сигнал поданий як сума незалежних випадкових величин. У наш час при аналізі вихідних сигналів оптико-електронних систем значного поширення набули статистичні процеси, об'єднані центральною граничною теоремою [21] – [24], [29] – [31].

Під час вивчення процесу послаблення оптичного випромінювання в оптико-електронних системах з обмеженим динамічним діапазоном були виявлені відхилення в статистичних характеристиках вихідних сигналів від відомих статистичних моделей [13], [47], [65] – [67]. Реєстровані сигнали містили аномальні сплески інтенсивності, щільності розподілу вихідних сигналів характеризувалися «важкими хвостами» і відрізнялися за асимптотикою ймовірності від процесів, об'єднаних центральною граничною теоремою. Розв'язання проблеми, пов'язаної з появою важких хвостів, передбачає з'ясування фізичних причин їх появи і можливості використання статистичного апарату їх урахування. Для аналізу таких випадкових процесів приймають за основу процес формування випадкової величини в умовах застосування узагальнених граничних теорем, що використовують як граничні розподіли сім'я стійких законів розподілу [94] – [104]. Формування такого випадкового процесу визначається асимптотичною поведінкою стрибкоподібного випадкового процесу, що характеризується Леві-рухом частинок (фотонів) і обернено-степенною залежністю. У наш час стійкі закони в практичній діяльності використовуються дедалі частіше [113] – [135].

Для з'ясування причин появи відхилень у статистичних характеристиках вихідних сигналів в оптико-електронних системах з обмеженим динамічним діапазоном необхідно проаналізувати фізичні явища, характерні для оп-

тичного скла, як аморфної структури, а також процеси, які відбуваються в оптичному склі при атмосферному впливі. Корпускулярний опис оптичного сигналу як потоку частинок – фотонів дозволяє застосувати статистичну модель на основі стійких законів. Необхідно провести додаткові теоретичні й експериментальні дослідження, спрямовані на вивчення асимптотичної поведінки закону розподілу для випадкового процесу, що характеризує вихідний сигнал оптико-електронних систем.

Як засвідчив аналіз потреб використання оптико-електронних систем, здійснений у Розділі 1, системи повинні працювати в досить широкому динамічному діапазоні. Розширення динамічного діапазону оптико-електронних систем, аж до систем третього покоління, досягається шляхом вдосконалення технологій створення фотоприймальних пристроїв і оптичних ланок. Технічні характеристики, як приймачів оптичного випромінювання, так і оптичної ланки суттєво впливають на параметри вихідних сигналів системи.

Це пов'язано з тим, що умови функціонування більшості типів оптико-електронних систем характеризуються широким діапазоном зміни інтенсивностей вхідних впливів, який у природних умовах спостереження може становити 140 Дб (1000 лк) і більше 240 Дб, у той час як динамічний діапазон сучасних приймачів оптичного випромінювання за інтенсивністю лежить у межах 140–60 дБ (1465 лк).

Під час реєстрації оптичного випромінювання інтенсивністю  $10^n$  лк для узгодження динамічного діапазону фотоприймального пристрою оптико-електронних систем до складу оптичної ланки необхідно вмикати ослаблювачі. Оптичні ослаблювачі – пристрої, призначені для зменшення в необхідне число раз потоку (енергії, освітленості, енергетичної яскравості) оптичного випромінювання. Ослаблювачі оптичного випромінювання поділяються на діафрагмові, спектральні і «бугерівські». При використанні діафрагмових методів послаблення потоку випромінювання відбувається за рахунок зменшення досліджуваної площі або діаметра пучка випромінювання, який реєструє фотоприймач. До таких пристроїв відносять діафрагми точкові, ірисо-

ві, щілинні, клинові, багатодірчасті, сітки, шторні. Істотним недоліком таких ослаблювачів оптичного випромінювання є викривлення просторової структури випромінювання за рахунок відрізання частини оптичного пучка за межами діафрагми. «Бугерівські» ослаблювачі засновані на явищі поглинання і розсіювання випромінювання середовищем, пропускання якого можна розрахувати за законом Бугера. Оптичні ослаблювачі також розрізняють за спектральними властивостями – селективні і нейтральні. Коефіцієнт послаблення оптичної ланки визначається як відношення величини вихідного потоку випромінювання (енергії випромінювання, енергетичної яскравості) до відповідного значенням величини потоку на вході ослаблювача, наприклад, місячний фільтр характеризується коефіцієнтом світлопропускання 13–50%, сонячний фільтр відсікає 99,99% вхідного сонячного світла. Основною вимогою до оптичних ослаблювачів є точність відтворення всіх характеристик вхідного випромінювання.

3.1. Моделі взаємодії оптичного випромінювання з оптичною ланкою оптико-електронної системи на основі хвильового і корпускулярного опису вхідного випромінювання

Основною функцією оптичної ланки є побудова оптичного зображення, реєстрованого оптико-електронною системою. Якість оптичного зображення пов'язана з конструктивними параметрами оптичної системи і повинна відповідати технічним умовам фотоелектричного перетворення, тобто відповідати розміру оптичного вікна, енергетичній ефективності, просторово-контрастному розділенню (розрізненню) перетворювача, а також забезпечувати допуски на абераційні викривлення в межах робочих розмірів вікна.

Відповідно до розглянутих у Розділі 2 різних теоретичних підходів до опису оптичних сигналів в оптико-електронних системах проаналізуємо різні підходи до математичного опису процесу послаблення вхідного оптичного сигналу оптичною ланкою.

### 3.1.1. Послаблення оптичного сигналу оптичною ланкою. Хвильовий опис систем, які формують зображення

Незалежно від особливостей технічної реалізації оптичної ланки і включених до її складу ослаблювачів, основним призначенням є узгодження інтенсивності оптичного випромінювання на вході оптико-електронної системи  $E_{вх}$  з динамічним діапазоном приймача (п. 2.2 Розділ 2). Як відзначалося в п. 2.7, у процесі формування вихідного сигналу оптико-електронної системи відбувається послаблення оптичного сигналу об'єктом спостереження, оптичною ланкою системи. Процес послаблення оптичного сигналу уздовж траси поширення елементами оптико-електронного тракту, в тому числі ослаблювачі оптичного випромінювання, описується законом Бугера [39]:

$$I_{l\lambda} = I_{o\lambda} e^{-\alpha\lambda l} = I_{o\lambda} \tau_{l\lambda}^1 = I_{o\lambda} \tau_{\lambda}, \quad (3.1)$$

де  $I_{l\lambda}$  – сила випромінювання, яке пройшло шлях  $l$ ;

$I_{o\lambda}$  – сила випромінювання на початку траси;

$\alpha_{\lambda}$  – показник послаблення;

$\tau_{l\lambda} = e^{-\alpha_{\lambda} l}$  – коефіцієнт прозорості середовища;

$\lambda$  – довжина хвилі.

Оптичну систему, яка формує дійсне зображення об'єкта, можна вважати «чорним ящиком». Згідно з рис. 3.1, входом цього «чорного ящика» слугує вхідна зіниця, а виходом – вихідна зіниця. Вхідна зіниця завжди є зображенням вихідної зіниці і навпаки.

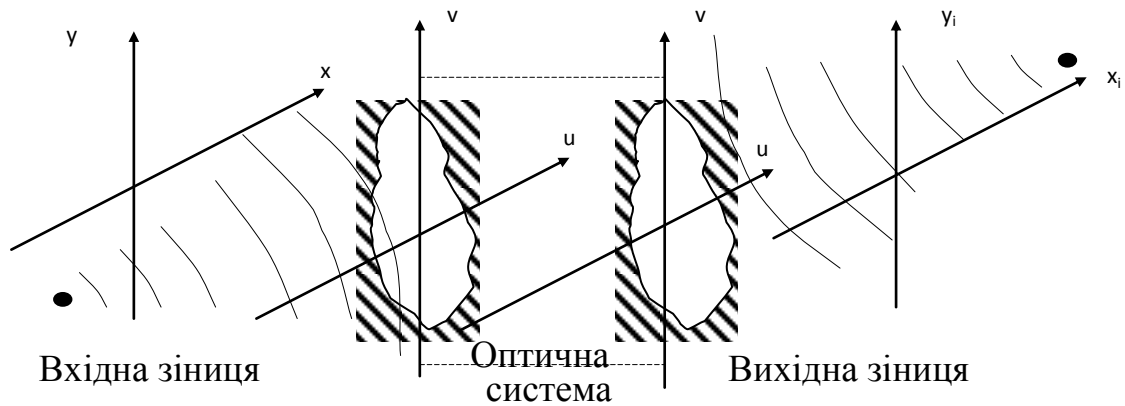


Рисунок 3.1 – Формування зображення оптичною системою

Властивості оптичної системи, яка формує зображення, повністю описуються імпульсним відкликом, який відповідає розподілу амплітуди світла в зображенні точкового джерела. Імпульсний відклик дифракційно обмеженої оптичної системи являє собою просто картину дифракції Фраунгофера на вихідній зіниці (рис. 3.1) і має вигляд:

$$h(x_i, y_i, x, y) = K \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(u, v) \cdot \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda d_i} [(x_i - M_x)u + (y_i - M_y)v] \right\} dudv, \quad (3.2)$$

де  $K$  – комплексна стала;

$P(u, v)$  – функція зіниці, дорівнює одиниці всередині зіниці і нулю за її межами.

Якщо відомий розподіл поля в картинній площині об'єкта  $E_0(x, y)$ , то на основі теорії лінійних систем поле в площині зображення можна передати інтегралом згортки:

$$E(x_i, y_i) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_0(x, y) h(x_i - x, y_i - y) dx dy. \quad (3.3)$$

Цьому співвідношенню можна дати таке фізичне трактування. Кожна

точка об'єкта зумовлює імпульсний відклик у площині зображення. Суперпозиція імпульсних відкликів є «зображення» поля в картинній площині. Воно не є точною копією, і відмінності розподілу  $E(x_i, y_i)$  від розподілу  $E_o(x_i, y_i)$  тим більші, чим більша ширина імпульсного відклику  $h$ .

Співвідношення (3.3) описує розподіл поля в площині зображення. Реєстроване зображення об'єкта відповідає розподілу інтенсивності світла в площині зображення, тобто

$$I(x_i, y_i) = \langle |E(x_i, y_i)|^2 \rangle, \quad (3.4)$$

де усереднення за часом означає щонайменше усереднення обвідної світлової несучої.

Проаналізуємо вплив статистичного характеру змін у часі амплітуди оптичного випромінювання в різних точках картинної площині на характер формованого зображення об'єкта. Якщо зміна в часі амплітуди випромінювання в кожній точці об'єкта має випадковий характер (некогерентне освітлення), то повна амплітуда імпульсного відклику буде змінюватися відповідним чином. Отже, статистичні залежності між амплітудами в різних точках предмета будуть зумовлювати статистичні залежності між відповідними імпульсними відкликами в площині зображення. Наявність таких статистичних залежностей впливає на результат усереднення за часом, і як наслідок, може впливати на характер формованого зображення.

Якщо об'єкт освітлюється некогерентним світлом, то імпульсні відклики в площині зображення змінюються за статистично незалежними законами. Отже, необхідно додавати їхні потужності або інтенсивності. Оскільки інтенсивність будь-якого даного імпульсного відклику пропорційна інтенсивності світла в точці об'єкта, відповідальній за його виникнення, система при некогерентному освітленні *лінійно відображає інтенсивність*.

Проаналізуємо процес послаблення оптичного випромінювання. Схарактеризуємо процес послаблення оптичного сигналу коефіцієнтом  $k$ , який

зв'язує характеристики стохастичного сигналу на вході  $\xi(t)$  і виході  $\eta(t)$  ослаблювача.

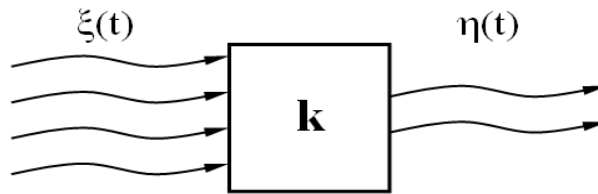


Рисунок 3.2 – Послаблення світлового потоку

Практичні міркування і велика кількість чинників, які впливають на сигнал у процесі його поширення, оброблення й реєстрації, дають можливість скористатися гіпотезою про нормальну статистику некогерентного оптичного випромінювання. У цьому випадку математичне сподівання сигналу на вході  $\overline{\xi(t)}$  і виході  $\overline{\eta(t)}$  пристрою послаблення, а також їхньої дисперсії  $\sigma_{\xi}^2$  і  $\sigma_{\eta}^2$  є вичерпними характеристиками для ряду завдань синтезу [23].

У разі хвильового опису оптичного випромінювання, сигнал на вході оптичної системи може бути описаний, як безперервний випадковий потік [22], [39] – [41].

На фізичний пристрій, подібний до нейтрального фільтра або діафрагми, надходить безперервний стохастичний сигнал  $\xi(t)$ . Пристрій послаблює його в  $k$  разів. На виході спостерігається послаблений сигнал  $\eta(t)$ . Оцінимо ефективність системи за критерієм величини відношення сигнал/шум  $\varphi$ , який є важливим енергетичним показником [22], [23], [27], [31]:

$$\varphi = \frac{\text{сигнал}}{\text{шум}} = \frac{\overline{\xi(t)}}{\sqrt{\sigma_{\xi}^2}}, \quad (3.5)$$

де  $\overline{\xi(t)}$  – середнє значення стохастичного вхідного потоку;

$\sigma_{\xi}^2$  – дисперсія стохастичного вхідного потоку.

Вихідний (послаблений) потік  $\eta(t)$  визначається:

$$\eta(t) = \frac{\xi(t)}{k}, \quad (3.6)$$

де  $\xi(t)$  – вхідний потік;

$k$  – коефіцієнт послаблення.

З огляду на властивості числових характеристик випадкової величини, з (3.11) випливає, що математичне сподівання і дисперсія будуть відповідно:

$$\overline{\eta(t)} = \frac{\overline{\xi(t)}}{k}, \quad (3.7)$$

$$\sigma_{\eta}^2 = \sigma^2 \left[ \frac{\xi(t)}{k} \right] = \frac{1}{k^2} \sigma_{\xi}^2. \quad (3.8)$$

де  $\overline{\eta(t)}$  – середнє значення вихідного (послабленого) потоку;

$\sigma_{\eta}^2$  – дисперсія вихідного (послабленого) потоку.

Тоді для відношення сигнал/шум на виході ослаблювача буде правильним:

$$\Phi_{\eta} = \frac{\overline{\eta(t)}}{\sqrt{\sigma_{\eta}^2}}, \quad (3.9)$$

де  $\Phi_{\eta}$  – відношення сигнал/шум на виході ослаблювача.

Підставляючи (3.12) і (3.13) в (3.14), отримаємо:

$$\Phi_{\eta} = \overline{\xi(t)} / k \sqrt{\frac{1}{k^2} \sigma_{\xi}^2} = \overline{\xi(t)} / \sqrt{\sigma_{\xi}^2}. \quad (3.10)$$

Із (3.15) видно, що відношення сигнал/шум на вході і виході ослаблювача не залежить від коефіцієнта послаблення і числово рівні для випадку

безперервних сигналів:

$$\Phi_{\eta} = \Phi_{\xi}. \quad (3.11)$$

Це дає підстави стверджувати, що при послабленні вхідного сигналу реалізація випадкового безперервного сигналу може бути однозначно відновлена з реалізації послабленого сигналу в будь-який момент часу  $t_i$  (рис. 3.3):

$$\xi(t_i) = \eta(t_i)k. \quad (3.12)$$

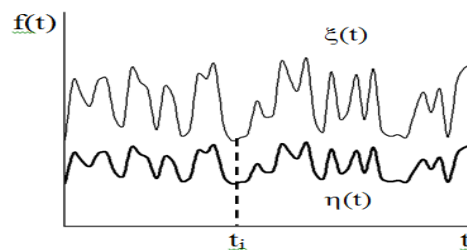


Рисунок 3.3 – Реалізації вхідних сигналів

Визначення ефективності оптико-електронної системи з обмеженим динамічним діапазоном за критерієм сигнал/шум (3.14), який згідно з [23], є вичерпною характеристикою системи, дозволяє зробити висновок, що ослаблювач *не змінює величину відношення сигнал/шум*, якщо сигнал на його вході виявляє хвильову природу. Таким чином, метод розширення динамічного діапазону, що ґрунтується на використанні ослаблювача, уможливорює збільшення можливостей системи під час реєстрації сигналів на верхній межі динамічного діапазону систем.

3.1.2. Послаблення оптичного сигналу оптичною ланкою. Корпускулярний опис систем, які формують зображення

В основі моделі лежить уявлення оптичного поля у вигляді випадкового потоку дискретних частинок адитивної суміші сигнальних і фонових фо-

тонів, розглянуте в п. 2.7.2 Розділу 2. Оптична ланка характеризується коефіцієнтом поглинання і відбиття. При взаємодії вхідного оптичного поля з оптичною ланкою фотони можуть випадковим чином пропускатися, поглинатися або перевідбиватися. Отже, потік вхідних фотонів, взаємодіючи з оптичною ланкою, піддається перетворенням, пов'язаними, або зі зміною точок вихідного процесу, або зі зникненням у ньому точок.

Оскільки вхідний потік фотонів можна вважати випадковим, то при аналізі випадкового потоку фотонів, так само як і при описі сигналів із позиції хвильової теорії, необхідно знати статистичні характеристики розглянутого поля. При аналізі некогерентних світлових потоків, що реєструються оптико-електронною системою, як розглянуто в Розділі 2, широко використовується пуассонівська статистика, яка описує потік дискретних подій.

Розглянемо підхід до опису процесу послаблення світлового випромінювання на основі ймовірнісної моделі взаємодії потоку фотонів із речовиною. Характеризуючи світловий потік як потік квантів світла, опишемо операцію його послаблення як статистичне проріджування найпростішого потоку подій (рис. 3.4, рис. 3.5) [13], [14], [36], [42].

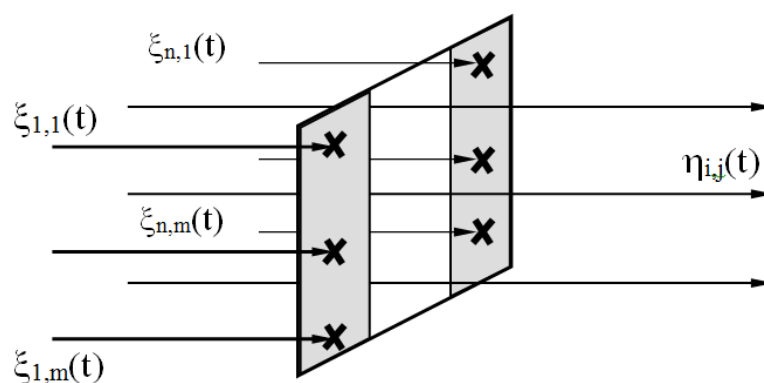


Рисунок 3.4 – Послаблення світлового потоку за допомогою діафрагми

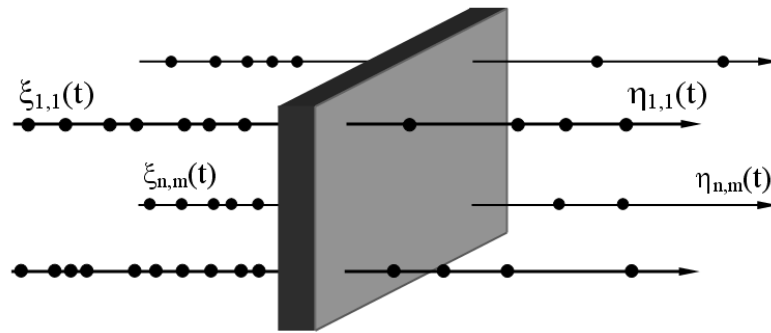


Рисунок 3.5 – Послаблення світлового потоку за допомогою нейтрального фільтра

Тоді світловий сигнал  $\xi(t)$  як сукупність просторово рознесених потоків фотонів  $\xi_{i,j}(t)$ , які проходять через апертуру діафрагми, записується так:

$$\xi(t) = \sum_i \sum_j \xi_{i,j}(t). \quad (3.13)$$

З огляду на те, що найпростіший потік характеризується пуассонівською статистикою, а також з огляду на його інваріантність до такого типу перетворення [35], [36], можна стверджувати, що потік на виході ослаблювача так само буде пуассонівським і являє собою суму всіх елементарних потоків, які пройшли слаблювач:

$$\eta(t) = \sum_i \sum_j \eta_{i,j}(t), \quad (3.14)$$

де  $i = 1 \dots n$ ;  $j = 1 \dots m$ .

Ураховуючи результати аналізу, здійсненого в Розділі 2, і щойно викладені положення, запишемо для середнього числа відліків на виході ослаблювача:

$$\overline{\eta(t)} = \frac{\overline{\xi(t)}}{k}. \quad (3.15)$$

Із виразів (3.13), (3.14) і (3.15) випливає, що, на відміну від ситуації, коли сигнал виявляє хвильові властивості, реалізація корпускулярного потоку не може бути однозначно відновлена після процедури його послаблення в будь-який момент часу  $t_i$ :

$$\xi(t_i) \neq \eta(t_i)k. \quad (3.16)$$

Водночас можливе відновлення його числових характеристик, наприклад:

$$\overline{\xi(t)} = \overline{\eta(t)}k. \quad (3.17)$$

Таким чином, для статистично рівнозначних потоків на вході і виході ослаблювача буде правильним:

$$\overline{\xi(t)} = \sigma_{\xi}^2 \quad (3.18)$$

і

$$\overline{\eta(t)} = \sigma_{\eta}^2. \quad (3.19)$$

Запишемо вирази для відношення сигнал/шум на вході і виході ослаблювача відповідно:

$$\varphi_{\xi} = \frac{\overline{\xi(t)}}{\sqrt{\sigma_{\xi}^2}}, \quad (3.20)$$

$$\varphi_{\eta} = \frac{\overline{\eta(t)}}{\sqrt{\sigma_{\eta}^2}}. \quad (3.21)$$

Отримаємо:

$$\varphi_{\eta} = \frac{\overline{\xi(t)}}{k\sqrt{\frac{\sigma_{\xi}^2}{k}}} = \frac{\overline{\xi(t)}}{\sqrt{k}\sqrt{\sigma_{\xi}^2}} \quad (3.22)$$

або з урахуванням (3.20) для (3.21) остаточно отримаємо:

$$\varphi_{\eta} = \frac{\varphi_{\xi}}{\sqrt{k}}. \quad (3.23)$$

Як видно з цього виразу, ймовірніше послаблення корпускулярного потоку спричиняє зменшення відношення сигнал/шум на виході ослаблювача пропорційно величині  $1/\sqrt{k}$  [43].

Визначаючи ефективність оптико-електронної системи з обмеженим динамічним діапазоном за критерієм сигнал/шум (3.28), можна зробити висновок, що ослаблювач змінює величину відношення сигнал/шум, якщо сигнал на його вході виявляє корпускулярну природу. Таким чином, метод розширення динамічного діапазону, в основі якого лежить використання ослаблювачів, дозволяє збільшити можливості системи під час реєстрації сигналів на верхній межі динамічного діапазону систем пропорційно величині  $1/\sqrt{k}$ .

Матеріали підрозділу 3.1 (включаючи 3.1.1 – 3.1.2) опубліковані в [43], де автор запропонував здійснити аналіз методу підвищення ефективності оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном за критерієм величини відношення сигнал/шум, використовуючи різні теоретичні аспекти опису принципів формування вихідних сигналів.

### 3.2. Експериментальні дослідження статистичних характеристик вихідних просторово-часових сигналів в оптико-електронних системах

Усі попередньо викладені міркування, ґрунтуються на поширених пуассонівській і гаусовій моделях опису вхідних сигналів. Однак на практиці мо-

жливі випадки, коли істинні функції розподілу вихідних сигналів оптико-електронних систем відрізняються від передбачуваних теоретичних. У цих випадках не всі алгоритми виявлення, розроблені з урахуванням прийнятої статистики вихідних сигналів, будуть стійкими навіть при незначних відмінностях. У роботах [13], [44] показано, що в багатьох випадках набори емпіричних даних амплітуд вихідних сигналів містять аномальні викиди, зумовлені наявністю в розподілах більш «важких» порівняно з нормальними «хвостів». Вони можуть бути викликані впливом додаткових чинників, що впливають на середовище поширення сигналів, квантовою структурою сигналів і перешкод, флуктуаціями коефіцієнтів передавання приймальних трактів та іншими причинами.

Із метою підвищення ефективності оптико-електронних систем проведені експерименти, спрямовані на визначення просторово-часового розподілу вихідних сигналів. Під час експериментів реєстрували стохастичний оптичний сигнал, амплітуда якого описувалася випадковою величиною – числом появи різних значень амплітуд сигналів у фоточутливих елементах [10], [47].

Для проведення досліджень характеристик просторово-часових вихідних сигналів була розроблена установка [41], структурна схема якої наведена на рис. 3.6.

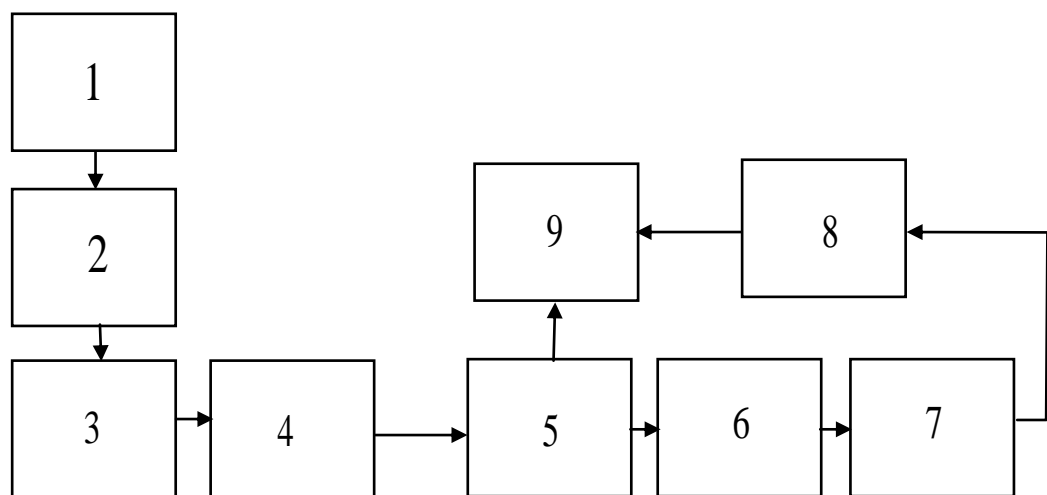


Рисунок 3.6 – Структурна схема установки для дослідження просторово-часових характеристик вихідних сигналів

Пристрій працює таким чином.

Джерело некогерентного випромінювання (1) створює світловий потік, який, проходячи через лінзу, розташовану в об'єктиві (2), й електронну систему телевізійної камери (3), формує зображення спостережуваних об'єктів на фотокатоді телевізійної камери (4). Телевізійний сигнал із виходу телевізійної камери (4) подається на вхід блоку захоплення відеопотоку (5), який перетворює сигнал і виводить зображення на монітор (9). Оцифрований сигнал потрапляє на вхід блоку визначення статистичних характеристик сигналу (6), який здійснює внутрішньокадрове оброблення отриманого зображення в реальному масштабі часу, яке подається на вхід блоку визначення методу фільтрації (7) для подальшого оброблення. Отримана інформація передається на персональний комп'ютер (8) для подальшої статистичної обробки, вимірювання параметрів досліджуваних об'єктів і виводиться на монітор (9), а також створюється банк даних отриманих результатів.

**Програмне забезпечення** для дослідження та візуалізації характеристик вихідних просторово-часових сигналів оптико-електронних систем.

Отримані дані опрацьовують за допомогою розробленого програмного забезпечення. На рис. 3.7 подано зображення основного вікна програми «Артемон», яка виконує функції перетворення телевізійних зображень, отриманих за допомогою оптико-електронних систем різного призначення.

За допомогою «відкрити» – відкривається сформований файл, в якому зберігаються досліджувані зображення. Виділяється фрагмент зображення для подальшого статистичного аналізу. У лівому вікні програми з'являється виділений фрагмент зображення.

За допомогою «вибір ракурсу», «інверсний розрахунок» і «масштаб» можна обрати найкращі параметри зображення для побудови гістограм амплітуд сигналу, сформованих елементами розділення (розрізнення) фотоприймача під дією вхідного оптичного сигналу.

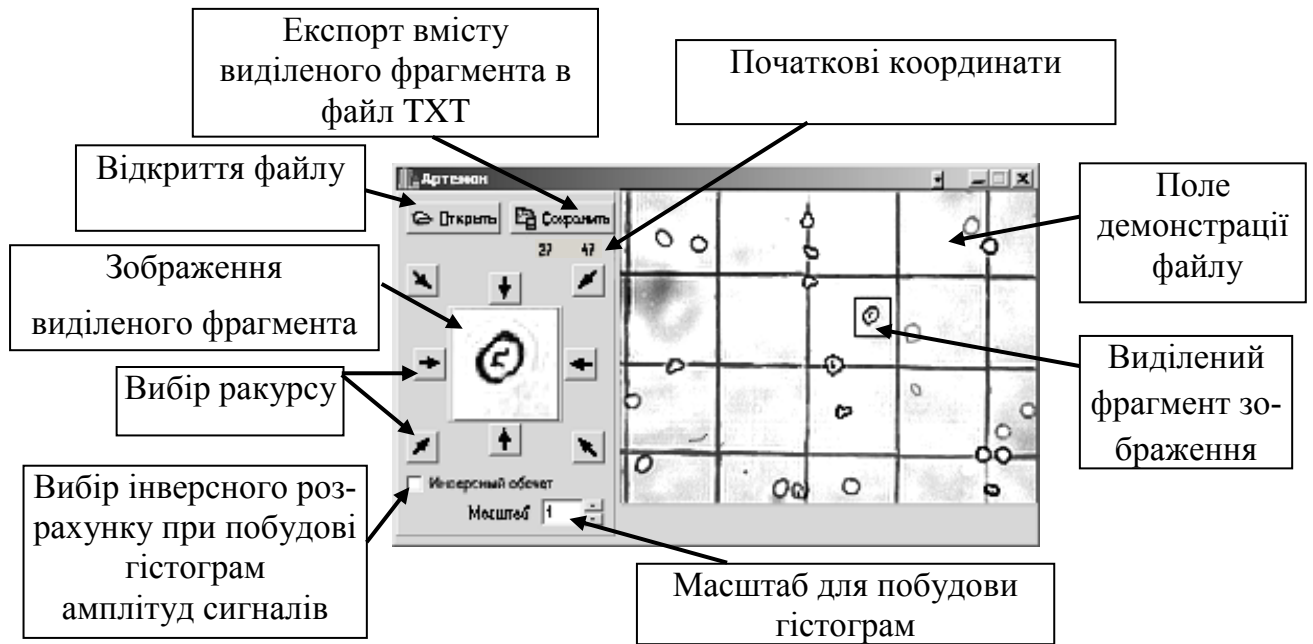


Рисунок 3.7 – Робоче вікно програми «Артемон»

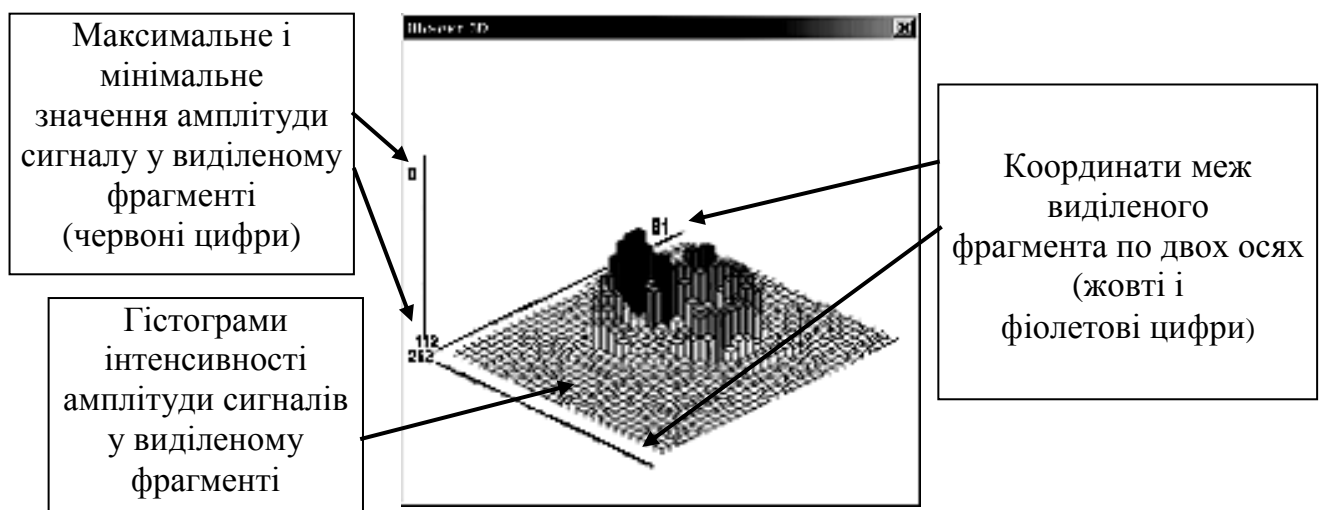
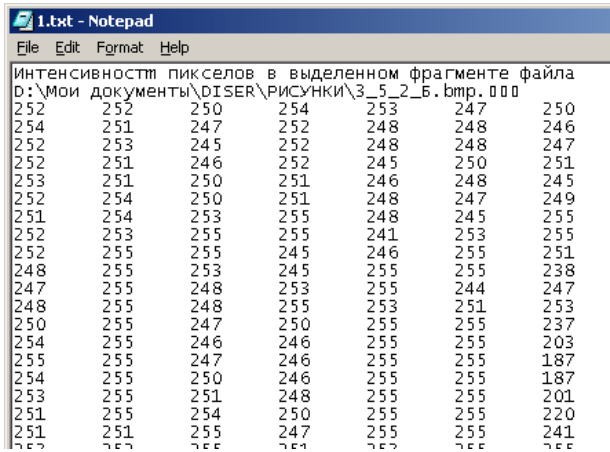


Рисунок 3.8 – Гістограми амплітуд сигналів, сформованих елементами розділення (розрізнення) фотоприймача

За допомогою «зберегти» здійснюється експорт вмісту виокремленого фрагмента в числовий масив (рис. 3.9, а), що характеризує числові значення амплітуд сигналу.



а)

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	252	252	250	254	253	247	250	
2	254	251	247	252	248	248	246	
3	252	253	245	252	248	248	247	
4	252	251	246	252	245	250	251	
5	253	251	250	251	246	248	245	
6	252	254	250	251	248	247	249	
7	251	254	253	255	248	245	255	
8	252	253	255	255	241	253	255	
9	252	255	255	245	246	255	251	
10	248	255	253	245	255	255	238	
11	247	255	248	253	255	244	247	

б)

Рисунок 3.9 – а) числовий масив; б) числовий масив, експортований у програму Excel пакета Microsoft Office

**Методика проведення експериментальних досліджень із вивчення флуктуаційних сигнальної і фонові складових.**

а) одержати за допомогою оптико-електронної системи зображення, що містить досліджувані об'єкти;

б) отримати гістограми амплітуд сигналів, сформованих елементами розділення (розрізнення) фотоприймача під дією оптичного випромінювання для виділених фрагментів з однаковими координатами строба в послідовності телевізійних кадрів, які містять тільки фонову компоненту;

в) для вивчення статистичних характеристик фотонної компоненти сформувати файли числових масивів для виділених фрагментів і експортувати їх у пакети для подальшого статистичного аналізу (рис 3.9, а, б);

г) отримати гістограми амплітуд, сформованих елементами розділення (розрізнення) під дією вхідного випромінювання для послідовності телевізійних кадрів, в яких міститься зображення досліджуваного об'єкта;

д) для вивчення статистичних характеристик сигнальної компоненти сформувати файли числових масивів для виділених фрагментів (що містять

досліджуваний об'єкт) і експортувати їх у пакети для подальшого статистичного аналізу (рис 3.9 а, б).

е) здійснити статистичну обробку масивів даних, які відповідають відкликам, сформованим елементами розділення (розрізнення) в досліджуваних фрагментах:

– обчислити середнє значення  $\bar{U}_{C+\Phi}$  в числових масивах, що містять зображення об'єкта і  $\bar{U}_{\Phi}$  в числових масивах, що не містять зображення об'єктів;

– обчислити дисперсію числових масивів  $D_{C+\Phi}$ , що містять зображення досліджуваного об'єкта і  $D_{\Phi}$  в числових масивах, де об'єкт не спостерігається;

– дані занести в банк даних.

У процесі статистичного аналізу амплітуди вихідних просторово-часових сигналів оптико-електронних систем були знайдені середнє значення і вибіркова дисперсія. Проведені дослідження показали, що вибіркова дисперсія випадкової величини, що характеризує амплітуду вихідного сигналу в багато разів перебільшує вибіркоче середнє значення (рис. 3.10, а). Коефіцієнт асиметрії  $A_S = 0,82$ ; коефіцієнт ексцесу  $E_x = 0,67$ ; математичне сподівання даної випадкової величини  $M(x) = 113$ ; дисперсія  $D(x) = 989$ .

Загальноприйнятий закон Пуассона (рис. 3.10, крива б) неадекватно описує досліджуваний стохастичний процес. Можна припустити, що розподіл амплітуди стохастичного вихідного сигналу, який суперечить гіпергеометричному закону розподілу:

$$p(x; N, n, K) = \frac{C_K^x \cdot C_{N-K}^{n-x}}{C_N^n}, \quad (3.24)$$

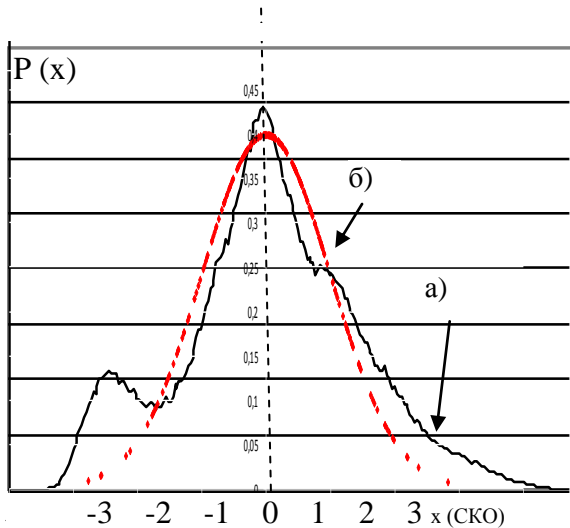


Рисунок 3.10 – Щільність розподілу амплітуди стохастичного сигналу

де  $N$  – загальне число елементів у вибірці;

$n$  – число можливих значень амплітуд;

$K$  – фіксована кількість фоточутливих елементів;

$x$  – випадкова величина характеризує число появи даного значення амплітуди сигналу у фоточутливих елементах.

Даний розподіл дискретний і характеризується трьома параметрами. Експерименти, проведені на статистично значущій кількості вимірювань прийнятого стохастичного сигналу, показали, що дисперсії значно перевищують число 9, що дозволяє апроксимувати даний розподіл виразом [45], [46]:

$$p(x; N, n, K) \approx \frac{1}{\sigma} \varphi\left(\frac{x - \bar{x}}{\sigma}\right), \quad (3.25)$$

де

$$\bar{x} = \frac{nK}{N} = n\theta, \quad \sigma = \sqrt{n\theta(1-\theta)\left(1 - \frac{n-1}{N-1}\right)}, \quad \varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}, \quad (3.26)$$

тоді

$$p(x_1 \leq X \leq x_2; N, n, K) \approx \Phi_0\left(\frac{x_2 + \frac{1}{2} - \bar{x}}{\sigma}\right) - \Phi_0\left(\frac{x_1 - \frac{1}{2} - \bar{x}}{\sigma}\right), \quad (3.27)$$

де

$$\Phi_0(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (3.28)$$

Методи виявлення стохастичного сигналу на тлі шуму в оптико-електронних системах будуються на статистичному аналізі прийнятої адитивної суміші сигналу і шуму (п.п. 2.5 і 2.6). Беручи до уваги апроксимацію сигнальної і шумової складової законами розподілу, які мають «важкі» хвости, правила виявлення, синтезовані на основі симетричних законів розподілу можуть бути неефективними, оскільки умовна ймовірність появи помилки може значно збільшуватися (*у сотні разів*) [44]. Це призводить до необхідності проведення експериментальних досліджень статистики стохастичних сигналів в оптико-електронних системах із метою створення більш адекватних методів оброблення.

На підставі теоретичного огляду, здійсненого в Розділі 2 можна стверджувати, що вплив оптичної ланки, враховується як *детермінований параметр*. Однак можна припустити, що на статистичні характеристики вихідного сигналу впливає якість і склад оптичної ланки. Для досягнення визначеної в розділі мети розглянемо оптичну ланку оптико-електронної системи, як *стохастичний елемент*, що викривлює вихідний сигнал системи.

Матеріали підрозділу 3.2 опубліковані в [47], де автор запропонував методику вивчення стохастичної поведінки сигналів в оптико-електронних системах із метою визначення статистичних характеристик сигналів і перешкод.

Матеріали підрозділу запроваджені у вигляді: методу статистичної обробки сигналів в оптико-електронних системах із детермінованими і стохастичними параметрами; методу дослідження енергетичних і просторово-часових параметрів сигналів за допомогою методів математичної статистики і лабораторних досліджень (Акт впровадження наукової роботи автора в навчальний процес Української інженерно-педагогічної академії Міністерства освіти і науки України (додаток А)).

### 3.3. Оптична ланка оптико-електронних систем

Спираючись на методологію системного підходу до розроблення й удосконалення оптико-електронних систем (п. 2.2), необхідно враховувати принцип фізичності і здійсненності для адекватного опису явищ, які викликають відклик системи.

Аналіз оптичної системи і методика визначення якості системи за основними параметрами її конструкції полягає в наближенні до потенційних меж якості оптичної системи. Основою аналізу є уявлення процесу формування оптичного зображення як поетапного двократного Фур'є-перетворення [37] – [41].

Обмеження в перетворенні просторових сигналів пов'язані з виконанням умов лінійності оптичної системи. У реальній оптичній системі умова лінійності виконується поблизу оптичної осі; поза віссю, в параксіальній ділянці виникають аберації. Обмеження спричиняють і реальні швидкості подальшої фотоелектричної реєстрації просторових сигналів.

*Принцип лінійної суперпозиції при формуванні оптичного зображення.* Оптичне зображення може бути подане як суперпозиція імпульсних реакцій на функції незалежних точкових джерел, розподілених по всій площині об'єктів. На рисунку 3.11 зображена схема формування зображення в оптичній системі на основі геометричної оптики. Збільшення оптичної системи дорівнює одиниці, випромінювання некогерентне, тому інтенсивності складаються лінійно, розподіл світла в точці  $(x', y')$ , зумовлений точковим джерелом із координатами  $(x, y)$ , визначається виразом  $g(x'-x, y'-y)$ ; і цей розподіл не змінюється по полю зору системи.

Кожна точка в площині об'єкта випромінює незалежно від іншої, а освітленість і розміщення зображення точки визначається:

$$i(x', y') = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(x'-x, y'-y) O(x, y) dx dy, \quad (2.29)$$

де  $O(x, y)$  – яскравість об'єкта;

$i(x', y')$  – яскравість зображення, межі інтегрування (розміри об'єкта) визначаються  $O(x, y)$ .

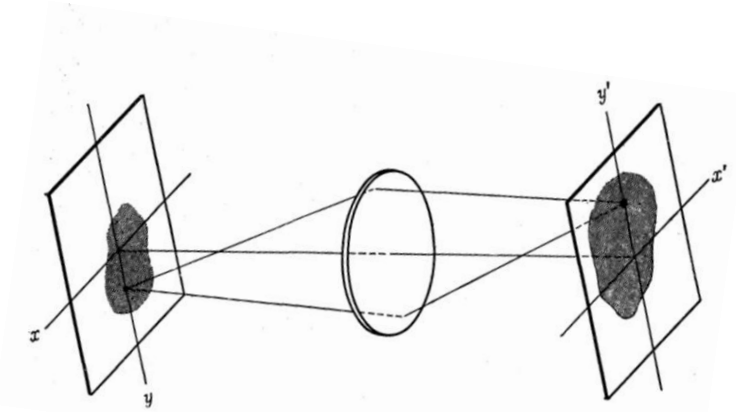


Рисунок 3.11 – Формування зображення відповідно до положень геометричної оптики

При описі оптичної системи, як основного елемента оптико-електронної системи, що виконує функцію просторового і часового фільтрів, враховуються такі умови.

*Умова лінійності:* сумі двох сигналів на вході відповідає сума вихідних сигналів. Наприклад, при подвоєнні вхідного сигналу вихідний сигнал також подвоюється.

*Умова інваріантності:* форма вихідного сигналу не повинна змінюватися при зміщенні початку відліку на осі часу.

*Умова фізичної здійсненності:* реакція не може з'являтися доти, доки на вхід не подається сигнал. Таким чином забезпечується вилучення ефектів випередження.

*Умова стійкості:* будь-який кінцевий сигнал на вході системи дає кінцевий сигнал на її виході.

Усі ці умови покладені в основу механізму взаємодій квантів із речовиною і пояснюються в межах електромагнітної взаємодії.

Кванти через свою електромагнітну природу породжують градієнти електромагнітних полів. У щільній речовині властивості електромагнітного випромінювання змінюються. Найважливіші механізми взаємодії квантів із речовиною – поглинання, випромінювання, відбиття і пропускання квантів.

Складний характер поширення електромагнітного випромінювання, що має стохастичний характер і взаємодіє з оптичною ланкою, визначається енергією випромінювання та просторовими і часовими змінами.

### 3.3.1. Оптичне скло

Як відзначалося в розділі 1, шляхи підвищення ефективності та розширення як верхньої, так і нижньої межі динамічного діапазону оптико-електронних систем доцільно відокремити теоретичні та практичні методи дослідження й удосконалення. Одним із напрямів є розроблення й використання ослаблювачів вхідного потоку, таких, як нейтральні і спектральні фільтри, другий напрям спрямований на розроблення нових технологій створення елементів і дослідження якості оптичного скла й оптичної ланки в цілому [49] – [58].

До складу оптичного скла промислових марок входить велика кількість компонентів, які містять атоми до десяти і більше різних сортів, що спричиняє велику різноманітність виниклих у них центрів забарвлення.

Оптичне скло повинно відповідати основним технічним вимогам, перша з яких – *однорідність*. Оцінюють скло на підставі експертного аналізу за ступенем і кількістю наявних у ньому звилін (дефектів скла у вигляді внутрішніх прозорих смужок або ниток) і прозорості в заданому діапазоні спектра. Типи оптичних стекол поділяються на сорти, що залежать від показника заломлення і коефіцієнта дисперсії. Хімічний склад оптичного скла:  $\text{SiO}_2$  – 41,4%,  $\text{PbO}$  – 53,2%,  $\text{K}_2\text{O}$  – 5,4%.

***Геометрична і хімічна впорядкованість у склі.*** Неоднорідністю та мікрогетерогенністю у фізичному розумінні структури характеризується на-

віть однокомпонентне скло, хоча таке скло має однорідний хімічний склад, тобто хімічний порядок.

У склі атоми зі строгою трансляційною симетрією не утворюються. Однак є впорядкування розташування атомів. У склі для кожного атома основної речовини реалізується найближче оточення, утворюючи просторові сполуки. Локальні порушення такого порядку в склі є точковими дефектами, а поглинальні точкові дефекти – центрами забарвлення. Домішкові центри забарвлення можуть також утворюватися атомами сторонніх домішок.

До складу скла (склоутворювальні речовини) входять оксиди  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TeO}_2$ ,  $\text{GeO}_2$ , фториди  $\text{AlF}_3$ .

Опис будови скла передбачає характеристику двох тісно пов'язаних аспектів – геометрія взаємного розташування атомів і іонів, що складають скло, і характеру хімічних зв'язків між частинками, які його утворюють.

Зміна геометрії і ступеня жорсткості каркаса можуть відбуватися з таких причин: кристобалітоподібні структури мають ділянки, де тетраедри  $\text{SiO}_4$  з'єднуються між собою не тільки вершинами, але й ребрами; зміни донорно-акцепторної взаємодії або ступеня двозв'язності  $\text{Si}-\text{O}$ ,  $\text{P}-\text{O}$ ,  $\text{B}-\text{O}$ .

**Аморфні структури.** У речовинах, отриманих у склоподібному стані, розташування атомів не має далекого порядку. Кремнієве скло являє собою неправильну сітку з атомів кремнію і кисню, кожний атом кремнію зв'язаний із чотирма атомами кисню, а кожен атом кисню – з двома атомами кремнію. Така сітка не має правильної структури (рис. 3.12).

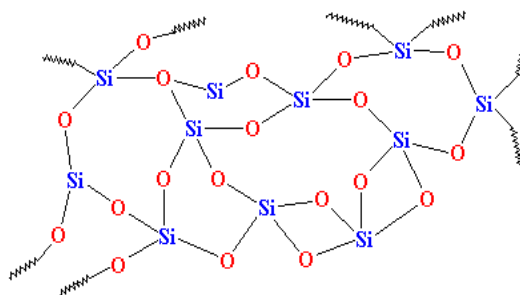


Рисунок 3.12 – Структура розташування атомів у склі

Така структура може бути стабільною тільки для ковалентного зв'язку з локалізованими спрямованими зв'язками між відповідними парами атомів. Тому скло є ізолятором, якщо воно не містить іонних домішок, що створюють додаткові електрони. Рухливість електронів у склоподібних структурах може бути пояснена захопленням електронів. Довжина вільного пробігу електронів може становити кілька міжатомних відстаней. Опис руху фононів у склі, якщо воно не має правильних ґрат, фононний спектр не обмежується першою зоною Біллюена і не є дебаєвським. Неправильна структура скла може сама по собі розсіювати фонони.

### 3.3.1. Процеси в оптичній ланці, що відбуваються під впливом атмосфери

*Процеси, які відбуваються під впливом газів на скло.* При описі взаємодії скла з газами необхідно враховувати характеристики багатьох фізико-хімічних явищ. Якщо газ і скло індиферентні одне до одного, то після зіткнення з поверхнею скла молекули газу повертаються назад у газове середовище або проникають у скло. Коли сили, що виникають між молекулами газу і складовими скла, перевищують сили відштовхування, то газ затримується на поверхні зразка, тобто відбувається адсорбція. При фізичній адсорбції хімічна індивідуальність молекул газу зберігається, і вони можуть відриватися від поверхні скла і переходити назад у газове середовище. Взаємодія молекул газу з поверхнею твердого тіла, що супроводжується утворенням хімічних сполук, є хімічною адсорбцією.

Молекули газу можуть вступати в хімічну реакцію з компонентами скла з утворенням нових сполук, цей процес вважається хімічним. Хімічна взаємодія – це хімічна реакція між склом і газом, в результаті якої змінюються склад і структура його поверхневого шару і на межі поділу тверде тіло – газ утворюється нова об'ємна фаза. Відмінною ознакою хімічної взаємодії скла з газом є реакція в шарі матеріалу, а не на поверхні. Хімічна реакція газу

зі склом відбувається за рахунок іонообмінних процесів у результаті відновлення іонів скла газами.

Проникнення молекул газу в скло супроводжується їхнім розчиненням або дифузією. Молекули газу, проникаючи через скло, десорбуються з його поверхні, тобто проникнення газу в тверду речовину підпорядковується законам дифузії (процес абсорбції).

Дотепер про адсорбцію газів на склі накопичений значний експериментальний матеріал [49], [58]. Вивчено чинники, що впливають на адсорбційну здатність скла. Процес адсорбції значною мірою залежить від температури, природи і тиску газу, складу і структури скла. Насамперед величина адсорбції визначається наявністю пор та їхніми розмірами. Пористі адсорбенти можуть містити мікропори (еквівалентний радіус  $r < 0,7$  нм), супермікропори ( $0,7$  нм  $< r < 1,5$  нм), мезапори ( $1,5$  нм  $< r < 100$  нм) і макропори ( $r < 100$  нм).

Особлива увага приділяється питанню адсорбції вологи на поверхні скла. При звичайних умовах волога спочатку адсорбується на склі фізично, а потім вступає з ним в реакцію. Волога ініціює хімічне і механічне пошкодження скла. Група  $\text{OH}^-$  досить міцно утримується на склі, однак при підвищеній температурі можуть заміщуватися на аніони  $\text{F}^-$  і  $\text{Cl}^-$ .

Адсорбовані гази можуть змінювати фізико-хімічні властивості скла. Найбільш активно адсорбуються на склі пари води і вуглекислий газ.

*Розчинення.* У процесі склування відбувається розкладання сировинних матеріалів із виділенням газів і парів води. Склomаса активно поглинає гази і вологу, які залишаються в ній після охолодження. За різними даними, в 1 грамі скла міститься в середньому від 0,1 до 10 мл газу.

При фізичному розчиненні гази проникають у структурну сітку скла, причому без її руйнування. У склі фізично розчиняються інертні гази, а в деяких випадках – кисень, водень, азот тощо. Хімічне розчинення води в склі супроводжується деполімеризацією кремнекисневого каркасу, це змінює властивості скла.

*Дифузія.* Однією із найбільш цінних властивостей скла є його погана

проникність для газів. Проникнення газу через скло відбувається в кілька стадій – адсорбція газів на поверхні скла і розчинення в його поверхневому шарі, переміщення молекул газу під дією градієнта концентрацій до протилежної поверхні скла, відрив молекули газу від скла з переходом у газове середовище зі зниженою концентрацією.

Результати опрацювання значущого фактичного матеріалу дають можливість зробити висновок, що головними чинниками, які визначають процеси дифузії і проникності скла газами, є склад і структура скла, природа і тиск дифундуючого газу, температура і вид оброблення скла. Дослідження явищ перенесення газу через скло важливе не лише для практичного застосування, але й для встановлення структури скла.

*Хімічна стійкість оптичного скла.* Хімічною стійкістю оптичного скла називається опірність його полірованої поверхні дії різних речовин, з якими оптичні деталі стикаються в процесі виготовлення і використання. Для скла такого призначення цю властивість достатньо схарактеризувати двома показниками, які оцінюються небезпекою порушення оптичної якості поверхні скляних деталей під впливом плямоутворювальних агентів (нейтральна вода, розчини кислот) і вологої атмосфери.

У загальних рисах виникнення плям відбувається таким чином: вода – невід’ємний компонент плямоутворювального середовища – контактуючи зі склом, миттєво викликає гідроліз сполук, що входять до його складу, перетворюючи їх на гідроксид. Розчинні гідроокиси змінюють місця свого утворення, дифундуючи у воду; важко розчинні залишаються в склі і разом зі сполуками, які не піддаються гідролізу (для силікатного скла це надлишковий кремнезем, не зв’язаний із металами, і силікати), утворюють поверхневий, вилужений шар, який за складом відрізняється від вихідного скла. Цей шар пронизаний порами, заповненими розчином продуктів гідролізу. Незначний переріз (їхній діаметр у шарах, що утворюються на практичному склі, менший за 2 нм) надає вилуженому шару гарні захисні властивості, і він, при товщині в десятки нанометрів, вже значно гальмує подальшу взаємодію скла з водою.

Наявність на склі шару, вилуженого водою, знижує хімічну активність поверхні і змінює оптичні властивості, насамперед коефіцієнт відбиття  $\rho$ . Зміну  $\rho$  і зміну забарвлень викликає інтерференція променів, що відбиваються від верхньої і нижньої поверхні вилуженого шару, це те саме явище, яке зумовлює виникнення тонких кольорів (кольорів Ньютона). Результат інтерференції залежить від оптичної товщини шару – добутку його геометричної товщини і його ефективного показника заломлення. Останній у вилужених шарів силікатного скла завжди менший за показник заломлення скла (через втрату частини компонентів, які переходять у розчин) і наявність пор) і становить 1,45 – 1,50 (1,52 початкові – 1,53).

Плями на оптичному склі – це ділянки поверхні, на яких випадково, наприклад, у результаті забризкування водою, виникли вилужені шари. Плями стають помітними, якщо вилуговування скла відбулося на глибину понад 50 нм, при цьому коефіцієнт відбиття поверхні плями буде зменшеним на 0,2 – 0,4% порівняно з коефіцієнтом сусідніх плям і ділянок поверхні скла. Оптичні сталі скла як параметри оптичної системи приймаються як детерміновані, і допускається відхилення показника заломлення  $1 \cdot 10^{-4}$ .

*Стійкість скла до впливу вологої атмосфери.* Це взаємодія поверхні скла тільки з парами води без потрапляння крапель води на скло.

Ланцюг явищ при контакті скла з вологою атмосферою (повітрям) зводиться до такого: поверхня будь-якого скла має підвищену хімічну активність, тому що на ній перебувають атоми, зв'язки яких не повністю насичені. Тому поверхня будь-якого скла притягує до себе, більшою чи меншою мірою, молекули води з повітря, утворюючи з них невидиму плівку, товщиною в кілька молекул. На стійкому склі сорбція на цьому закінчується. Якщо скло містить речовини, які можуть енергійно взаємодіяти з водою (сполуки  $P_2O_5$ ,  $V_2O_3$ ), вода продовжує сорбуватися, частково проникаючи в скло, розкладаючи його, і поступово на поверхні утворюється плівка розчину продуктів вилуговування скла замість води. Можуть відбуватися специфічні явища:

плівка розбивається на окремі мікроскопічні краплі, рівномірно розташовані по поверхні. Систему таких крапель називають гігроскопічним нальотом. Із плином часу крапельки можуть перетворюватися на скупчення кристаликів карбонатів. Під краплями нальоту, що був на склі кілька років, витравлюються мікроскопічні луночки.

Нальотонебезпечність скла – підступна властивість, тому що вона виявляється поступово, уже в готових приладах і навіть при зберіганні їх у найбільш сприятливих умовах, наприклад, у сухих приміщеннях із постійною температурою. Для утворення краплинно-гігроскопічних нальотів потрібна дуже невелика кількість водяної пари, досить, щоб  $1 \text{ см}^2$  поверхні скла адсорбував 0,01 мг води. Тому нальоти утворюються навіть у найбільш герметичних вузлах приладів через вологість повітря, яке під час збирання приладу заповнило ту його порожнину, з якою стикається поверхня деталі.

Після п'яти років експлуатації оптичного скла реєструються ознаки руйнування, які добре видно в мікроскоп при незначному збільшенні  $\times 80$ .

Прямі структурні методи дослідження скла (рентгенівський, електронно-мікроскопічний) не можуть виявити макрокартини будови скла.

*Дефекти оптичного скла.* Дефекти оптичного скла – це вкраплення, які за своїм складом відрізняються від складу скла: кристали, камені, пухирчики і звилини [58].

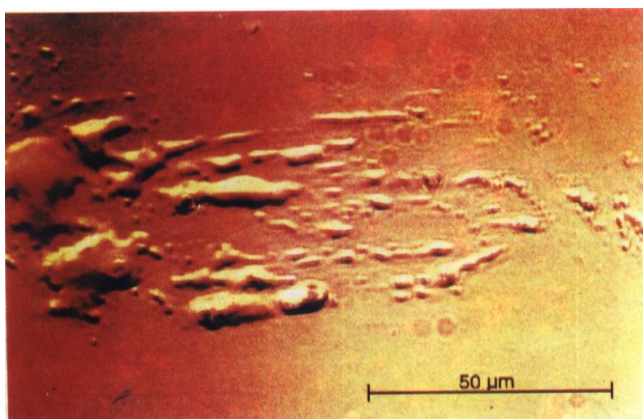


Рисунок 3.13 – Поверхні після чищення зі слідами рідини, яку застосовували для очищення [58]

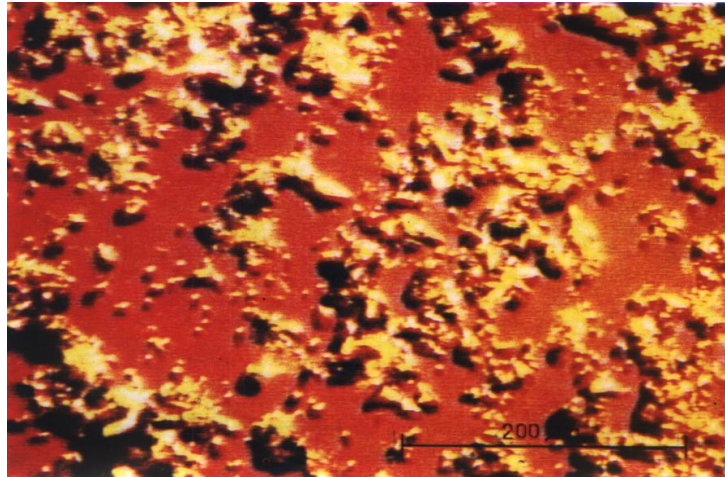


Рисунок 3.14 – Частково відполірована поверхня скла [58]

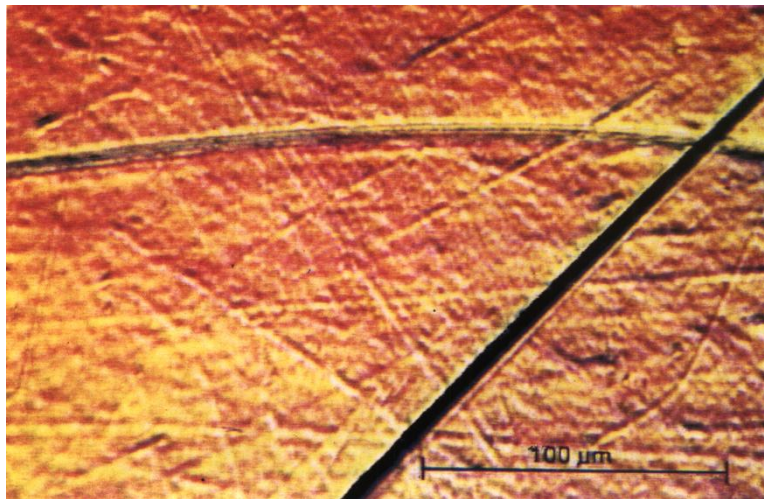


Рисунок 3.15 – Окремі глибокі подряпини на тлі дрібних подряпин [58]

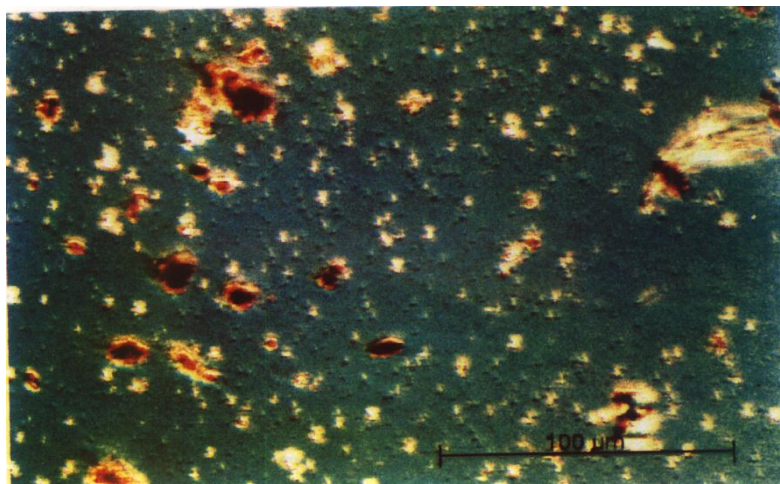


Рисунок 3.16 – Поверхня, вкрита частинками пилу [58]

*Нейтральні фільтри.* Втрати, які спричиняють нейтральні фільтри, не залишаються постійними при різних потужностях випромінювання внаслідок оборотних або навіть необоротних змін у самих фільтрах. Характер подібних змін залежить від самого механізму поглинання і може визначатися такими чинниками, як об'єднання поглинальних рівнів, спектри поглинання і час життя будь-яких збуджених станів, викликаних початковим поглинанням фотона, а також просте термічне пошкодження фільтра. Склад нейтральних фільтрів: титан, вугілля (частинки близько 5 мкм).

*Методи контролю оптичних поверхонь.* Поверхня досліджується за такими напрямками:

- 1) фізико-хімічний стан поверхні і вибір адекватної моделі для опису як самого приповерхневого шару, так і його динаміки при фазових перетвореннях в аморфно-кристалічний стан;
- 2) атомно-електронна структура і властивості матеріалу безпосередньо в об'ємі. Сутність її полягає в пошуку однозначного зв'язку між характерними особливостями оптичних спектрів і відповідними параметрами електронної структури приповерхневого шару, які співвідносяться залежно від умов експерименту або з об'ємом, або з поверхнею.

Після визначення  $\Delta$  і  $\Psi$  будь-яким із багатьох відомих методів [60] необхідно, підібравши модель шару (рис 3.17), визначити оптичні сталі: показники заломлення  $n$  і поглинання  $\kappa$  у ньому. Але ще до виконання подібних розрахунків отримують залежності  $\Delta(\varphi)$  і  $\Psi(\varphi)$ , за якими одержують відомості про один із чотирьох атрибутів поверхні – геометричну будову: наявність адсорбованого шару, їхні відносні розміри і характер поглинання світла в ньому, вплив шорсткості і пор [59].



Рисунок 3.17 – Моделі ідеально-плоских меж поділу середовища: напівнескінченна однорідна (а), неоднорідна з нормальним до поверхні градієнтом концентрації компонент (б), неоднорідна багатофазна (в), пориста (г)

**Висновки.** Викладене дозволяє зробити висновок, що оптичні сталі скла не є *детермінованими параметрами*. Результати аналізу геометричних параметрів пошкоджень, розміри яких можуть становити близько 100 нм і бути порівнянними з довжиною хвилі оптичного діапазону, дають підстави стверджувати, що пошкодження оптичного скла може істотно впливати не лише на оптичні параметри скла, а й на процеси взаємодії оптичної ланки з оптичним випромінюванням.

Отже, скло можна розглядати як *стохастично неоднорідне середовище*, яке може впливати на шляхи проходження фотонів через оптичну ланку, **порушуючи** принцип лінійної суперпозиції й *умови лінійності, інваріантності, фізичної здійсненності, стійкості*. У свою чергу вивчення процесу взаємодії фотонів із мікроскопічно неоднорідними середовищами може давати інформацію про властивості пошкодження скла. Урахування процесів старіння скла і поглинальних властивостей нейтральних фільтрів дає змогу припустити, що флуктуаційні складові сигналів в оптико-електронних системах можуть мати різні статистичні характеристики.

Урахування розглянутих процесів, що відбуваються в оптичній ланці, уможливить пояснення аномальних сплески інтенсивності у вихідних сигналах, які формуються оптико-електронними системами з обмеженим динамічним діапазоном, пояснення невідповідності стохастичної поведінки сигналів загальноприйнятим статистичним моделям і застосування відповідного математичного апарату для опису і обліку таких явищ.

***Необхідно постійно шукати нове, переглядаючи не тільки зміст, а й методологію пошуку.***

3.4. Статистичні властивості вихідних сигналів оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном

Аналізуючи статистичні характеристики світлового поля, необхідно прийняти певну фізико-математичну, статистичну модель. Як розглянуто в

Розділі 2, при складанні математичних моделей вихідних сигналів використовуються нормальний, логарифмічно-нормальний, Бозе-Ейнштейна, експоненціальний розподіл [13], [14], [36]. Значного поширення набули математичні моделі приймальних сигналів, складені на основі пуассонівської статистики [14], [32], [60] – [62]. Ці моделі враховують корпускулярну структуру потоку фотонів, умови формування оптичного випромінювання, відсутність взаємодії між фотонами в потоці, а також стохастичні властивості оптичних сигналів при аналізі квантових шумів. Однак при складанні математичної моделі сигналів на основі пуассонівської статистики, як правило, роблять деякі припущення і приймають обмеження властивостей оптичних сигналів, які зводять їх до трьох основних властивостей найпростішого (пуассонівського) потоку – стаціонарність, ординарність і відсутність післядії. Це дозволяє використовувати властивість інваріантності пуассонівського потоку при описі його взаємодії з елементами системи. Застосування такого математичного апарату дозволяє отримати аналітичні вирази для основних показників ефективності системи і створити високоефективні алгоритми оброблення сигналів в оптико-електронних системах [38], [63] – [64].

Результати аналізу, висвітлені в роботах [13], [47], [65] – [67], і досвід науково-прикладних досліджень засвідчують, що при використанні ослаблювачів у складі оптичної ланки, статистичні характеристики вихідних сигналів не підпорядковуються загальноприйнятій пуассонівській і гауссовій статистиці. Це спричиняє значні помилки в оцінюванні ефективності системи за відомими критеріями. Відповідно виникає необхідність перегляду математичного опису на основі аналізу, здійсненого в п. 3.1.1 і п. 3.1.2, і врахувати дію додаткових чинників, які впливають на формування вихідних сигналів у системах, й удосконалення статистичної моделі вихідних сигналів.

Спираючись на теоретичні положення корпускулярної теорії, опишемо процес формування вихідного сигналу оптико-електронної системи (рис. 3.18).

На вхід оптичної ланки (лінзи, ослаблювача) потрапляє адитивна суміш

корисного сигналу і фонового випромінювання, яку збирає об'єктив і реєструє фотоприймач. Фотоприймач перетворює прийняте випромінювання в просторово-часове розподілення зарядів усередині фоточутливого шару. У процесі перетворення в електронному тракті до адитивної суміші корисного і фонового випромінювання додаються шуми фотоприймального пристрою.

На вхід пристрою після детекторної обробки подається масив даних, який є відкликом фоточутливих елементів на інтенсивність оптичного випромінювання. Цей масив подається у вигляді суми незалежних випадкових величин, що характеризують сигнальну і фонову складові.

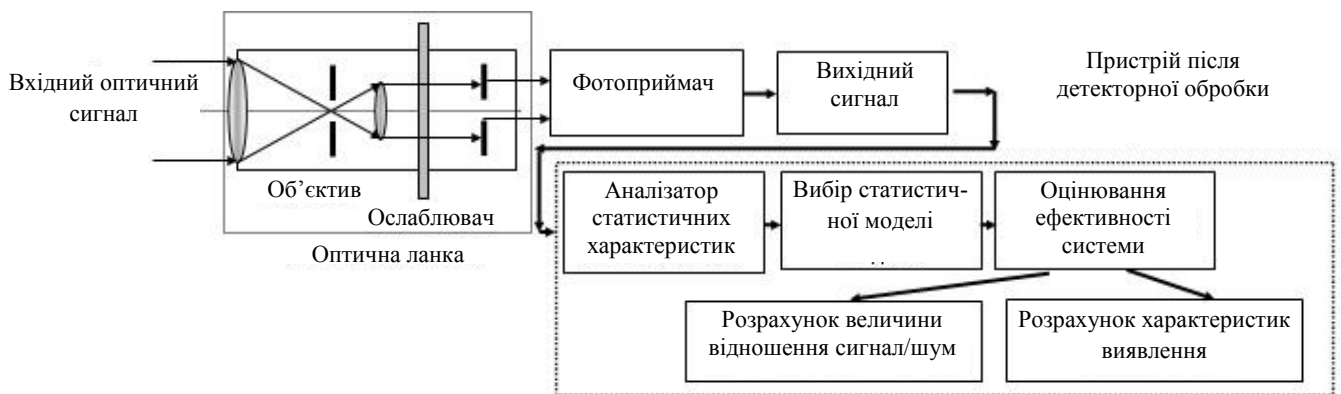


Рисунок 3.18 – Структурна схема оптико-електронної системи

*Фотоприймач.* Перетворення фоточутливим елементом оптичного випромінювання, що пройшло оптичну ланку, на електричний сигнал, описується з позиції корпускулярної теорії. При складанні статистичних моделей вихідних сигналів прийнято вважати, що фізичні і статистичні характеристики приймального оптичного сигналу при взаємодії з фоточутливим елементом підпорядковуються пуассонівській, субпуассонівській і гауссовій статистиці.

*Оптична ланка.* Перетворення оптичного випромінювання оптичною ланкою можна описати з позиції геометричної оптики, хвильової або корпускулярної теорії світла. При описі взаємодії оптичного випромінювання з оптичною ланкою з позиції хвильової теорії світла ослаблювачі розглядаються як лінійний елемент, що не впливає на статистичні характеристики вихідного

сигналу. Коефіцієнт послаблення нейтрального фільтра не впливає на критерії оцінювання якості системи, зокрема на величину відношення сигнал/шум (пп. 3.1.1).

При описі взаємодії з позиції корпускулярної теорії світло описують як потік дискретних частинок (фотонів), при цьому оптичного випромінювання уможливорює опис явищ, що мають імовірнісний характер, наприклад, поглинання в нейтральних фільтрах, а, отже, врахувати зміну статистичних характеристик вихідних сигналів на основі пуассонівської і гауссової статистики. У пункті 3.1.2 імовірнісний характер процесу послаблення вхідного сигналу оптичними елементами врахований при обчисленні величини відношення сигнал/шум  $\varphi$ . При цьому коефіцієнт послаблення враховувався як детермінований параметр. Вираз для величини сигнал/шум для систем з обмеженим динамічним діапазоном з урахуванням виразу (3.22) запишемо:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{k}} \frac{\bar{n}_{C+\Pi} - \bar{n}_{\Pi}}{\sqrt{\sigma_{(n_{C+\Pi})}^2 + \sigma_{(n_{\Pi})}^2}}, \quad (3.30)$$

де  $k$  – коефіцієнт послаблення;

$\bar{n}_{C+\Pi}$  – середнє значення адитивної суміші сигналу і перешкоди;

$\bar{n}_{\Pi}$  – середнє значення складової, яка перешкоджає;

$\sigma_{(n_{C+\Pi})}$  і  $\sigma_{(n_{\Pi})}$  – середньоквадратичне відхилення адитивної суміші сигналу та перешкод і складової, яка перешкоджає, відповідно.

При обчисленні одного з найважливіших критеріїв ефективності системи – величини відношення сигнал/шум (вираз 3.30) необхідно враховувати статистичні характеристики вихідних сигналів, на які впливають структурні елементи системи.

### 3.5. Експериментальні дослідження процесу взаємодії вхідного потоку з оптичною ланкою системи. Дослідження статистичних характеристик вихідного потоку

Мінімальний рівень сигналу, який може виявити система, повинен бути порівняним із середньоквадратичним відхиленням шуму. Оскільки отримані експериментальні і теоретичні результати (наведені в п. 3.1 – 3.2) засвідчують відхилення статистичних характеристик від прийнятих теоретичних моделей, були проведені додаткові дослідження з вивчення стохастичних характеристик вихідних сигналів оптико-електронних з обмеженим динамічним діапазоном від складу і якості оптичної ланки [14], [47], [65] – [67], [137], [138], [140].

*Мета експерименту.* Вивчення впливу ослаблювачів на статистичні характеристики вихідних сигналів оптико-телевізійних систем різного призначення.

Дослідження проводилися за допомогою установок, структурні схеми яких наведені на рис 3.19.

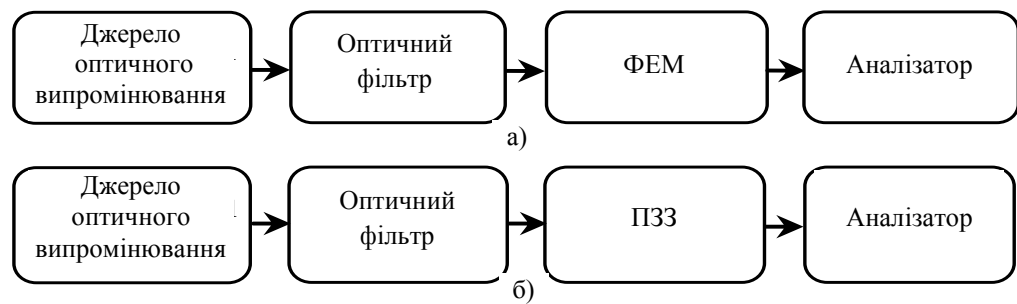


Рисунок 3.19 – Схеми для проведення експериментальних досліджень

На вхід системи подавали оптичний сигнал малої інтенсивності, фотоелектронний помножувач працював у режимі рахування фотонів. Фотоелектронний помножувач попередньо витримували в темряві для зменшення впливу внутрішніх шумів. Імовірнісне послаблення потоку здійснювали за допо-

могою нейтральних фільтрів із заданою (ДСТУ 9411-81) оптичною густиною (рис. 3.19 а) [14].

Вимірювали величини  $\Phi_{\text{ВХ}}$  і  $\Phi_{\text{ВИХ}}$  з урахуванням (3.30):

$$\Phi_{\text{ВХ}} = \frac{\bar{u}_{\text{ВХ}}}{\sigma_{\text{ВХ}}}, \quad \Phi_{\text{ВИХ}} = \frac{\bar{u}_{\text{ВИХ}}}{\sigma_{\text{ВИХ}}}, \quad (3.31)$$

де  $\bar{u}_{\text{ВХ}}$  і  $\bar{u}_{\text{ВИХ}}$  – середні значення вхідного і вихідного потоків;

$\sigma_{\text{ВХ}}$  і  $\sigma_{\text{ВИХ}}$  – середньоквадратичні відхилення вхідного і вихідного потоків.

Результати експериментальних вимірювань величин  $\Phi_{\text{ВХ}}$  і  $\Phi_{\text{ВИХ}}$  отримані при усередненні більше ніж 10000 реалізацій. На рис. 3.20 наведені результати нормованої величини  $\varphi = \Phi_{\text{ВИХ}} / \Phi_{\text{ВХ}}$ .

Для розрахунку теоретичної залежності нормованої величини  $\varphi = \frac{\Phi_{\text{ВИХ}}}{\Phi_{\text{ВХ}}}$

використана модель потоку Пуассона.

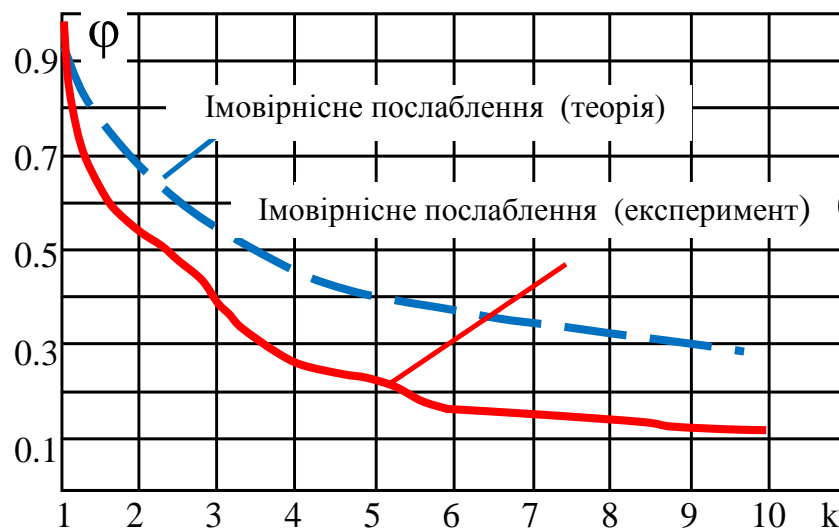


Рисунок 3.20 – Результати експериментальних і теоретичних залежностей нормованої величини  $\varphi$  від коефіцієнта послаблення. Прийнята пуассонівська модель стохастичного сигналу

Аналізу даних рис. 3.20 засвідчує, що результати експериментальних досліджень показують відхилення від прийнятої теоретичної пуассонівської моделі при збільшенні коефіцієнта послаблення. Такі зміни можна пояснити збільшенням середньоквадратичного відхилення реєстрованого потоку порівняно з середнім значенням. У [13], [36], [42], [68] – [74] при вивченні статистики фотонів відзначається, що флуктуації прийнятого оптичного випромінювання також відрізняються від прийнятих пуассонівських і гауссових моделей. Дослідження показують зміну дисперсії сигналів щодо середнього значення, тобто можна використовувати субпуассонівську статистику. Ці відмінності часто пов'язують із властивостями середовища поширення оптичних сигналів, із характеристиками елементів системи і квантовою природою оптичного випромінювання. Наприклад, з розсіювальними властивостями оптичних елементів, дефектами і забрудненням оптичних елементів, обмеженістю динамічного діапазону фотоприймача, скінченністю часу реєстрації та багатьма іншими.

Для з'ясування причин відхилення експериментальних результатів від теоретичних залежностей були додатково вивчені статистичні характеристики сигналів і проаналізовані при різних рівнях послаблення – густина ймовірностей вихідних сигналів, асимптотична поведінка хвостів щільність розподілу, – визначені граничні теореми розподілу суми незалежних випадкових величин, які характеризують вихідний сигнал. Використовуючи установку, наведену на рис. 3.19 б, був проведений експеримент, який дозволяє вивчити як часову, так і просторову поведінку вихідного сигналу [41].

На вхід оптико-телевізійної системи подавали оптичний сигнал, інтенсивність якого реєстрував фотоприймальний пристрій у діапазоні від 0 до 255 градацій яскравості. Використовували некогерентне джерело оптичного випромінювання, нейтральні фільтри для узгодження динамічного діапазону. Покадрово вивчали відеофрагменти з частотою запису 25 кадрів/сек, розділенням (розрізненням) 1000x1000 елементів розділення (розрізнення), що дозволяє робити висновки про достатню просторово-часову статистику і при-

йняти число випробувань  $N \rightarrow \infty$ .

Взаємодію оптичного випромінювання з оптичною ланкою можна схарактеризувати як стохастичне послаблення вхідного випромінювання. Проріджування вхідного потоку, з огляду на прийняту пуассонівську статистику, повинно приводити до закономірної зміни статистичних параметрів сигналу, пропорційно коефіцієнту послаблення нейтрального фільтра, а саме – зменшення середнього значення і зменшення дисперсії вхідного сигналу, зберігаючи статистику.

Однак при вивченні процесу реєстрації сигналів у системах, в яких використовуються нейтральні фільтри, випромінювання (що пройшло оптичну ланку, до складу якої входить ослаблювач) викликало в окремих елементах розділення (розрізнення) фотоприймача флуктуації амплітуди, що мають великі значення ймовірності появи великої події, ніж у прийнятих статистичних моделях. Реєструвалися флуктуації за рівнем інтенсивності, перевищують або порівнянні з рівнем вхідного випромінювання. Частота настання таких подій (флуктуацій) перевищувала передбачувану ймовірність, згідно з прийнятими теоретичними моделями [15], [16], [22], [75], [76].

На рис. 3.21 – 3.24 наведені результати експериментальних досліджень процесу послаблення стохастичного сигналу оптичною ланкою з різними коефіцієнтами послаблення (при використанні різних нейтральних фільтрів).

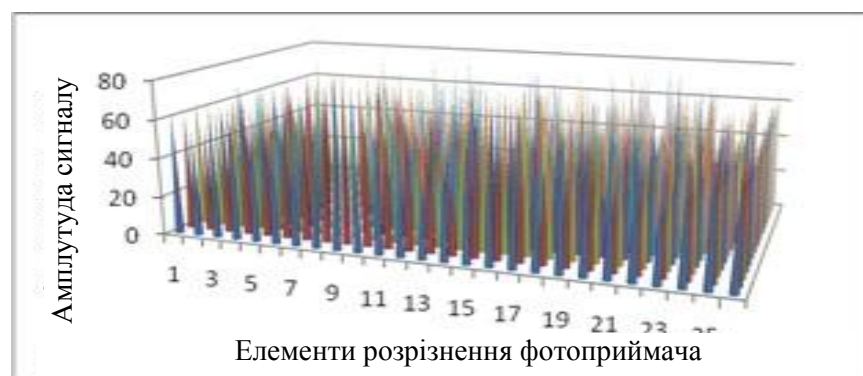


Рисунок 3.21 – Стохастичний сигнал без послаблення

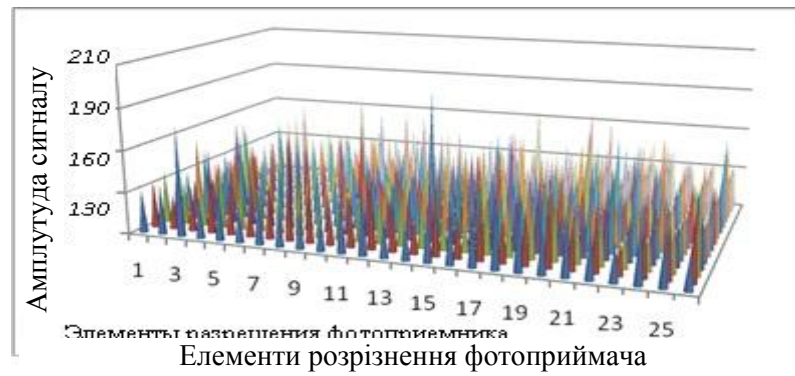


Рисунок 3.22 – Стохастичний сигнал, послаблений нейтральним фільтром.

Коефіцієнт послаблення  $k = 2$

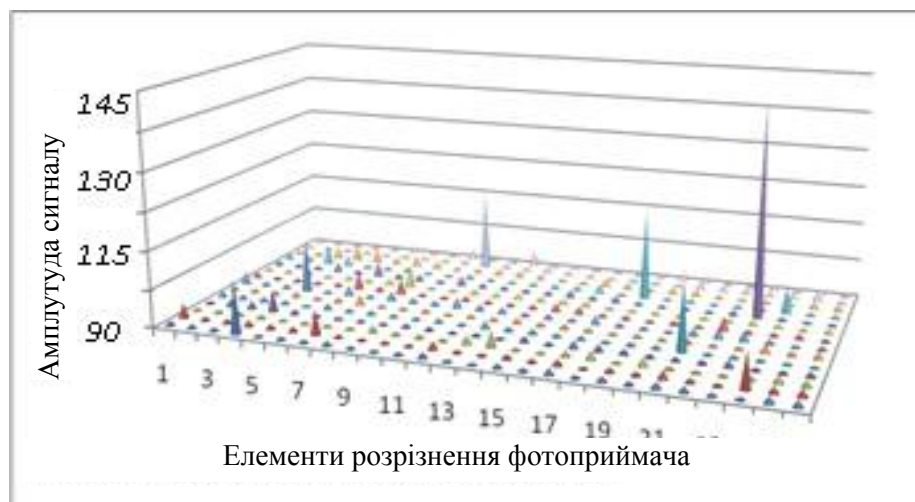


Рисунок 3.23 – Стохастичний сигнал, послаблений нейтральним

фільтром. Коефіцієнт послаблення  $k = 4$

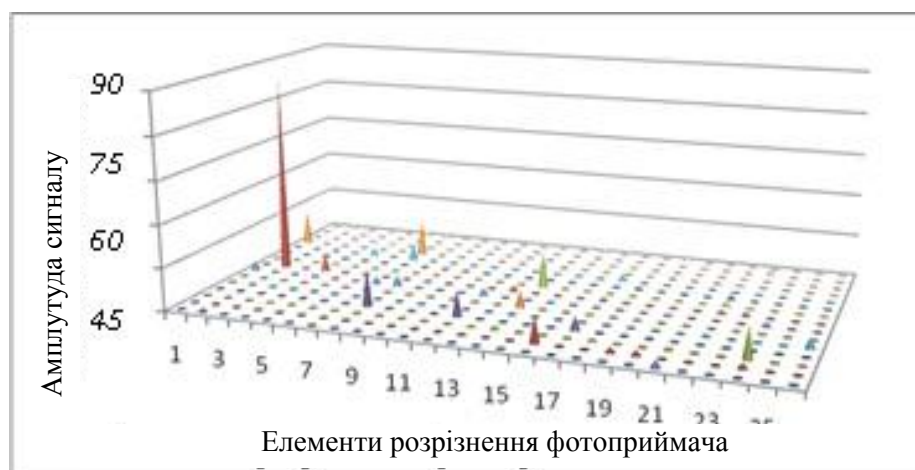


Рисунок 3.24 – Стохастичний сигнал, послаблений нейтральним фільтром.

Коефіцієнт послаблення  $k = 7$

Із метою апроксимації густини ймовірності вихідних сигналів був здійснений статистичний аналіз отриманих даних. Порівняльний аналіз імовірностей появи подій для нормованих і центрованих величин, отриманих під час експериментальних досліджень, і нормального закону розподілу (на рівні 2, 3, 4, 5 СКВ нормального розподілу) наведено в табл. 3.1. Гістограма густини ймовірності вихідного сигналу і нормального закону розподілу показана на рис. 3.25.

Таблиця 3.1

Імовірність появи подій для нормованих і центрованих величин, отриманих під час експериментальних досліджень процесу послаблення

СКВ ( $\sigma$ )	без ослаблювача	Ослаблювач $k = 2$	Ослаблювач $k = 4$	Нормальний розподіл
	Імовірність появи події			
2 $\sigma$	$4 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$
3 $\sigma$	$3 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$
4 $\sigma$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$
5 $\sigma$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$

Аналіз даних таблиці 3.1 дає можливість стверджувати, що в інтервалі від 2 до 4 СКВ (середньоквадратичне відхилення) статистичні характеристики випромінювання на виході оптичної системи, що не використовує в своєму складі ослаблювачі, добре апроксимуються пуассонівською і гауссовою статистикою (рис. 3.25). При використанні ослаблювачів асимптотичну поведінку «хвоста» щільності розподілу експериментальних результатів в інтервалі 2-5 СКВ вказує на неможливість апроксимації гауссовою статистикою (рис. 3.26).

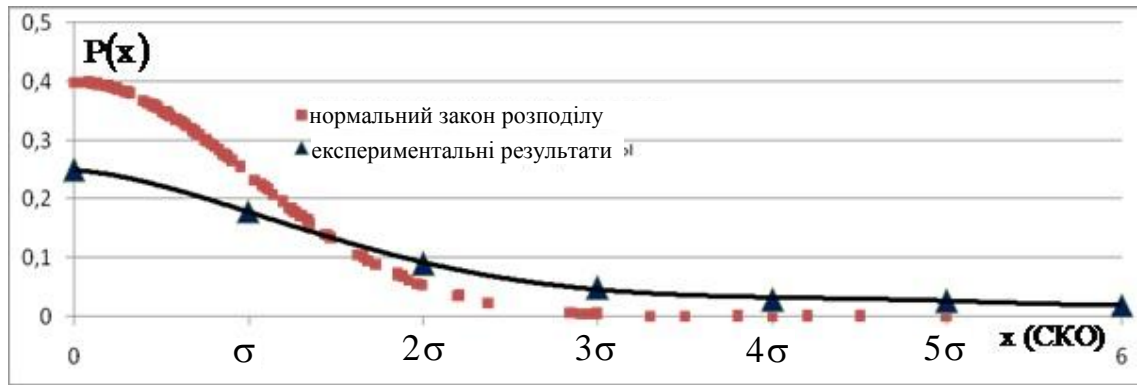


Рисунок 3.25 – Апроксимація експериментальних даних вихідних сигналів оптико-електронної системи, що *не* використовує ослаблювачі, нормальним законом розподілу

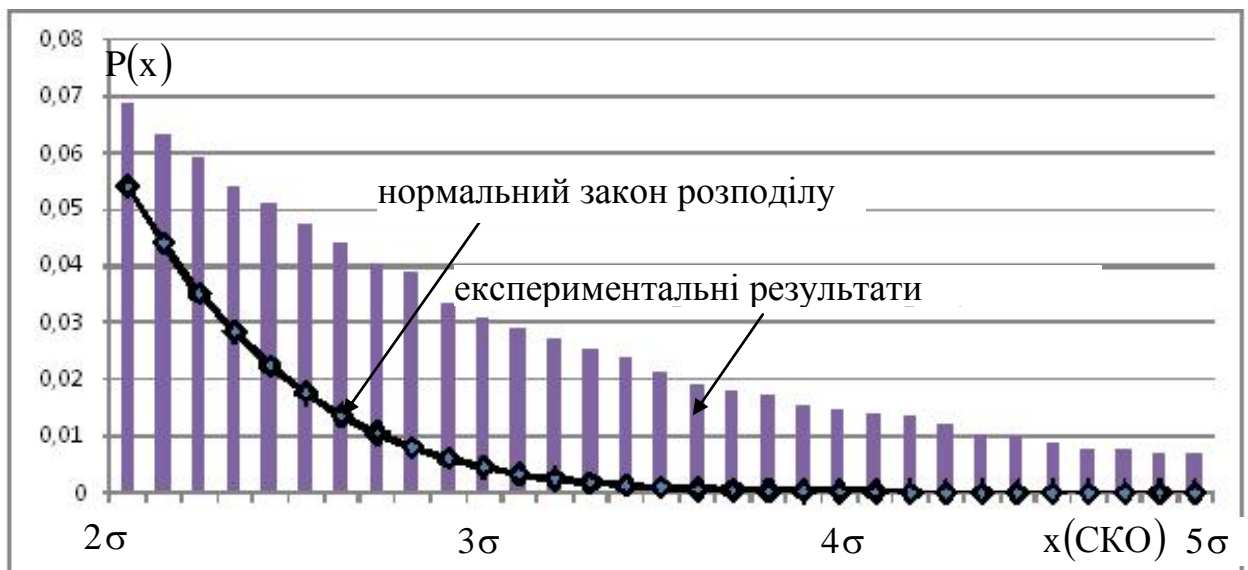


Рисунок 3.26 – Апроксимація експериментальних даних вихідних сигналів оптико-електронної системи, що використовує ослаблювачі, нормальним законом розподілу

Процес оцінювання якості алгоритмів виявлення випадкових сигналів на тлі випадкових перешкод передбачає використання граничних розподілів, що характеризують вихідний сигнал. Вихідний сигнал оптико-електронних систем описується як сума великої кількості незалежних випадкових вели-

чин, яка відповідно до центральної граничної теореми прямує до нормального закону розподілу як граничного.

Як правило, при реалізації порогових методів виявлення в оптико-телевізійних системах необхідно забезпечувати рівень ймовірності хибної тривоги порядку  $<10^{-3}$ . Умовні ймовірності правильного виявлення і хибної тривоги оптимізуються на основі вибору порогових значень. Однак асимптотична поведінка густини ймовірності експериментальних даних засвідчує, що вибір порогових значень на основі пуассонівської і гауссової статистики призведе до помилок при обчисленні характеристик виявлення системи.

### 3.6. Статистична модель взаємодії оптичного сигналу з оптичною ланкою в телевізійних системах. Центральна гранична теорема

Використання положень корпускулярної теорії уможливорює опис оптичного поля як потоку фотонів – випадкового потоку точок. При взаємодії вхідного оптичного поля з оптичною ланкою фотони можуть випадковим чином пропускатися, поглинатися або перевідбиватися. Показники заломлення і поглинання визначають з урахуванням моделі приповерхневого шару і внутрішньої структури оптичного матеріалу. Опис і прогнозування властивостей оптичних матеріалів ґрунтується на визначенні *детермінованих макропараметрів* [77] – [80].

Випадковий потік точок, взаємодіючи з оптичною ланкою, піддається перетворенням, пов'язаним або зі зміною кількості точок вихідного потоку, або зі зникненням у ньому точок.

Перетворення потоку пов'язане з проходженням через середовище (оптичне скло), якому притаманні лінійні або нелінійні характеристики. Для аналізу процесу взаємодії оптичного випромінювання зі склом необхідно прийняти впорядковану або невпорядковану модель середовища. Оптичне скло в основному розглядається з погляду впорядкованості і симетрії. При описі взаємодій квантів світла з матеріалом скла повинна враховуватися та

обставина, що в аморфних матеріалах розупорядкованість може виникати внаслідок просторової несиметрії вузлів в об'ємі, за наявності хаотично розташованих дефектів, під дією атмосферних впливів і старіння, а також за умови розташування центрів забарвлення оптично щільних матеріалів (п. 3.3.).

Позначаючи через  $\tau_j$ ,  $j=1,2,\dots$ , координати точок вихідного (такого, що входить) потоку, а через  $t_j$ ,  $j=1,2,\dots$ , – координати точок перетвореного (такого, що виходить) потоку, який задається за допомогою формули:

$$t_j = D_j(\tau_j), \quad (3.32)$$

де  $D_j$  – функція, що характеризує лінійне або нелінійне просторово-часове перетворення вхідного потоку, що залежить від координати точки і від її порядкового номера.

Взаємодію вхідного сигналу і середовища можна характеризувати, використовуючи властивості незалежного зникнення точок. Процедура проріджування потоку розглядається як випадок, при якому окремі точки зникають незалежно від інших точок. Кожна точка вхідного потоку з імовірністю  $p(\tau_j)$  залишається в потоці і з ймовірністю  $1-p(\tau_j)$  зникає. При цьому ймовірність  $p(\tau_j)$  залежить від координати розглянутої точки і не залежить від кількості і координат інших точок. Розглянутий випадок є випадком виродженого процесу розмноження, при якому кожна точка може або перетворюватися на поодинокую точку з такою самою координатою, як у вихідної точки, або зникати.

Вхідний потік може піддаватися лінійному або нелінійному перетворенню з одночасним вилученням певної кількості точок. Перетворення передбачає процедури накладення і просіювання, при якому процедури накладення і просіювання не залежать одна від одного. У цьому випадку зручно скористатися методом послідовних перетворень, припускаючи, що спочатку здійс-

нюється накладення потоків, а за ним відбувається просіювання потоку, отриманого після першого перетворення. Після процедури незалежного розрідження умовна щільність потоку зменшується в  $v$  разів, зберігаючи статистику.

Відповідно до прийнятих теоретичних статистичних моделей вихідних сигналів в оптико-телевізійних системах потік дискретних частинок описується пуассонівською статистикою. Згідно з теоремою [36]: якщо в послідовності координат точок  $x_i$ , що утворюють пуассонівський потік з інтенсивністю  $f$ , застосовується операція розрідження з імовірністю вилучення  $\gamma$  точок, то потік точок, що залишилися, є пуассонівським з інтенсивністю  $(1-\gamma)f$ . Ці твердження, згідно з [15], [16], [75] – [76], приводять нас до того, що до аналізованої послідовності незалежних випадкових подій може бути застосована центральна гранична теорема, а флуктуації вихідного потоку мають гауссову статистику.

Наведені експериментальні результати засвідчують, що ця модель може бути застосована при апроксимації густини ймовірності вихідних сигналів оптико-телевізійних систем, які не використовують ослаблювачі в інтервалі від 2 до 4 СКВ.

При використанні ослаблювача необхідно врахувати додаткові чинники, наприклад, процеси старіння оптичного скла і процеси, розглянуті в п. 3.3, що впливають на формування вихідних сигналів у системах, що працюють у режимі обмеженого динамічного діапазону, й удосконалити статистичну модель вихідних сигналів.

### 3.7. Статистична модель взаємодії оптичного сигналу з оптичною ланкою в телевізійних системах. Узагальнені граничні теореми

Невпорядковані матеріали, такі, як нейтральні фільтри, на мікроскопічному рівні принципово неоднорідні і різняться структурою в різних ділянках макроскопічно однорідного оптичного скла (п.3.3). Усі процеси трансформа-

ції енергії фотонів мають імовірнісний характер. Урахування мікропараметрів, таких, як квантові властивості випромінювання, тобто процеси, що відбуваються після поглинання кванта світла, угруповань та антиугруповань фотонів, флуктуацій і фотон-фононої взаємодії, дозволяє інтерпретувати отримані результати більш адекватно.

Статистику вихідного випромінювання емпірично можна описати несиметричними законами розподілу, які мають «важкі» хвости, тобто є ймовірність великої, але рідкісної події, якою не можна нехтувати, що істотно впливає на опис отриманих результатів. При поясненні цих процесів можна використовувати теорію аномальних дифузійних процесів [81] – [135].

Математичним підґрунтям є теорія стійких імовірнісних розподілів, яка уможливорює дослідження аномальних дифузійних процесів з єдиної позиції [81], [82], [100], [101], [103], [111].

### ***Стійкі закони.***

У процесі реєстрації оптичного випромінювання в багатьох емпіричних дослідженнях флуктуації прийнятого оптичного випромінювання відрізняються від прийнятих моделей. Дослідження показують зміну дисперсії приймальних сигналів відносно середнього значення, і при цьому використовується субпуассонівська статистика.

Відмінності часто пов'язують із властивостями середовища поширення оптичних сигналів; із характеристиками елементів системи, наприклад, розсіювальні властивості, дефекти і забруднення оптичних елементів; з обмеженістю динамічного діапазону фотоприймача; скінченність часу реєстрації, а також із квантовою природою оптичного випромінювання. Однак для оцінювання якості алгоритмів оброблення сигналів використовують нормальний закон розподілу як граничний.

Останнім часом значний інтерес викликають дослідження стохастичних процесів, які не підпорядковуються гауссовій статистиці і класичній центральній граничній теоремі. Статистичною особливістю таких процесів є істотно більш висока ймовірність виникнення великих флуктуацій. У таких

випадках використовуються узагальнені граничні теореми. Розподіл суми незалежних випадкових величин описується сім'я стійких розподілів [101].

Поняття стійких розподілів увів 1925 року П. Леві в результаті вивчення властивостей сум однаково розподілених випадкових величин. Цей клас розподілів включає розподіл із важкими хвостами і несиметричними щільностями розподілу. Часто при аналізі статистичних залежностей нехтують можливістю великих подій, що лежать на «хвості» розподілу. Розподіл із важкими хвостами – розподіл, хвіст якого не можна «відрізати», тобто не можна знехтувати впливом великих, але рідкісних подій. Великі події розуміють явища, вплив від яких може перевершувати шкоду від усіх інших подій цього класу.

Стійкі закони розподілу характеризуються чотирма параметрами  $0 < \alpha \leq 2$ ,  $-1 < \beta \leq 1$ ,  $\lambda > 0$ ,  $-\infty < \gamma < \infty$ . При фіксованих  $\alpha$  – характеристичний коефіцієнт  $\beta$  і параметри  $\gamma$  і  $\lambda$  відіграють роль центрувальних і нормувальних констант. Значення  $\beta = 0$  відповідають симетричному стандартному сталому закону. Найбільше викривлення симетрії настає після досягнення  $\beta = 1$  ( $\beta = -1$ ). Характеристичний показник  $\alpha$  – головний показник сталого закону, оскільки від його значення в основному залежить аналітична структура щільності розподілу.

Багатовимірні стійкі закони мають щільності розподілу  $P = (x, \alpha, \beta, \gamma, \lambda)$  (рис. 3.27):

а)  $\alpha = 2$ , інші параметри довільні. Цей випадок відповідає сім'я нормальних розподілів:

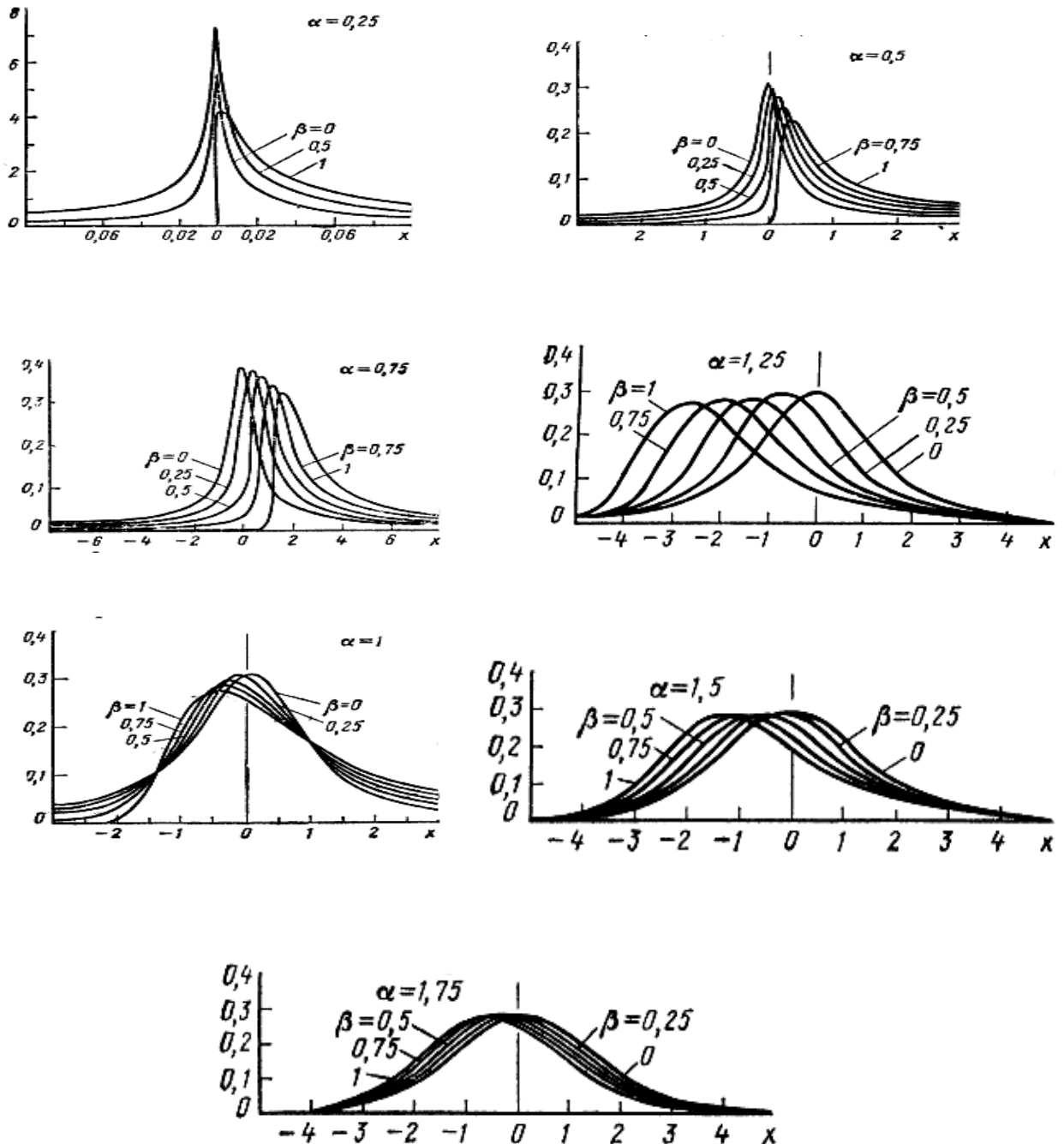
$$P = (x, 2, \beta, \gamma, \lambda) = (4\pi\lambda)^{-1/2} \exp\left\{-\frac{(x-\gamma)^2}{4\lambda}\right\}; \quad (3.33)$$

б)  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 0$ , параметри  $\gamma$  і  $\lambda$  довільні. Цей випадок відповідає сім'я розподілів Коші:

$$P = (x, 1, 0, \gamma, \lambda) = \frac{\lambda}{\pi} \left(\lambda^2 + (x-\gamma)^2\right)^{-1}; \quad (3.34)$$

в)  $\alpha=1/2$ ,  $\beta=1$ , параметри  $\gamma$  і  $\lambda$  довільні. Відповідна безліч стійких законів називається сім'я розподілів Леві:

$$P = (x, 1/2, 1, \gamma, \lambda) = \begin{cases} \frac{\lambda}{2\sqrt{\pi}} x^{-3/2} \exp\left(-\frac{\lambda^2}{4(x-\gamma)}\right), & \text{якщо } x > \gamma \\ 0 & \text{якщо } x \leq \gamma \end{cases} \quad (3.35) \text{ Рисунок}$$



3.27 – Сім'я стійких законів розподілу

Негауссові випадкові процеси використовуються при описі транспорту

зарядів на поверхні напівпровідника, взаємодії оптичного випромінювання зі склом. Негауссовим ізотропним розподілом притаманні несиметричні властивості, дисперсія потоку, а, отже, і всі вищі моменти стійких розподілів нескінченні – це пов'язано з поведінкою хвостів густини ймовірностей при великих значеннях випадкових величин. Розподіл часових характеристик настання подій у потоці має не експонентний, а обернено-степеневий вид.

При використанні центральної граничної теореми елементарні відхилення, що викликають відхилення суми незалежних випадкових величин (флуктуації сигналу і шуму), приймаються порівнянними за порядком їх впливу на розсіювання суми. Імовірність появи значень великих інтенсивностей дуже мала. Використання узагальнених граничних теорем дозволяє описати стохастичну поведінку випадкової величини з урахуванням того факту, що ймовірність реєстрації великих значень інтенсивності не є нехтувано малою. Елементарні відхилення, що впливають на суму випадкових величин, можуть мати ієрархічну структуру. На формування стохастичного процесу – вихідного сигналу оптико-електронних систем – можуть впливати чинники, які принципово не можна усунути, і при описі статистичних властивостей можуть використовуватися різні граничні закони.

При встановленні меж застосовності теоретичних моделей опису вихідних сигналів основну роль відіграє інтенсивність приймальних сигналів щодо інтенсивності шумової складової. Працюючи на межі динамічного діапазону систем, тобто на «хвостах» щільності розподілу вихідних сигналів, необхідно враховувати, що великі флуктуації будуть істотно впливати на оцінювання ви явної здатності системи.

Граничні розподіли, для яких не виконується центральна гранична теорема, характеризуються другим моментом, що прямує до нескінченності, і збільшення вибірки, кожного разу скінченної, не підвищує точність вимірювань, а знижує її. Для кожного стійкого закону  $P(x)$  із характеристичним показником  $\alpha$ , де  $0 < \alpha < 2$  існують числа [101]:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} x^\alpha \{1 - P(x) + P(-x)\} = c, \quad c > 0. \quad (3.36)$$

Одним з основних завдань теорії стійких законів є визначення областей їхнього притягання. Відомо: якщо випадкові величини  $x_1, x_2, \dots, x_N, \dots$  взаємно незалежні і мають одну й ту саму функцію розподілу  $F(x)$ , і якщо функція розподілу сум  $x_N$  сходиться при  $N \rightarrow \infty$  до функції розподілу  $P(x)$ , то  $F(x)$  притягається до  $P(x)$ , і має назву – область притягання закону  $P(x)$ .

Усі стійкі закони мають свою область притягання. Сукупність усіх законів розподілу, що притягуються до  $P(x)$ , мають сувору асимптотичну поведінку функції густини ймовірності. Одне з найбільш важливих тверджень узагальнених граничних теорем полягає в тому, що ймовірність появи великого значення в записі випадкової змінної не є нехтувано малою, якщо  $P(x)$  при великих  $x$  спадає дуже повільно. При збільшенні кількості випробувань можуть бути отримані дедалі більші значення  $x$ , і сума  $x_N$  може збільшуватися швидше, ніж кількість випробувань.

Нормальний закон розподілу і центральна гранична теорема, широко використовувані при аналізі роботи оптико-телевізійних систем, характеризуються областю притягання до себе широкого класу законів розподілу. Згідно з теоремою [81–82] функція розподілу  $P(x)$  належить області притягання нормального закону тоді і тільки тоді, коли при  $N \rightarrow \infty$ :

$$\frac{\int_{|x|>X} x^2 dP(x)}{\int_{|x|<X} x^2 dP(x)} \rightarrow 0. \quad (3.37)$$

Для того, щоб закон розподілу  $P(x)$  належав області притягання стійкого закону з характеристичним показником  $0 < \alpha < 2$ , необхідно і достатньо, щоб згідно з [81] – [82]:

$$\frac{P(-x)}{1-P(x)} \rightarrow \frac{c_1}{c_2} \quad \text{при } x \rightarrow \infty, \quad (3.38)$$

при кожному постійному  $k > 0$

$$\frac{1-P(x)+P(-x)}{1-P(kx)+P(-kx)} \rightarrow k^\alpha \quad \text{при } x \rightarrow \infty. \quad (3.39)$$

Вирази (3.37) і (3.39) є теоретичною базою для визначення поведінки функції розподілу, що дозволяють проаналізувати асимптотичну поведінку «хвостів» функції розподілу при статистично значущій вибірці. Вибір порогового значення  $X$  (вираз (3.37) зумовлює аналіз лівого і правого хвостів функції розподілу, яка характеризує експериментальні результати. Порівнюються площа під кривою функції розподілу при значеннях випадкової величини  $x$ , що не належить інтервалу  $[-X; X]$  і аналогічна площа при значеннях  $x$ , що лежить в інтервалі  $[-X; X]$ . Прямування до 0 цього співвідношення при пороговому значенні  $X \rightarrow \infty$  свідчить про належність  $P(x)$  до області притягання нормального закону.

Властивості стійких законів (законів Леві) проаналізовані в [89], [100], [103].

1. Якщо характеристичний показник  $\alpha = 2$ , то  $P(x)$  зводиться до розподілу Гаусса.

2. Якщо характеристичний показник  $0 < \alpha < 2$  і,  $N \rightarrow \infty$ , то  $P(x)$  зменшується за степеневим законом із тим самим показником степені і визначається:

$$P(x) \underset{x \rightarrow \infty}{\cong} \frac{\alpha}{x^{1+\alpha}} + O\left(\frac{1}{x^{1+2\alpha}}\right).$$

3. Якщо характеристичний показник  $1 < \alpha < 2$  функція  $P(x)$  описує флуктуації  $X_N$  навколо середнього значення  $\bar{X}$ , і тому розширюється в об-

ласть від  $+\infty$  до  $-\infty$ .

*Великі флуктуації (ЦПТ).*

У звичайній статистиці флуктуації підпорядковуються стандартній центральній граничній теоремі. Середнє значення  $\bar{X}$  і дисперсія  $D(X)$  скінченні. Флуктуації суми  $X_N$  при переході від однієї вибірки до іншої прямує до нуля, коли розмір вибірки, тобто кількість доданків  $N$  зростає. Флуктуація  $\sigma_r(X)$  щодо середнього значення  $\bar{X}$ , визначається для вибірки з розміром  $N \rightarrow \infty$ :

$$\sigma_r(X) = \frac{\langle |(X_N/N) - \bar{X}| \rangle}{\bar{X}}$$

$$D(X) < \infty: \quad \sigma_r(X) \cong \frac{\sigma}{\bar{X}\sqrt{N}}.$$

Отже, флуктуації прямує до нуля, коли  $N$  прямує до нескінченності.

*Залежність сум Леві від кількості доданків.* Одне з найбільш важливих тверджень узагальненої граничної теореми полягає в тому, що при характеристичному показнику  $\alpha < 1$  сума Леві  $X_N$  пропорційна  $X^{1/\alpha}$ . Наприклад, якщо  $\alpha = 0,5$ , то сума  $X_N$  збільшується як  $X^2$ , а при  $\alpha = 1/4$  вона збільшується як  $X^4$ . Чим менша  $\alpha$ , тим більший показник степеневі залежності  $X_N$  від  $N$ .

Така поведінка випадкової величини відрізняється від поведінки випадкової змінної  $X$  із кінцевим середнім значенням  $\bar{X}$ , для яких сума  $X_N$  підпорядковується закону великих чисел і центральній граничній теоремі.

Це пов'язано з тим, що ймовірність появи великого значення  $X$  не є нехтувано малою, якщо  $P(x)$  при великих  $N$  спадає дуже повільно. При збільшенні числа  $N$  випробувань можуть бути отримані дедалі більші значення  $X$ , що і пояснює, чому сума  $X_N$  може збільшуватися швидше, ніж  $N$ .

### 3.8. Визначення граничних розподілів вихідних сигналів оптико-електронних систем. Області притягання

Для аргументації прийняття моделі вихідних сигналів на основі  $\alpha$ -стійких процесів необхідно проаналізувати граничні розподіли, які характеризують вихідний сигнал оптико-телевізійної системи відповідно до виразів (3.37) і (3.39), на належність до області притягання нормального закону

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \text{ при } x \rightarrow \infty, \text{ який має кінцеву дисперсію, а також на на-}$$

лежність області притягання стійких законів розподілу, що мають *нескінченну дисперсію* [81] – [82], [110], [111].

Відповідно на першому етапі визначення області притягання одного з граничних законів необхідно проаналізувати статистичне поведження *дисперсії* випадкової величини (флуктуації вихідного сигналу оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном) залежно від кількості вимірювань.

Відповідно до прийнятих статистичних моделей, об'єднаних центральною граничною теоремою, процес збіжності дисперсії  $D$  наведений для нормального (рис 3.28) і пуассонівського (рис. 3.29) законів розподілу. Як видно, згідно з центральною граничною теоремою флуктуації шумової складової повинні прямувати до нуля при збільшенні кількості вимірювань  $N \rightarrow \infty$ , тобто відбувається стабілізація досліджуваної величини.

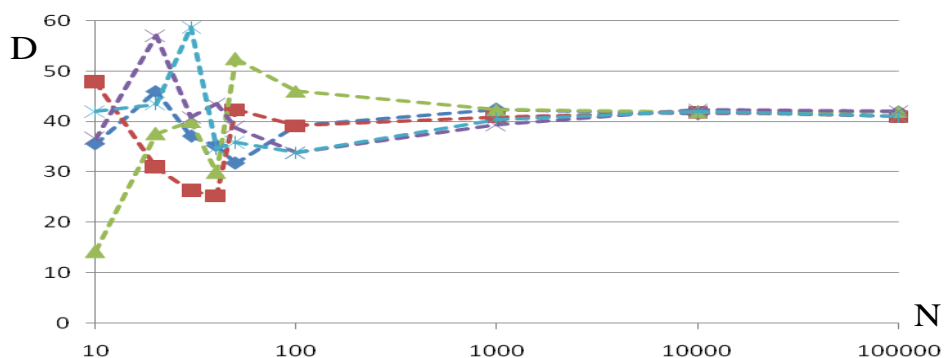


Рисунок 3.28 – Статистичне поведження дисперсії випадкової величини, що підпорядковується пуассонівському закону

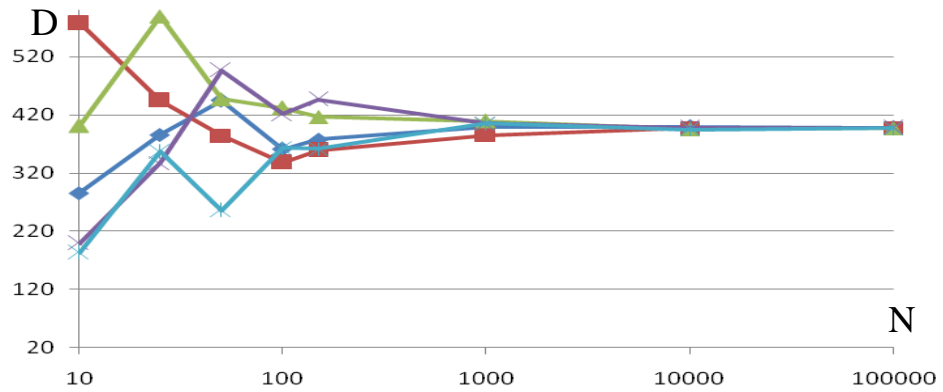


Рисунок 3.29 – Статистичне поведіння дисперсії випадкової величини, що підпорядковується нормальному закону

На рис. 3.30 наведена залежність поведінки дисперсії  $D$  від кількості аналізованих величин  $N$  характерне для стійких законів розподілу і характерним коефіцієнтом  $0 < \alpha < 2$ .

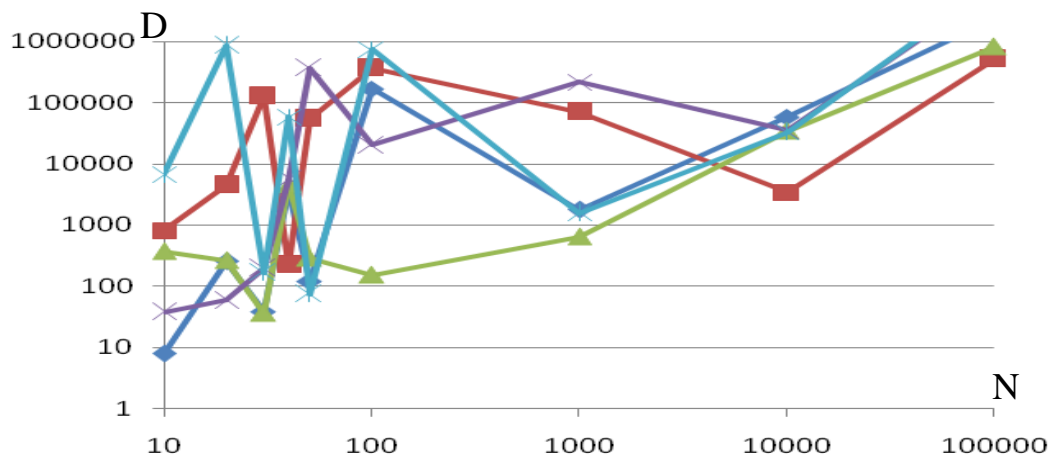


Рисунок 3.30 – Статистичне поведіння дисперсії випадкової величини, що підпорядковується стійкому закону  $\alpha = 1$

Експериментальні дослідження процесу послаблення в оптико-електронних системах засвідчили, що при збільшенні кількості вимірювань відкликів елемента розділення (розрізнення) фотоприймача  $N \rightarrow \infty$  стабілізація дисперсії флуктуаційної складової не спостерігалася (рис. 3.31).

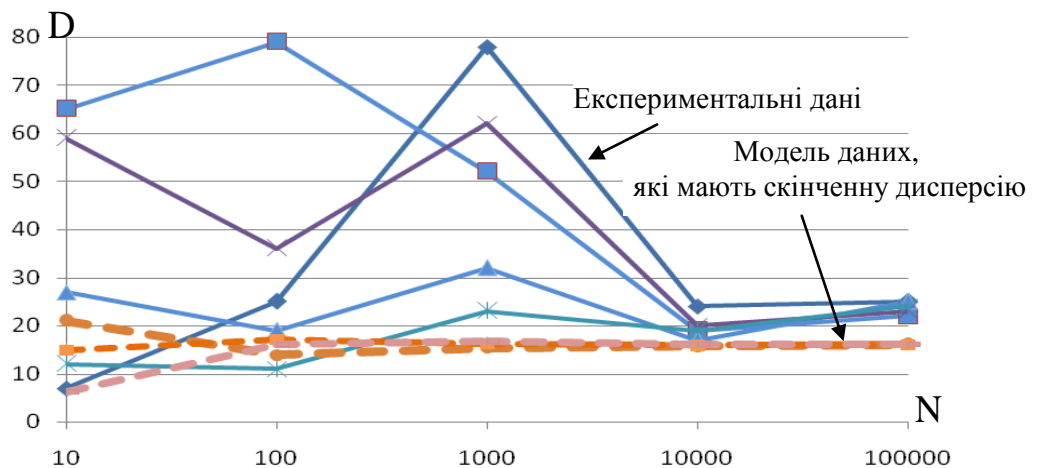


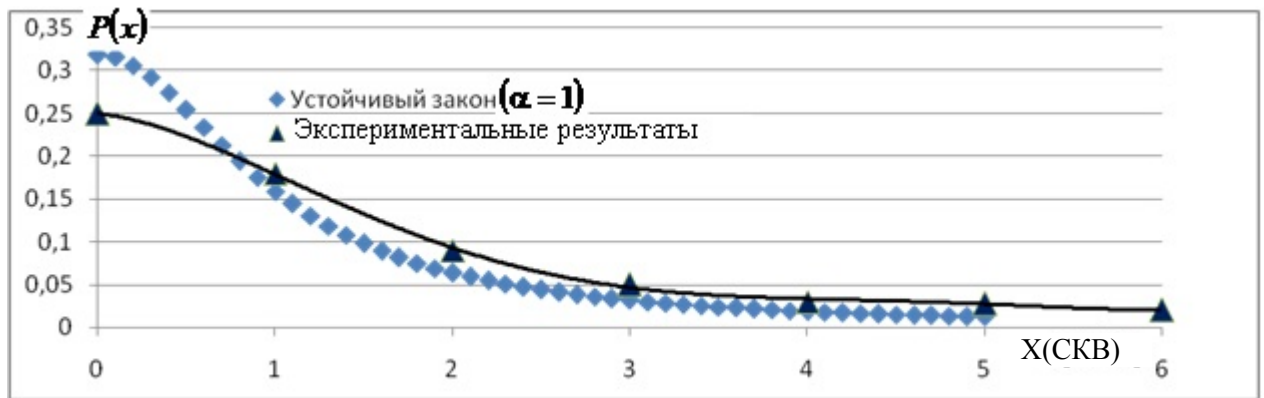
Рисунок 3.31 – Статистичне поведіння дисперсії вихідних сигналів оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном

Таке статистичне поведіння вихідних сигналів пояснюється появою у вибірках значення інтенсивностей, ймовірність появи яких не визначається центральною граничною теоремою. Оскільки дисперсія флуктуаційної складової *не стабілізується*, можна переходити до наступного етапу.

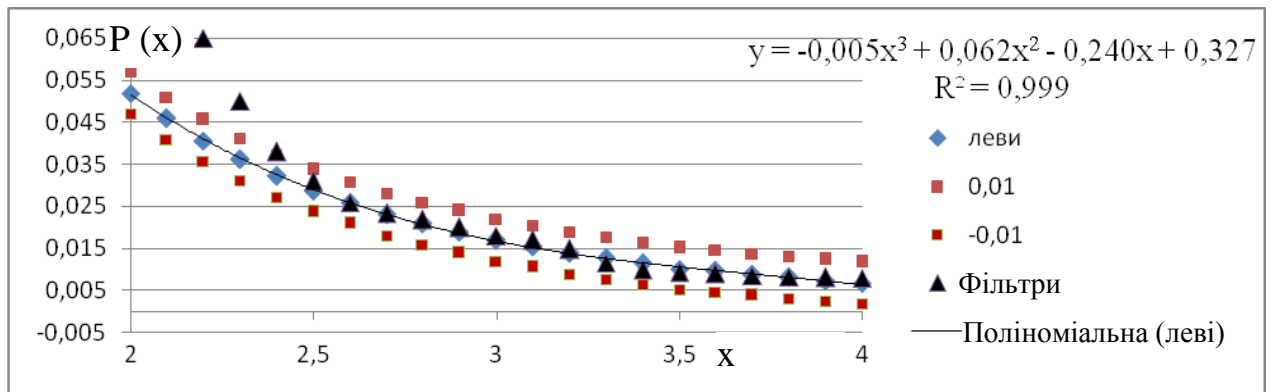
На другому етапі визначення області притягання одного з граничних законів необхідно перевірити асимптотичне поведіння «хвостів» розподілу досліджуваної випадкової величини.

На рис. 3.32 подані щільності розподілу експериментальних даних і граничного закону розподілу з характеристичним показником  $\alpha = 1$ . Асимптотична поведінка «хвоста» щільності розподілу експериментальних даних добре апроксимуються в діапазоні від 2 до 5 СКВ стійким законам за критерієм найменших квадратів.

Таким чином, аналіз суми незалежних випадкових величин, що характеризує вихідний сигнал оптико-електронних систем, які використовують ослаблювач, показав, що граничні закони розподілу вихідних сигналів належать областям притягання стійких законів.



а)



б)

Рисунок 3.32 – Апроксимація експериментальних даних стійкими законами; а) ослаблювач  $k = 5$ ; б) ослаблювач  $k = 10$

Стохастична поведінка вихідних сигналів може визначатися на основі моделі взаємодії фотонів вхідного випромінювання з оптичною ланкою оптико-електронної системи. Опис і прогнозування властивостей оптичної ланки в основному ґрунтується на визначенні детермінованих параметрів, тобто коефіцієнтах заломлення, відбиття, поглинання.

При описі процесу взаємодії оптичного випромінювання з оптичною ланкою, оптичне скло переважно розглядається з погляду макроскопічної теорії впорядкованості і симетрії. Однак, описуючи взаємодію квантів світла з матеріалом оптичного скла, необхідно врахувати, що в таких матеріалах мо-

же виникати просторова розупорядкованість, викликані наявністю хаотично розташованих дефектів, які виникають як наслідок атмосферних впливів і процесів старіння, а також стохастичного розміщення центрів забарвлення в оптично щільних матеріалах (наприклад, нейтральних фільтрах). Невпорядковані матеріали на мікроскопічному рівні принципово неоднорідні й можуть бути різними за структурою. У різних ділянках макроскопічно однорідного оптичного скла процеси трансформації енергії фотонів можуть викликати додаткові флуктуації.

У нелінійних статистично неоднорідних середовищах розміщення й орієнтацію окремих частинок (дефектів) можна вважати невідомими. Характеризуючи взаємодію оптичного випромінювання з нерегульованими структурами (наприклад, оптичною ланкою), можна уявити, що фотони входять в аморфний матеріал, розсіюються, відбиваються, поглинаються, активують коливальні процеси (фотон-фононна взаємодія) всередині і виходять із протилежного боку. Описати процес проходження випромінювання всередині матеріалу досить складно (рис. 3.33)

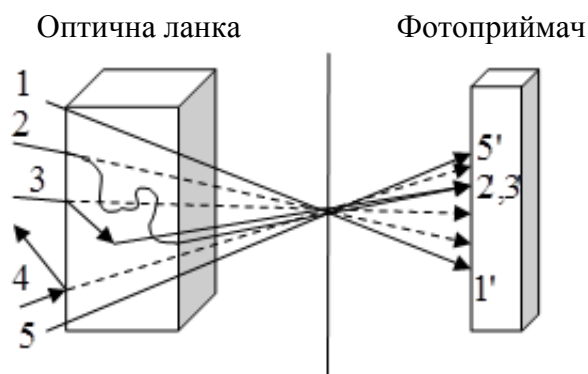


Рисунок 3.33 – Формування просторового розподілу оптичного випромінювання в площині фотоприймача

Такий процес можна описати як випадкове блукання, при якому фотон, долаючи відстань в аморфній речовині, може втратити частину своєї енергії під час поглинання, змінити напрямок руху при взаємодії з дефектами скла. Фотон, проходячи через ґрати аморфної речовини, може порушити в ній фо-

нон, витратити при цьому частину своєї енергії, внаслідок чого його частота зменшується, і виникають кванти іншої енергії. Якщо в речовині вже був збуджений фонон, фотон, що пролітає, може поглинути його, збільшуючи за рахунок цього свою енергію, і виникають фотони з більшою енергією. Тому внаслідок виходу фотонів із матеріалу оптичне випромінювання матиме меншу інтенсивність й інший спектральний склад. Атмосферний вплив і процеси старіння скла можуть змінити коефіцієнти розсіювання і відбиття, це, в свою чергу, може привести до того, що світло входить у матеріал, багато разів відбивається всередині, змінює свою траєкторію руху і виходить назовні не в очікуваному місці, порушуючи при цьому принцип лінійної суперпозиції.

Таким чином, процес взаємодії фотонів з оптичною ланкою системи можна рандомізувати не тільки за рівнем інтенсивності та частотним складом вхідного і вихідного сигналів, але й за траєкторією проходження через оптичну ланку, і, як наслідок, просторово-часовим розподілом оптичного випромінювання в площині фотоприймача.

У таблиці 3.2 наведено порівняльний аналіз імовірностей появи подій для нормованих і центрованих величин, отриманих під час експериментальних досліджень і граничних законів розподілу.

Статистичні моделі вихідних сигналів, що ґрунтуються на законах Пуассона і Гаусса й застосовуються для опису вихідних сигналів, добре узгоджуються з експериментальними даними в діапазоні до 4 СКВ для систем, в яких не використовують нейтральні фільтри як ослаблювачі вхідного сигналу. У діапазоні від 5 СКВ і більше асимптотика вихідного закону розподілу сигналу стає ближчою до  $\alpha$  – стабільного закону з характеристичним показником  $\alpha=2$ . Очевидно, що використання моделей вихідних сигналів на основі законів Пуассона і Гауса для виявлення об'єктів може спричинити помилки, якщо поріг виявлення буде обраний у діапазоні, який перевищує 5 СКВ.

Таблиця 3.2.

Імовірності появи події для різних нормованих і центрованих законів розподілу й експериментальних даних

Х, СКВ	Без ослаблювачів	Нормальний розподіл	Стійкий закон $\alpha = 2$	Стійкий закон $\alpha = 1$	Стійкий закон $\alpha = 0.5$
Імовірність появи події					
2 $\sigma$	$4 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$
3 $\sigma$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
4 $\sigma$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$
5 $\sigma$	$1.6 \cdot 10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Х, СКВ	Ослаблювач k = 5	Нормальний розподіл	Стійкий закон $\alpha = 2$	Стійкий закон $\alpha = 1$	Стійкий закон $\alpha = 0.5$
Імовірність появи події					
2 $\sigma$	$8 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$
3 $\sigma$	$3.5 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
4 $\sigma$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$
5 $\sigma$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1.4 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Х, СКВ	Ослаблювач k = 10	Нормальний закон	Стійкий закон $\alpha = 2$	Стійкий закон $\alpha = 1$	Стійкий закон $\alpha = 0.5$
Імовірність появи події					
2 $\sigma$	$8 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$
3 $\sigma$	$1 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
4 $\sigma$	$8 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$
5 $\sigma$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$

Асимптотичне поведження функції розподілу вихідних сигналів в оптико-електронних системах з обмеженим динамічним діапазоном варіюється залежно від нейтрального коефіцієнта поглинання фільтра. Зі збільшенням коефіцієнта поглинання густини ймовірності вихідних сигналів потрапляють в області притягання стійких законів із характеристичним індексом  $0 < \alpha < 2$ .

Таким чином, при реєстрації оптичного випромінювання, з оптико-електронних систем може бути прийнята модель вихідних сигналів, побудо-

ваних на стійких законах. Використання такої моделі дозволить уникнути конфлікту між експериментальними даними і прийнятими математичними моделями вихідних сигналів, і може бути теоретичною основою для створення високоефективних алгоритмів оброблення сигналів.

У результаті проведення експерименту отримані щільності розподілу вихідних сигналів без застосування ослаблювачів і з використанням нейтральних фільтрів у складі системи (рис. 3.34).

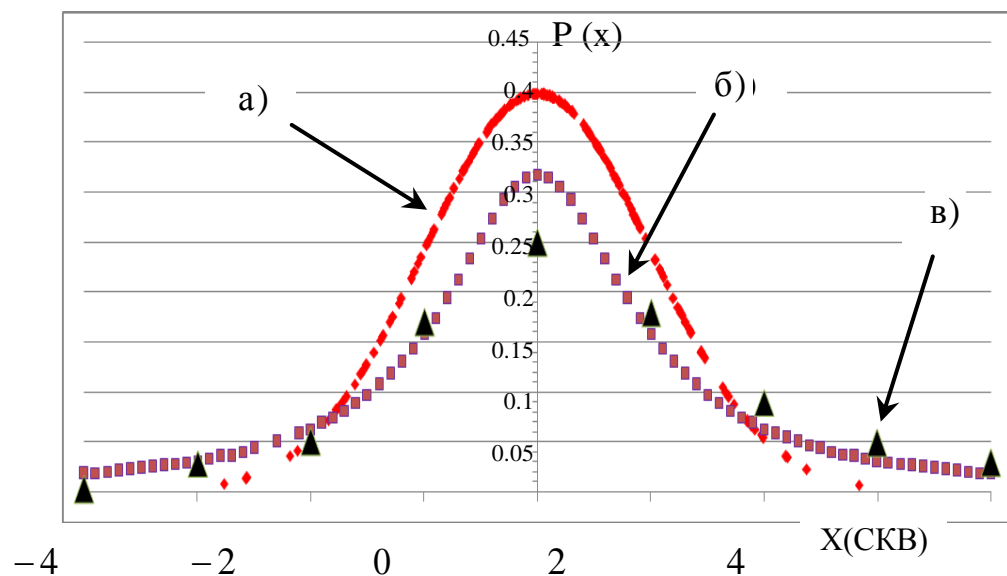


Рисунок 3.34 – Щільності розподілу імовірності вихідних сигналів

а) нормальний закон розподілу; б) стійкий закон  $\alpha = 1$ ;

в) експериментальні результати послаблення сигналів в оптико-електронних системах, які використовують нейтральні фільтри

Результати аналізу здійснених експериментальних досліджень процесу послаблення оптичних потоків в оптико-електронних системах, які передбачали вивчення статистичних характеристик вихідних сигналів оптико-електронних систем при використанні різних нейтральних фільтрів для послаблення вхідних оптичних потоків, дають можливість схарактеризувати залежність граничного закону розподілу флуктуацій вихідного сигналу від коефіцієнта послаблення нейтрального фільтра  $k$ , що входить до складу оптичної ланки системи (рис. 3.35).

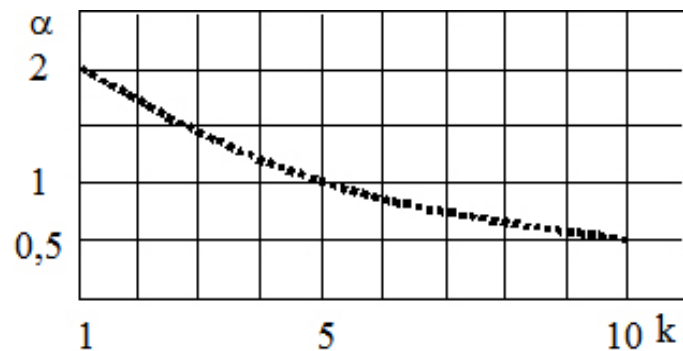


Рисунок 3.35 – Експериментальна залежність характеристичного показника  $0 < \alpha < 2$  та коефіцієнта ослаблення оптичної ланки  $k$

Дослідження асимптотичної поведінки хвостів щільності розподілу вихідних сигналів оптико-електронних систем показали можливість використання стійких законів розподілу для опису вихідних сигналів оптико-електронних систем, а також можливість встановлення залежності характеристичного показника  $0 < \alpha < 2$  і коефіцієнта послаблення оптичної ланки  $k$  [136] – [140].

Матеріали підрозділів 3.4 – 3.8 опубліковані в [136], де автор запропонував використовувати для опису флуктуацій сигналу оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном математичний апарат, що описує процес формування випадкової величини на основі узагальнених граничних теорем; у [139], де дисертантка висунула пропозицію щодо проведення аналізу вихідних сигналів в оптико-електронних системах з обмеженим динамічним діапазоном на основі методики розрідження пуассонівських потоків; матеріали підрозділів повністю викладені в [137], [138], [140].

### 3.9. Формування вихідного сигналу оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном

Вихідний сигнал оптико-електронних систем, як зазначалося в Розділі 2 (п. 2.5), схарактеризований як стохастичний процес.

Проведені в Розділі 3 досліді, виконані з урахуванням додаткових фізичних чинників, що впливають на формування стохастичного процесу – вихідного сигналу оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном, і дозволяють застосувати статистичну модель сигналу на основі стійких законів розподілу з характеристичним коефіцієнтом  $0 < \alpha < 2$ .

Вихідний сигнал оптико-електронних систем являє собою адитивну суміш фонових і сигнальних складових. У роботах [14], [23] – [25], [135] моделі шуму містять опис впливу постійної і флуктуаційної складових. Постійна складова характеризує просторові зміни інтенсивності випромінювання в площині фотоприймача, флуктуаційна складова характеризує просторово-часові зміни.

Часові зміни виявляються у вихідному сигналі як некорельовані від реалізації до реалізації відклики елементів розділення (розрізнення) фотоприймача. Розрахунок статистичних та енергетичних параметрів шуму проводиться для елемента розділення (розрізнення) фотоприймача й усереднюється за всією площиною фотоприймача. Дисперсія шуму  $\sigma_{\text{ш час}}^2$ , зумовлена часовими змінами, як показано в [14], [135], визначається виразом:

$$\sigma_{\text{ш час}}^2 = \overline{(n_{ij} - \bar{n}_{ij})^2} = \overline{n_{ij}^2} - \bar{n}_{ij}^2, \quad (3.40)$$

де  $n_{ij}$  – кількість фотоелектронів, сформованих в елементі розділення (розрізнення).

Дисперсія шуму, зумовлена часовими змінами, являє собою суму доданків:

$$\sigma_{\text{швр}}^2 = \sigma_{\text{шфот}}^2 + \sigma_{\text{штем}}^2, \quad (3.41)$$

де  $\sigma_{\text{шфот}}^2$  – дисперсія, зумовлена флуктуаціями числа реєстрованих фотонів;

$\sigma_{\text{штем}}^2$  – дисперсія, зумовлена внутрішніми шумами фотоприймача (темновий шум).

Дисперсія шуму, зумовлена просторовими змінами  $\sigma_{\text{шпр}}^2$ , оцінюється як частина середнього за простором значення вихідного сигналу  $\bar{u}_{ij}$  в разі рівномірної освітленості фотоприймача. Ця частина має назву неоднорідності  $V$  і визначається, як показано в [14], [135], виразом:

$$V = \frac{\sigma_{\text{шпр}}}{\bar{u}_{ij}}. \quad (3.42)$$

Основні джерела просторового шуму: різні нелінійності елементів розділення (розрізнення) фотоприймача; внутрішні шуми матриці; неоднорідності спектральної чутливості і квантової ефективності.

Дисперсія вислідного шуму – це сума дисперсій часових і просторових змін:

$$\sigma_{\text{ш}\Sigma}^2 = \sigma_{\text{швр}}^2 + \sigma_{\text{шпр}}^2. \quad (3.43)$$

Згідно з прийнятими статистичними моделям вихідних сигналів в оптико-електронних системах вихідний стохастичний потік описується пуассонівським законом розподілу, а функція передавання і сигналу кожного елемента розділення (розрізнення) має лінійний характер. При цьому, як стверджується в [14], [23] – [25], [135], встановлюється детермінований зв'язок між стохастичним вхідним потоком (оптичним сигналом) і стохастичним вихідним потоком (сигналом із виходу фотоприймача) зі збереженням пуассонівської статистики.

Однак проведені дослідження статистичних характеристик вихідних сигналів оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном, що використовують у своєму складі ослаблювачі, показали змінювану статистику вихідних потоків, і, як наслідок, неспроможність застосування загальноприйнятих статистичних моделей на основі пуассонівської статистики.

Стохастичний процес формування вихідного сигналу необхідно описувати з урахуванням фізичних процесів, що виявляються при взаємодії оптичного випромінювання з оптичною ланкою.

Характеристики оптичних ланок систем, такі, як коефіцієнти поглинання, відбиття, пропускання та їх стохастичний характер впливають на просторово-часовий розподіл флуктуаційної складової шуму. Дисперсію, зумовлену впливом стохастичних характеристик оптичних ланок  $\sigma_{\text{ол}}^2$  можна подати як суму:

$$\sigma_{\text{ол}}^2 = \sigma_{\text{проп ол}}^2 + \sigma_{\text{пог ол}}^2 + \sigma_{\text{отр ол}}^2, \quad (3.44)$$

де  $\sigma_{\text{проп ол}}^2$  – дисперсія, зумовлена коефіцієнтом пропускання оптичної ланки;

$\sigma_{\text{пог ол}}^2$  – дисперсія, зумовлена коефіцієнтом поглинання оптичної ланки;

$\sigma_{\text{отр ол}}^2$  – дисперсія, зумовлена коефіцієнтом відбиття оптичної ланки.

Таким чином, вислідну дисперсію шуму можна записати як суму дисперсій (3.39), зумовлених впливом параметрів випромінювання та темнових шумів фотоприймача і дисперсії (3,40), зумовленої впливом оптичної ланки:

$$\sigma_{\text{ш}\Sigma}^2 = \sigma_{\text{швр}}^2 + \sigma_{\text{шпр}}^2 + \sigma_{\text{ол}}^2. \quad (3.45)$$

Основними критеріями оцінювання ефективності оптико-електронних систем є величина відношення сигнал/шум й імовірнісні характеристики виявлення. За виразом (3.30) і отриманою вислідною дисперсією шуму (3.45), формулу для обчислення для величини відношення сигнал/шум необхідно записати так:

$$\varphi = \frac{\bar{n}_{C+\Pi} - \bar{n}_{\Pi}}{\sqrt{\sigma_{C+\Pi}^2 + \sigma_{\text{шфот}}^2 + \sigma_{\text{штем}}^2 + \sigma_{\text{шпр}}^2 + \sigma_{\text{ол}}^2}}, \quad (3.46)$$

де  $\bar{n}_{C+\Pi}$  – середнє значення адитивної суміші сигналу і перешкоди;

$\bar{n}_{\Pi}$  – середнє значення складової перешкод;

$\sigma_{C+\Pi}^2; \sigma_{\text{швр}}^2; \sigma_{\text{шпр}}^2; \sigma_{\text{оз}}^2$  – дисперсії адитивної суміші сигналу і перешкоди, а також складові вислідної шумової складової відповідно.

Аналіз виразу (3.46) показує, що ефективність оптико-електронної системи може бути обмежена в різних енергетичних режимах роботи:

1. Режим обмеження внутрішніми шумами фотоприймача, який визначається  $\sigma_{\text{штем}}^2$ . У цьому режимі величина відношення сигнал/шум лінійно залежить від рівня сигнальної складової.

2. Режим обмеження просторовою нерівномірністю шуму, який визначається  $\sigma_{\text{шпр}}^2$ . Якщо дисперсія просторових змін шуму більша за інші складові, максимальне значення величини відношення сигнал/шум, яке може бути досягнуто, визначається як  $1/V$  (3.42).

3. Режим обмеження флуктуаціями кількості реєстрованих шумових фотонів  $\sigma_{\text{шфот}}^2$ .

4. Режим обмеження складом і якістю *оптичної ланки*, визначається  $\sigma_{\text{оз}}^2$ .

### 3.10. Межі застосування статистичних моделей вихідних сигналів оптико-електронних систем

Виявлення і дослідження нових станів і нових статистичних властивостей випромінювання – закономірний етап у розвитку оптики і теорії оптико-електронних приладів у цілому.

Незважаючи на широке використання пуассонівської і гауссової моделей для опису вихідних сигналів і пов'язане з їхньою відносною простотою і можливістю отримання аналітичних результатів, адекватний опис реальних процесів вимагає врахування впливу аномальних викидів при реєстрації оптичного випромінювання і флуктуацій коефіцієнтів передавання приймальних трактів оптико-телевізійних систем.

Одним із шляхів розвитку систем з обмеженим динамічним діапазоном є вдосконалення статистичних моделей вихідних сигналів, що дозволяють враховувати процеси взаємодії вхідного випромінювання з оптичною ланкою. Необхідно враховувати густину ймовірності досліджуваних сигналів, що підпорядковуються узагальненим граничним теоремам. Ігнорування наявності флуктуацій вхідного сигналу, які можна характеризувати як наявність великої події у вибірці, використання пуассонівської і гауссової статистики при апроксимації розподілів вихідних сигналів може спричинити значні систематичні помилки. Якщо сучасні методи виявлення сигналів в умовах апріорної невизначеності досить ефективні для пуассонівської і гауссової статистики, то аномальні викиди в прийнятому оптичному полі можуть істотно викривлювати оцінні характеристики виявлення системи в цілому.

На рис. 3.36 наведене дерево проблем приймання й оброблення оптичних сигналів в оптико-електронних системах.

При розробленні оптимальних і квазіоптимальних алгоритмів виявлення сигналів на тлі перешкод необхідно враховувати імовірнісний характер як сигнальної, так і фонові компонент. Імовірнісний характер вихідних сигналів визначається чинниками, впливом яких можна нехтувати. На флуктуації

сигналу впливають, наприклад, процеси, що відбуваються в трасі поширення оптичного випромінювання у фотоприймальному пристрої, або корпускулярні властивості оптичного випромінювання. Окрім того, вхідне оптичне випромінювання, взаємодіючи з елементами системи, може зазнавати просторово-координатних і просторово-спектральних змін, які впливають на статистичні характеристики вихідних сигналів оптико-електронних систем.

Зміна статистичних властивостей вихідних сигналів, і, як наслідок, вибір статистичної моделі, може вплинути на точність визначення параметрів вихідних сигналів, що не сприятиме забезпеченню потенційної точності при отриманні результатів із найкращими ймовірнісними характеристиками спостережуваних об'єктів та їхні параметрів. На сучасному етапі розвитку оптико-електронних систем основним завданням в оцінюванні потенційних можливостей систем є визначення густини ймовірності та граничних законів розподілу вихідних сигналів.

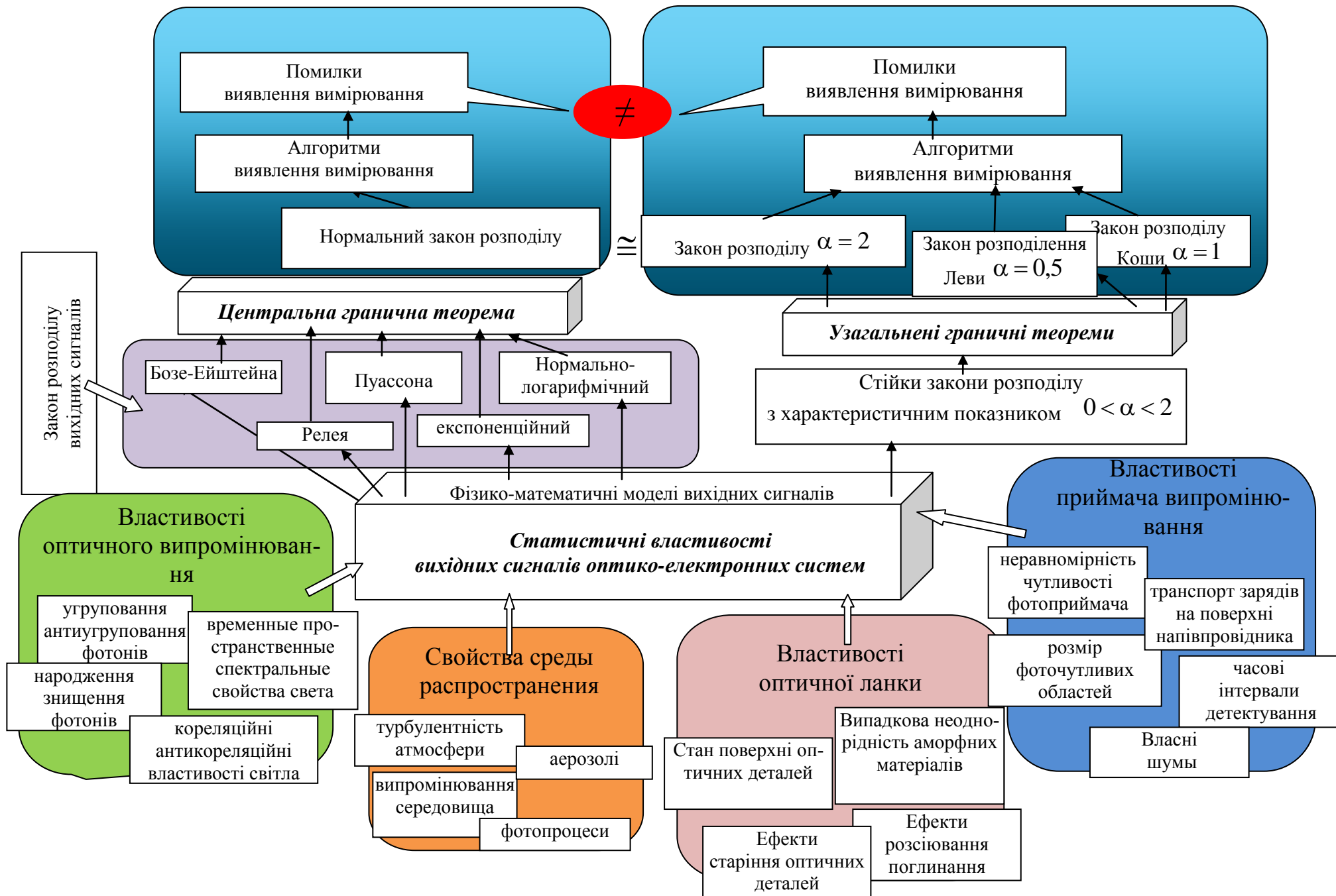


Рисунок 3.36 – Дерево проблем приймання й оброблення оптичних сигналів в оптико-електронних системах

### 3.11 Висновки

У межах науково-технічної проблеми підвищення ефективності оптико-електронних систем за рахунок розвитку математичних моделей і стохастико-детермінованих методів приймання та оброблення сигналів виконане окреслене в дисертаційній роботі завдання – вивчити зміни статистичних характеристик приймальних сигналів оптико-електронних систем на основі пропонованих статистичних моделей взаємодії електромагнітного випромінювання з оптичною ланкою систем.

Умови обмеженості динамічного діапазону вимагають застосування ослаблювачів оптичного випромінювання для забезпечення можливості розширення динамічного діапазону на верхній межі. При використанні ослаблювача статистичні характеристики флуктуаційних складових сигналів і перешкод не збігаються з даними, отриманими при використанні наявних теоретичних методів приймання й оброблення сигналів пропорційно коефіцієнту ослаблення  $k$ . Урахування додаткових чинників, що впливають на формування вихідного сигналу й опис стохастичної поведінки вихідного сигналу на основі узагальнених граничних теорем уможливили визначення єдиного підходу до оцінювання впливу ослаблювачів на статистичні властивості сигналів і ефективність роботи оптико-електронної системи в цілому.

Результати вивчення процесу послаблення оптичного випромінювання дають підстави для таких висновків:

1. Застосування різних теоретичних методів опису вхідних сигналів *не дозволяє* однозначно оцінити ефективність оптико-електронних систем за критерієм величини відношення сигнал/шум. При використанні хвильового опису коефіцієнт поглинання фільтрів не впливає на ефективність системи [43], [139].

2. Використання теоретичних методів, що ґрунтуються на корпускулярній теорії і характеристиці сигналів на основі пуассонівської статистики, дозволило врахувати характер взаємодії оптичного випромінювання з елемен-

тами оптичної ланки оптико-електронної системи з обмеженим динамічним діапазоном. Застосування такої моделі дало змогу врахувати коефіцієнт поглинання фільтрів при оцінюванні ефективності системи як детермінований параметр, і визначити залежність зміни величини відношення сигнал/шум від коефіцієнта поглинання фільтра, як [43], [136], [139], [145].

3. Здійснений аналіз статистичних характеристик вихідних сигналів і основних характеристик оптичних ланок оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном засвідчив, що коефіцієнти поглинання, відбиття і заломлення не є детермінованими параметрами. При формуванні вихідного сигналу оптико-електронних систем можуть порушуватися умови лінійності, інваріантності, фізичної здійсненності і стійкості, і цим змінювати просторово-часові й енергетичні характеристики вихідних сигналів. Зареєстровані окремі флуктуації інтенсивності, що мали значення ймовірності появи такої події вищі, ніж визначено пуассонівською статистикою і центральною граничною теоремою [67], [138], [140].

4. Проведені експериментальні дослідження статистичних характеристик вихідних сигналів оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном показали, що статистичні характеристики флуктуації сум випадкових величин (амплітуд вихідних сигналів), залежно від розміру вибірки  $N$ , не стабілізуються при  $N \rightarrow \infty$ , другий момент досліджуваної випадкової величини прямує до нескінченності. Отже, використання гаусової статистики як граничного розподілу не є оптимальним для подальших розрахунків ефективності систем за різними критеріями [47].

5. Вивчення асимптотичного поведіння «хвостів» розподілу, експериментальних даних для вихідних сигналів оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном показало, що асимптотика «хвостів» має обернено-степеневу залежність, що характерно для сім'ї стійких законів із характеристичним коефіцієнтом  $0 < \alpha < 2$ . Це є підставою для використання цих законів як граничних при оцінюванні потенційних можливостей оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном [65], [66], [137].

6. Визначено області притягання граничних розподілів для експериментальних даних, що характеризують вихідні сигнали оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном, які використовують оптичні фільтри з різними коефіцієнтами поглинання. Встановлена емпірична залежність між коефіцієнтом послаблення оптичної ланки, асимптотичним поведінням «хвостів» щільності розподілу і граничними законами розподілу.

7. Експериментально встановлено, що ефективність оптико-електронної системи з обмеженим динамічним діапазоном за критерієм величини відношення сигнал/шум може бути обмежена в різних енергетичних режимах роботи не тільки шумами фотоприймача, а й складом і якістю оптичної ланки (3.46).

8. Межі застосування статистичної моделі вихідних сигналів оптико-електронних систем зумовлені багатьма чинниками, до яких зараховують енергетичні співвідношення сигналу і перешкоди, динамічний діапазон системи, умови поширення оптичного випромінювання, якість і характеристики оптичної ланки, характеристики приймача випромінювання, а також використувані критерії ефективності системи.

Необхідно використовувати моделі стохастичної поведінки флуктуацій сигнальної і фонові компонент на основі різних граничних законів розподілу, оскільки нехтувати впливом таких чинників, як ефекти старіння оптичного скла, наявність послаблювальних елементів, високий ступінь турбулентності атмосфери, на статистичні властивості вихідних сигналів неможливо.

Результати здійснених теоретичних і експериментальних досліджень вихідних сигналів оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном дали можливість сформулювати *нове наукове положення*:

у частині перетворення вхідного оптичного випромінювання оптичною ланкою отримала подальший розвиток теорія стохастико-детермінованої прийому та обробки сигналів в оптико-електронних системах, а саме: для опису перетворення стохастичних сигналів оптичною системою розроблена нова математична модель вихідного сигналу в оптико-електронних системах з об-

меженим динамічним діапазоном при формуванні просторово-часового розподілу оптичного випромінювання в площині фотоприймача на основі корпускулярної теорії світла і статистичної теорії потоків. Відмінністю є те, що модель враховує залежність граничних законів розподілу флуктуацій вихідного сигналу від коефіцієнта послаблення нейтрального фільтра, включеного до складу оптичної ланки системи.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Запропонований статистичний підхід до аналізу вихідних сигналів об'єднує різні фізичні й математичні основи і, може стати підґрунтям для визначення потенційних можливостей оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном залежно від якості оптичної ланки.

2. Розглянутий підхід може застосовуватися для аналізу структури скла, виявлення дефектів, утворених у процесі старіння, й оцінювання потенційних можливостей оптико-електронних систем у цілому, зокрема, для виявлення гранично-слабких оптичних сигналів на тлі перешкод.

3. Використання граничних розподілів при описі вихідних сигналів оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном уможливить визначення характеристик виявлення сигналів, які перебувають на межі динамічного діапазону системи.

Такий підхід до статистичного опису флуктуаційних складових дозволить оптимізувати енергетичні розрахунки при прийманні складних оптичних сигналів, що мають різні просторові і часові характеристики в оптико-електронних системах, а також проаналізувати методи покращення якості зображень з урахуванням положень узагальнених граничних теорем.

Питання, пов'язані з виявленням і обробленням сигналів в оптико-електронних системах з обмеженим динамічним діапазоном на основі отриманого наукового положення, будуть обговорюватися в Розділі 5 в п.п 5.2 – 5.5.

## 4 РОЗДІЛ

### СТОХАСТИЧНІ МОДЕЛІ ВИХІДНИХ СИГНАЛІВ, ЯКІ ВРАХОВУЮТЬ ВЗАЄМОДІЮ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З ЕЛЕМЕНТАМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ З ОБМЕЖЕНИМ ДИНАМІЧНИМ ДІАПАЗОНОМ

**Мета.** Описати статистичні властивості вихідних сигналів оптико-електронних систем, що враховує стохастичний характер взаємодії вхідного випромінювання з елементами оптико-електронного тракту на межі динамічного діапазону.

Для досягнення поставленої мети вивчені процеси формування вихідних сигналів на основі умовно пуассонівських потоків зі зміненою дисперсією, яким притаманні властивості групованих потоків; розроблена статистична модель сигналів при реєстрації надслабкого випромінювання на прикладі фотометричних систем; створена статистична модель сигналів при реєстрації випромінювання великих інтенсивностей оптико-електронною системою, що входить до складу акустооптичних аналізаторів спектра. Матеріали розділу опубліковані в [14], [143], [145], [146], [154] – [156].

Розділ покликаний розкрити сутність виконання визначеного в роботі завдання: дослідити вплив середовища розповсюдження та фотоприймачів на ефективність оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном; розробити математичні моделі взаємодії електромагнітного випромінювання з елементами оптико-електронної системи, що розширюють динамічний діапазон і підвищують ефективність систем.

Електромагнітне випромінювання, взаємодіючи з середовищем, оптичною ланкою і фотоприймачем може змінювати, як енергетичні і спектральні, так і статистичні характеристики. У попередньому розділі вивчені зміни статистичних характеристик випромінювання при взаємодії його з оптичною ланкою. Залежно від складу оптико-електронної системи й енергетичних характеристик – як сиг-

нальної, так і фонові складові – вихідний сигнал може зазнавати зміни.

Наприклад, особливістю реєстрації електромагнітного випромінювання, що характеризується енергетичними характеристиками, які перебувають на межі динамічного діапазону оптико-електронних систем, є спостереження окремих сплесків інтенсивності в площині фотоприймача. У цьому розділі розглянута специфіка реєстрації випромінювання, що супроводжується нелінійними ефектами при формуванні сигналу в площині фотоприймача оптико-електронної системи. До таких процесів можна віднести формування вихідного сигналу на прикладі фотометричних систем при реєстрації надслабкого випромінювання і формування сигналу при реєстрації випромінювання великої інтенсивності на прикладі оптико-електронної системи, що входить до складу акустооптичних аналізаторів спектра.

В основі статистичного опису вихідних сигналів (як було розглянуто в Розділі 2) лежить пуассонівський закон розподілу дискретних подій, якому притаманні властивості, однією з яких є відсутність кореляцій між подіями. Оскільки при формуванні вихідних сигналів спостерігалися нелінійні ефекти, пов'язані з наглядом подій групами, вважаємо за доцільне проаналізувати можливості математичного апарату, що дозволяє описати процес формування групованих сигналів. А також з'ясувати причини, які проявляються зі зміною інтенсивності сигналу, і врахувати додаткові чинники в статистичних моделях сигналів і алгоритмах оброблення сигналів.

**Формування стохастичного процесу.** Відповідно до моделі сигналів в оптико-електронних системах на основі корпускулярної теорії, розглянутої в Розділі 2, вихідний сигнал потрактований як стохастичний процес формування випадкової величини. Випадкові величини виникають як наслідок великої кількості малих неконтрольованих впливів, які з імовірністю, близькою до одиниці, можна розглядати як малі випадкові величини.

Відклик фотоприймача – випадкова величина  $X$  формується, як результат цих окремо малих впливів  $X_1 \dots X_n$ . Сумарний вплив на величину  $X$  можна записати як функцію:

$$X = T(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n).$$

За умови малих впливів випадкових чинників  $X_j$  сумарний вплив можна вважати лінійною функцією.

Стохастичний процес є способом визначення випадкової функції  $X(t)$  часу  $t$  із втручанням випадковості в кожну мить: яким би не був розглянутий момент часу  $t_1$  і як би мало не було  $\tau$ , значення  $X(t)$  від початкового моменту  $t_0$  і до моменту  $t_1$  не визначає значення цієї функції в наступному інтервалі  $(t_1, t_1 + \tau)$  – ці значення залишаються випадковими.

Пуассонівський процес – математична модель випадкової послідовності подій – є математичним поняттям, якому важко знайти фізичне явище, що повністю буде з ним узгоджуватися. Достатність узгодження конкретної послідовності з пуассонівським процесом встановлюється емпірично з різним ступенем достовірності.

Наприклад, формування вихідного сигналу в оптико-електронних системах. Уявімо, що випадковою подією є енергія випромінювання, що потрапляє на вхід оптико-електронної системи. Якщо енергія випромінювання залишається постійною, такий процес буде добре описуватися пуассонівським процесом.

Однак випадкові події, які зареєстрував фотоприймач, можуть не утворювати пуассонівський процес. Це відбувається через наявність часу реєстрації електромагнітного випромінювання, а саме: існують періоди часу, які йдуть безпосередньо за кожною зареєстрованою подією, упродовж яких подальші події не можуть бути зареєстровані. Також можуть виявлятися ефекти взаємодії електромагнітного випромінювання з середовищем [117].

Таким чином, формування випадкової величини – вихідного сигналу оптико-електронних систем можна схарактеризувати як нестационарний потік подій, який не має властивостей пуассонівського потоку. Це зумовлює необхідності описати цей стохастичний процес за допомогою умовно пуассонів-

ських потоків. Те, що властивості пуассонівського потоку фізично не зберігаються, можна пояснити наявністю зв'язку між просторово-часовими властивостями появи відклику фотоприймача. Це означає, що умова 3 (с. 53) не буде виконуватися для послідовності зареєстрованих подій.

Розглянемо процес формування сигналу в оптико-електронних системах з урахуванням процесів взаємодії електромагнітного випромінювання з середовищем і з фотоприймачем. Оптична ланка оптико-електронних систем у цих дослідженнях описується детермінованими параметрами.

#### 4.1. Статистичні властивості розсіяного світла

Світло, розсіяне внаслідок статистичних флуктуацій різного походження, а також на макромолекулах і частинках, здійснює броунівський рух і має статистичну природу. Статистичний опис електромагнітного випромінювання ґрунтується на традиційному методі вимірювання інтенсивності потоків (лічення кількості фотонів).

Складність опису взаємодії електромагнітного поля з матеріальною системою залежить як від характеристик розсіяного середовища, так і від частоти й інтенсивності випромінювання. Якби фотони були незалежними частинками, то їхня кількість підпорядковувалося б розподілу Пуассона за умови використання джерела, яке здійснює хаотичне випромінювання.

У [34] відзначають, що використання пуассонівського розподілу передбачає відсутність флуктуацій і, отже, відсутність кореляції вимірюваних інтенсивностей. Фотони поведуться як нерозрізніювані частинки, тому існують лише стани, симетричні стосовно їхніх місць появи. Це призводить до появи тенденції до угруповання фотонів. Якщо кожний фотон уявити як певний хвильовий пакет, то стає зрозумілим, що угруповання може виникнути, лише при частковому перекритті різних пакетів. Нерозрізненість фотонів відіграє істотну роль тільки тоді, коли вони зареєстровані за час  $T < 1/\Delta\nu$ ,  $\Delta\nu$  – ши-

рина спектра випромінювання.

Для опису електромагнітного поля звичайних джерел світла, які прийнято називати хаотичними і яким притаманні спільні властивості, макроскопічне поле випромінювання може бути потрактоване як сума великої кількості схожих статистично незалежних мікроскопічних доданків: використовують гауссову форму подання [34]:

$$P(\{\alpha_k\}) = \prod_k \frac{1}{\langle n_k \rangle} \exp\left(-\frac{|\alpha_k|^2}{\langle n_k \rangle}\right), \quad (4.10)$$

де  $\langle n_k \rangle$  – середня кількість фотонів.

Розподіл фотовідліків для хаотичного поля для випадку, коли час лічення  $t$  значно менший за обернену ширину спектра, випромінювання описано розподілом Бозе-Ейнштейна [34]:

$$p(m, t) = \frac{\langle m \rangle^m}{(1 + \langle m \rangle)^{m+1}}. \quad (4.11)$$

Р. Глаубер створив квантову теорію фотодетектування для дослідження фотонних кореляцій і когерентності світла [117]. На основі автокореляційної функції фотоструму  $K(\tau)$  дослідник проаналізував статистичні характеристики випромінювання й увів терміни «угруповання» фотонів і «антигруповання» фотонів.

Угруповання фотонів означає переважання кількості парних збігів при малому часі  $\tau$  над випадковими, тобто відповідним відсутності кореляцій фотострумів ( $K(\tau)$  – кореляційна функція фотострумів) від двох джерел:  $K(\tau) > \langle J \rangle^2$  ( $\langle J \rangle^2$  – дисперсія фотоструму). Угруповання фотонів властиве природним джерелами світла. Воно зумовлене інтерференцією хвиль від різ-

них точок джерела. Для лазерного випромінювання в одномодовому стаціонарному режимі при значному перевищенні порога, коли стан поля наближається до глауберівського когерентного стану поля виконується рівняння  $K(\tau) = \langle J \rangle^2$ , тобто немає статистичної залежності актів реєстрації фотонів. Можливі й стани електромагнітного поля з «негативними» парними кореляціями фотонів, тобто антигрупування фотонів, у цьому випадку  $K(\tau) < \langle J \rangle^2$ , тобто умовна ймовірність виявити «другий» фотон слідом за «першим» із малим часом затримки  $\tau$  менша за безумовну ймовірність виявлення фотона.

Ймовірності розподілу фотовідліків  $P(n, t)$ , тобто за час  $t$  буде зареєстровано рівно  $n$  фотоімпульсів. Часові реалізації фотоструму наведені у вигляді послідовностей імпульсів малої тривалості на рисунку 4.1. Розподіл Пуассона  $P(n) = \frac{\langle n \rangle^n}{n!} e^{-\langle n \rangle}$  із середнім  $\langle n \rangle$  і дисперсією  $D(n) = \langle n \rangle$  характерний для опису оптичних систем. Угрупуванню фотонів відповідає нерівність  $D(n) > \langle n \rangle$ , тобто більший, порівняно з пуассонівським розподіл, розкид імпульсів фотоструму, що потрапляють в даний інтервал часу. Антигрупуванню відповідають більш гладкі розподіли імпульсів у часі, якщо  $D(n) < \langle n \rangle$ , то

говорять про субпуассонівську статистику фотонів.

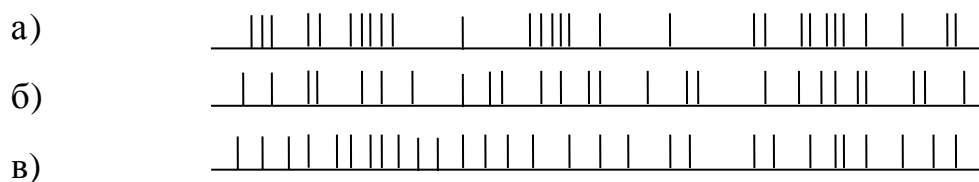


Рисунок 4.1 – Приклади реалізацій імпульсів фотоструму при різних статистичних властивостях випромінювання а) угрупування і надпуассонівська статистика; б) розподіл Пуассона; в) антигрупування і субпуассонівська статистика

У роботі [117] описані експерименти з реєстрації кількості фотонів, які лічильник реєстрував в різні моменти часу. Знайдено розподіли для відліків, отримані за інтервал часу. Для визначення числових характеристик дискретних випадкових величин (розрахунку фотонів) використаний апарат твірних функцій. Твірна функція дала можливість визначити невідомий розподіл відліків фотонів і його моментів. Твірну функцію може передавати вираз:

$$Q(\lambda, t) = \langle (1 - \lambda)^C \rangle,$$

де  $C = \sum_{j=1}^n z_j$  – сума випадкових змінних, що ілюструє повне лічення

фотонів;

$\lambda$  – параметр.

Якщо твірна функція записана цілими значеннями, які набуває  $C$ , то:

$$Q(\lambda, t) = \sum_{n=0}^N (1 - \lambda)^n P(n, t),$$

$P(n, t)$  – імовірність того, що лічильник зареєструє  $n$  фотонів за час  $t$ .

При вивченні статистичних характеристик фотонів, коли поле повністю когерентне, як показано в роботі [117], розподіл відліків буде пуассонівським:

$$p(n, t) = \frac{\langle c \rangle^n}{n!} e^{-\langle c \rangle}.$$

Твірна функція для малих значень часу  $t$ :

$$Q(\lambda, t) = \exp\{-\ln(1 + \lambda \omega t)\} = \frac{1}{1 + \lambda \omega t}.$$

Розподіл імовірності для кількості підрахунків фотонів:

$$p(n, t) = \frac{(\omega t)^n}{(1 + \omega t)^{n+1}},$$

де  $\omega t$  – середня кількість підрахунків фотонів;

$\omega$  – середня швидкість лічення.

Розподіл для короткого часу дається степеневим законом, що не відрізняється від розподілу Планка.

Для часу  $t$ , який значно переважає обернену ширину смуги  $t \gg \gamma^{-1}$ , твірна функція:

$$Q(\lambda, t) = \exp\left\{-\left[\left(\gamma^2 + 2\gamma\omega\lambda\right)^2 - \gamma\right]t\right\} \quad (4.12)$$

Якщо швидкість лічення  $\omega$  мала порівняно з шириною смуги частот  $\omega \ll \gamma$ , то:

$$Q(\lambda, t) = e^{-\lambda\omega t}.$$

Ця функція веде до розподілу Пуассона. Імовірність отримання відліку  $n$  за час  $t$  [117]:

$$p(n, t) = \frac{1}{n!} \left(\frac{\gamma\omega t}{\Gamma}\right)^n S_n(\Gamma t) e^{-(\Gamma-\gamma)t}, \quad (4.13)$$

де  $\Gamma = (\gamma^2 + 2\omega\gamma)^{1/2}$ ;  $S_n$  – функція чутливості фотоприймача.

Цей розподіл має те саме середнє  $\omega t$ , що й розподіл Пуассона. Однак дисперсія завжди значно більша, ніж у розподілі Пуассона через зчеплення фотонів [117]:

$$Q(\lambda, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\lambda\omega t)^n}{n!} S_n(\gamma t).$$

Факторіальні моменти розподілу  $\langle c \rangle = \omega t$  – середнє значення і  $\langle c^2 \rangle - \langle c \rangle^2 = \langle c \rangle \left\{ 1 + \frac{\langle c \rangle}{\gamma t} \right\}$  – дисперсія. Член  $\frac{\langle c \rangle^2}{\gamma t}$  – доповнення до дисперсії

викликане тим, що час появи фотонів не є *статистично незалежним*.

Положення теорії Р. Глаубера уможливили врахування статистичних властивостей випромінювання при різних енергетичних характеристиках реєстрованих сигналів і повинні враховуватися в розробленні статистичних моделей вихідних сигналів, що характеризуються групованими параметрами.

#### 4.2. Потоки групованих точок

У деяких випадках однорідні події можуть спостерігатися групами. Групу можуть утворювати частинки з близькими параметрами. При спостереженні нестационарних потоків із різко вираженою нестационарністю у вигляді сплесків інтенсивності окремі скупчення точок можна ототожнювати з групами, розглядаючи потік у цілому як сукупність груп.

Поняття внутрішньогрупових і загальногрупових параметрів групи складається з параметрів окремих точок, і загальногруповим параметром може виступати координата центру групи (наприклад, середнє значення координат окремих сигналів), ефективна протяжність групи, кількість сигналів у ній.

##### *Поодинокa група.*

Використовуючи математичний апарат, поданий у [34], можна розглянути потік, характеристики якого залежать від одного загальногрупового параметра  $\mu \in G$ , заданого на  $G$  густиною ймовірності  $P(\mu)$ ,  $\mu$  – координата центра групи або координата, що відповідає максимуму інтенсивності потоку.

Нормована умовна густина, що характеризує диференційні ймовірності появи в  $\Omega$  рівно  $K$  точок  $\tau_1, \dots, \tau_K$  за умови, що загальногруповий параметр дорівнює  $\mu$ :

$$\sum_{K=0}^{\infty} \frac{1}{K!} \int_{\Omega_K} \pi_{K|1}(\tau; \Omega | \mu; G) d\tau = 1, \quad (4.14)$$

$\pi_{K|1}(\tau; \Omega | \mu; G)$  характеризує ймовірність появи  $k$  точок із координатами  $\tau_1, \dots, \tau_K$ .

Умовна ймовірність [34]:

$$P_{K|1}(\Omega | \mu; G) = \frac{1}{K!} \int_{\Omega_K} \pi_{K|1}(\tau; \Omega | \mu; G) d\tau, \quad (4.15)$$

залежить від  $\mu$ .

*Потоки, що утворюють поодинокую групу.*

Потік з умовними пуассонівськими характеристиками, для якого умовна інтенсивність складає  $\lambda(\tau | \mu; G)$ , а  $\mu = \{\mu_1, \mu_2, \mu_3\}$  вектор. Перша його координата  $\mu_1 \in \Omega$  відображає опорну точку умовної інтенсивності потоку, друга координата  $\mu_2 \in \Omega$  означає ефективну інтегральну протяжність групи точок, яку можна ввести за умови  $\lambda(\tau | \mu; G) \rightarrow 0 \mid \tau - \mu_1 \mid \rightarrow \infty$ ,  $\mu_3$ , є середнім числом точок у групі і дисперсією цього числа.

Залежність  $\lambda(\tau | \mu; G)$  від  $\mu$  наведена в [34]:

$$\lambda(\tau | \mu; G) = \frac{\mu_3}{\mu_2} \lambda_0\left(\frac{\tau - \mu_1}{\mu_2}\right), \quad (4.16)$$

$\lambda_0(x)$  – відома функція, яка може бути симетричною типу кривої Гауса, симетричної експоненти або кривої Коші.

$$\lambda_0(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } |x| \leq 0,5 \\ 0 & \text{при } |x| > 0,5 \end{cases}$$

$$\lambda_0(x) = \exp\{-\pi x^2\}$$

$$\lambda_0(x) = \exp\{-2|x|\}$$

$$\lambda_0(x) = [1 + (\pi x)^2]^{-1}$$

Ця функція може бути і несиметричною типу усіченої експоненти:

$$\lambda_0(x) = \begin{cases} \exp\{-x\} & \text{при } x \geq 0 \\ 0 & \text{при } x < 0 \end{cases}.$$

Безумовні характеристики потоку з умовними пуассонівськими характеристиками мають відмінні від нуля кореляції всіх порядків, а, отже, не відповідають пуассонівському потоку.

Те, що властивості пуассонівського потоку фізично не зберігаються, пояснено наявністю зв'язку між місцями появи точок через загальногруповий параметр.

Міжгруповий зв'язок здійснюється тільки через загальногрупові параметри, причому відносні показники кожної групи залежать від її загальногрупового параметра. Якщо додатково точки різних груп невідрізнюються однаковими умовними щільностями:

$$\pi_{n_i|1}(\tau; \Omega | \mu_i; G), \quad (4.17)$$

то групи виявляються статистично невідрізнюються.

У цьому випадку вводиться потік груп в області завдання загальногрупових параметрів, що дозволяє описати випадкова кількість груп із випадковим внутрішньогруповим складом.

Для визначення середнього числа і дисперсії точок потоку груп послуговуються виразом [34]: У цьому випадку вводиться потік груп в області  $G$  завдання загальногрупових параметрів, що дозволяє описати випадкова кількість груп із випадковим внутрішньогруповим складом.

$$\langle n \rangle = \Lambda t \lambda \Delta_0 \quad \sigma_n^2 = \Lambda t \lambda \Delta_0 (1 + \lambda \Delta_0),$$

де  $\Lambda = \lambda(\mu)$ ,  $\lambda \Delta_0$  – середнє число точок у групі, що має середню протяжність.

Угруповання точок спричиняє збільшення дисперсії їхньої кількості порівняно з пуассонівським потоком негрупованих точок.

Зростання дисперсії кількості точок зумовлене збільшенням середньої кількості точок у кожній групі.

Наявність піків інтенсивності у вихідному сигналі фотоприймача можна ототожнювати з однорідними подіями, які формуються частинками з близькими параметрами і спостерігаються групами.

Прикладом двох груп, пов'язаних внутрішнім груповим параметром є потік із парними кореляціями, для якого поява події в одній групі підвищує ймовірність появи події в іншій.

4.3. Статистична модель сигналів в оптико-електронних системах при реєстрації надслабкого випромінювання. Парнокорельований потік сигналів

Динамічний діапазон оптико-електронних систем на нижній межі обмежується впливом внутрішніх шумів приймача випромінювання. Розглянуті в п. 4.1 і п. 4.2 властивості оптичного випромінювання, наявність кореляцій між подіями можна покласти в основу розроблення моделі виявлення слабких і надслабких сигналів на тлі внутрішніх некорельованих шумів фотоприймача.

Практичне застосування методів реєстрації надслабких сигналів досить широке. При дослідженні надслабких випромінювань зростають вимоги до

точності і чутливості застосовуваної для реєстрації апаратури [157], [158], [159], [160]. За цих умов найбільш чутливою і точною є методика лічення окремих фотонів.

Використовуємо випадкові потоки подій для моделювання, сигнальних і шумових фотонів на вході, і фотоелектронів – на виході фотодетекторів в оптико-електронних системах для оброблення групових сигналів. При реєстрації надслабкого сигналу фотометричною системою можна прийняти, що одну групу визначають події, пов'язані з появою сигнал, а іншу – події, зумовлені шумовою складовою.

Стохастичний потік може стати парнокорельованим унаслідок накладання сигналів, на інтервалі реєстрації, з апіорно пуассонівським потоком. Виявлення оптичного випромінювання з субпуассонівською статистикою фотонів дозволить підвищити точність оптичних вимірювань [117], що робить актуальним завдання оптимального оброблення непуассонівських, зокрема парнокорельованих сигналів.

У теорії випадкових потоків для групового виявлення враховується не лише кількість подій, а й координати цих подій. Для опису випадкових потоків при аналізі надслабкого випромінювання буде використаний апарат твірних функціоналів і твірних функцій [34]. Математичний апарат твірних функцій в теорії випадкових потоків використовується для спільного синтезу методів виявлення і вимірювання координат потоку подій.

Розглянемо потік подій, який полягає в тому, що в деякій області  $\Omega$  в випадкові моменти часу  $\tau_1 \dots \tau_k$  з'являється (також випадкове число)  $k$  подій ( $k = 0, 1, 2 \dots$ ). Повний імовірнісний опис потоку в області  $\Omega$  найбільш просто й ефективно здійснюється за допомогою твірного функціоналу (ТФЛ):

$$L[u; \Omega] = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \int_{\Omega} d\tau_1 \dots \int_{\Omega} d\tau_k \pi_k(\tau_1 \dots \tau_k; \Omega) [1 + u(\tau_1)] \dots [1 + u(\tau_k)], \quad (4.19)$$

де  $u(\tau)$  – довільна функція в області  $\Omega$ , зазвичай являє собою часовий ін-

тервал  $(0, T)$  або, в більш загальному випадку, об'єднання кількох підобластей.

Функціональні похідні:

$$\pi_k(\tau_1 \dots \tau_k; \Omega) = \frac{\delta^k L[u; \Omega]}{\delta u(\tau_1) \dots \delta u(\tau_k)_{u(\tau)=-1}} \quad (4.20)$$

являють собою симетричні (через нерозрізнюваність подій) за всіма аргументами багатовимірні спільні густини ймовірності появи  $k$  точок (подій) із координатами близько  $\tau_1 \dots \tau_k$  і не появи точок в інших ділянках області  $\Omega$ .

Ймовірності появи на  $\Omega$   $k$  точок безвідносно до моментів їх появи знаходять як:

$$P_k(\Omega) = \frac{1}{k!} \int_{\Omega} d\tau_1 \dots \int_{\Omega} d\tau_k \pi_k(\tau_1 \dots \tau_k; \Omega) \quad (4.21)$$

і задовольняють очевидну умову нормування:

$$\sum_{n=0}^{\infty} P_n(\Omega) = 1. \quad (4.22)$$

Часто більш зручним є розкладання у функціональний ряд логарифма ТФЛ:

$$L[u; \Omega] = \exp \left[ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k!} \int_{\Omega} d\tau_1 \dots \int_{\Omega} d\tau_k g_k(\tau_1 \dots \tau_k) u(\tau_1) \dots u(\tau_k) \right], \quad (4.23)$$

тому що введені тут кореляційні функції потоку

$$g_k(\tau_1 \dots \tau_k) = \frac{\delta^k \ln L[u; \Omega]}{\delta u(\tau_1) \dots \delta u(\tau_k)_{u(\tau)=0}}$$

мають зрозумілий фізичний зміст і відображають тенденцію точок до збли-

ження при позитивних значеннях  $g_k(\tau_1 \dots \tau_k)$  і до взаємного «відштовхування» при негативних.

Підставлення у твірний функціонал  $u(\tau) = z - 1$  дає твірну функцію (ТФ) цього випадкового потоку:

$$\theta(z; \Omega) = L[u; \Omega] \Big|_{u(\tau)=z-1}. \quad (4.24)$$

Розкладанню логарифма ТФЛ у функціональний ряд відповідає розкладання логарифма твірної функції за степенями  $z - 1$ , відповідно:

$$\theta(z; \Omega) = \exp \left[ \sum_{k=0}^{\infty} \frac{G_k(\Omega)}{k!} (z-1)^k \right], \quad (4.25)$$

де

$$G_k(\Omega) = \int_{\Omega} d\tau_1 \dots \int_{\Omega} d\tau_k g_k(\tau_1 \dots \tau_k).$$

Середня кількість і дисперсія кількості точок за результатами спостереження в усій області  $\Omega$  виражаються через перші дві величини  $G_k(\Omega)$  за допомогою  $\bar{n} = G_1(\Omega)$ ,  $\sigma_n^2 = G_1(\Omega) + G_2(\Omega)$ .

Парнокорельованим називається потік, у якого відмінні від нуля тільки дві кореляції нижчих порядків  $g_1(\tau)$  і  $g_2(\tau_1, \tau_2)$ . Його твірний функціонал має вигляд:

$$L[u; \Omega] = \exp \left[ \int_{\Omega} d\tau g_1(\tau) u(\tau) + \frac{1}{2} \int_{\Omega} d\tau_1 \int_{\Omega} d\tau_2 g_2(\tau_1, \tau_2) u(\tau_1) u(\tau_2) \right], \quad (4.26)$$

а твірна функція, відповідно, дорівнює

$$\theta(z; \Omega) = \exp \left[ X_1(\Omega)(z-1) + \frac{1}{2} X_2(\Omega)(z^2 - 1) \right], \quad (4.27)$$

де

$$X_1(\Omega) = G_1(\Omega) - G_2(\Omega), \quad X_2(\Omega) = G_2(\Omega). \quad (4.28)$$

Імовірність  $P_k(\Omega)$  появи  $k$  точок парнокорельованого струму в області  $\Omega$  дорівнюють:

$$P_k(\Omega) = P_0(\Omega) \sum_{i=0}^{[k/2]} \frac{X_1^{k-2i}(\Omega)}{(k-2i)!} \frac{1}{i!} \left( \frac{X_2(\Omega)}{2} \right)^i, \quad (4.29)$$

де ймовірність того, що в області  $\Omega$  не з'явиться жодна точка, дається виразом:

$$P_0(\Omega) = \exp[\chi_0(\Omega)] = \exp \left[ -X_1(\Omega) - \frac{1}{2} X_2(\Omega) \right] = \exp \left[ -G_1(\Omega) + \frac{1}{2} G_2(\Omega) \right]. \quad (4.30)$$

Зокрема, вирази для кількох перших імовірностей мають вигляд:

$$\begin{aligned} P_0 &= P_0 \sum_{i=0}^0 \frac{X_1^{0-2i}}{(0-2i)!} \frac{1}{i!} \left( \frac{X_2}{2} \right)^i = P_0 \left[ \frac{X_1^0}{0!} \right], \\ P_1 &= P_0 \sum_{i=0}^0 \frac{X_1^{1-2i}}{(1-2i)!} \frac{1}{i!} \left( \frac{X_2}{2} \right)^i = P_0 \left[ \frac{X_1^1}{1!} \right], \\ P_2 &= P_0 \sum_{i=0}^1 \frac{X_1^{2-2i}}{(2-2i)!} \frac{1}{i!} \left( \frac{X_2}{2} \right)^i = P_0 \left[ \frac{X_1^2}{2!} + \frac{X_1^0}{0!} \frac{X_2}{2} \right], \\ P_3 &= P_0 \sum_{i=0}^1 \frac{X_1^{3-2i}}{(3-2i)!} \frac{1}{i!} \left( \frac{X_2}{2} \right)^i = P_0 \left[ \frac{X_1^3}{3!} + \frac{X_1^1}{1!} \frac{X_2}{2} \right], \\ P_4 &= P_0 \sum_{i=0}^2 \frac{X_1^{4-2i}}{(4-2i)!} \frac{1}{i!} \left( \frac{X_2}{2} \right)^i = P_0 \left[ \frac{X_1^4}{4!} + \frac{X_1^2}{2!} \frac{X_2}{2} + \frac{X_1^0}{0!} \frac{1}{2!} \left( \frac{X_2}{2} \right)^2 \right], \\ P_5 &= P_0 \sum_{i=0}^2 \frac{X_1^{5-2i}}{(5-2i)!} \frac{1}{i!} \left( \frac{X_2}{2} \right)^i = P_0 \left[ \frac{X_1^5}{5!} + \frac{X_1^3}{3!} \frac{X_2}{2} + \frac{X_1^1}{1!} \frac{1}{2!} \left( \frac{X_2}{2} \right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (4.31)$$

*Визначення завдання.* Нехай на вхід приймального пристрою потрапляє суміш парнокорельованого потоку корисних сигналів, що характеризується твірним функціоналом:

$$L^c[u; T] = \exp \left[ \int_T d\tau g_1^c(\tau) u(\tau) + \frac{1}{2} \int_T d\tau_1 \int_T d\tau_2 g_2^c(\tau_1, \tau_2) u(\tau_1) u(\tau_2) \right], \quad (4.32)$$

і парнокорельованого потоку шумових сигналів, ТФЛ якого записується так:

$$L^w[u; T] = \exp \left[ \int_T d\tau g_1^w(\tau) u(\tau) + \frac{1}{2} \int_T d\tau_1 \int_T d\tau_2 g_2^w(\tau_1, \tau_2) u(\tau_1) u(\tau_2) \right], \quad (4.33)$$

де  $u(\tau)$  – довільна функція на інтервалі  $(0, T)$ ;

функції  $g_1^c(\tau)$ ,  $g_2^c(\tau_1, \tau_2)$  і  $g_1^w(\tau)$ ,  $g_2^w(\tau_1, \tau_2)$  являють собою першу і другу кореляції сигнального і шумового парнокорельованих потоків.

При реєстрації парнокорельованих сигнальних імпульсів у виході фотоприймача при одноразовому відліку на інтервалі спостереження  $(0, T)$  може бути зареєстровано  $k$  подій. Необхідно оптимально оцінити середню кількість подій сигнального потоку  $G_1^c(T)$ , вважаючи відомими середнє число подій шумового потоку  $G_1^w(T)$  і відповідних інтегральних функцій кореляції  $G_2^c(T)$  і  $G_2^w(T)$ .

Якщо апіорна інформація не уточнює результат вимірювань, то оцінювання за критерієм максимуму апостеріорної ймовірності зводиться до обчислення найбільшої правдоподібності, що відповідає точці максимуму логарифма відношення правдоподібності [23]:

$$l = \ln \frac{P_k^{c+w}(T)}{P_k^w(T)}. \quad (4.34)$$

Таким чином, для знаходження оптимальної оцінки  $G_1^c(T)$  необхідно знати апостеріорну ймовірність  $P_k^{c+\psi}(T)$  реєстрації  $k$  подій при спостереженні суміші парнокорельованих сигнального і шумового потоків (фізично очевидно, що ймовірність  $P_k^\psi(T)$  від  $G_1^c(T)$  не залежить).

Для статистично незалежних сигнального і шумового потоків твірний функціонал їхньої суми розраховується множенням парціальних ТФЛ:

$$L^{c+\psi}[u; T] = L^c[u; T] \cdot L^\psi[u; T],$$

З урахуванням (4.32) і (4.33):

$$L^{c+\psi}[u; T] = \exp \left[ \int_T dt g_1^{c+\psi}(\tau) u(\tau) + \frac{1}{2} \int_T dt_1 \int_T dt_2 g_2^{c+\psi}(\tau_1, \tau_2) u(\tau_1) u(\tau_2) \right], \quad (4.35)$$

де

$$\begin{aligned} g_1^{c+\psi}(\tau) &= g_1^c(\tau) + g_1^\psi(\tau), \\ g_2^{c+\psi}(\tau_1, \tau_2) &= g_2^c(\tau_1, \tau_2) + g_2^\psi(\tau_1, \tau_2). \end{aligned} \quad (4.36)$$

Сума двох незалежних парнокорельованих потоків також є парнокорельованим потоком, кореляції якого виражаються через кореляції доданків за допомогою (4.36), а ймовірність  $P_k^{c+\psi}(T)$  визначається

$$P_k^{c+\psi}(T) = P_0^{c+\psi}(T) \sum_{i=0}^{[k/2]} \frac{\left( X_1^{c+\psi}(T) \right)^{k-2i}}{(k-2i)!} \frac{1}{i!} \left( \frac{X_2^{c+\psi}(T)}{2} \right)^i, \quad (4.37)$$

де

$$P_0^{c+\psi}(T) = \exp \left[ -X_1^{c+\psi}(T) - \frac{1}{2} X_2^{c+\psi}(T) \right], \quad (4.38)$$

$$\begin{aligned} X_1^{c+\psi}(T) &= G_1^{c+\psi}(T) - G_2^{c+\psi}(T), \\ X_2^{c+\psi}(T) &= G_2^{c+\psi}(T), \end{aligned} \quad (4.39)$$

а, згідно з (4.36),

$$\begin{aligned} G_1^{c+\psi}(T) &= G_1^c(T) + G_1^\psi(T), \\ G_2^{c+\psi}(T) &= G_2^c(T) + G_2^\psi(T). \end{aligned} \quad (4.40)$$

*Оптимальне оцінювання середньої кількості подій парнокорельованого потоку.* Оптимальне оцінювання середньої кількості подій сигнального парнокорельованого потоку  $G_1^c(T)$  на тлі парнокорельованого шуму при одноразовому відліку на інтервалі спостереження  $(0, T)$  є розв'язанням рівняння

$\frac{\partial l}{\partial G_1^c(T)} = 0$ , яке з урахуванням (4.34) і (4.37–4.40) можна подати так:

$$\frac{\partial}{\partial G_1^c} \ln \frac{P_k^{c+\psi}}{P_k^\psi} = \frac{\partial}{\partial X_1^{c+\psi}} \ln P_k^{c+\psi} = -1 + \frac{\sum_{i=0}^{[(k-1)/2]} \frac{(X_1^{c+\psi})^{k-2i-1}}{(k-2i-1)!} \frac{1}{i!} \left( \frac{X_2^{c+\psi}}{2} \right)^i}{\sum_{i=0}^{[k/2]} \frac{(X_1^{c+\psi})^{k-2i}}{(k-2i)!} \frac{1}{i!} \left( \frac{X_2^{c+\psi}}{2} \right)^i} = 0, \quad (4.41)$$

де для спрощення запису опущена явна залежність всіх величин від тривалості інтервалу  $T$ .

Рівняння (4.41) можна перетворити:

$$X_1^{c+\psi} = k Q_{k-1} \left( \frac{X_2^{c+\psi}}{2(X_1^{c+\psi})^2} \right) / Q_k \left( \frac{X_2^{c+\psi}}{2(X_1^{c+\psi})^2} \right), \quad (4.42)$$

де функція  $Q_k(x)$  визначається співвідношеннями:

$$Q_k(x) = \begin{cases} 1, & k = 0, 1; \\ 1 + \sum_{i=1}^{[k/2]} \frac{k!}{i!(k-2i)!} x^i, & k \geq 2. \end{cases} \quad (4.43)$$

Числові розрахунки середньої кількості подій сигнального парнокорельованого потоку наведені на рис. 4.2. Розрахунки проведені для функції  $\theta = \hat{G}_1/k$ , відмінність якої від одиниці характеризує відхилення оптимального оцінювання середньої кількості подій  $\hat{G}_1$  на інтервалі  $(0, T)$  від значення

$k$ , що відповідає випадку відсутності парних кореляцій. Обчислення проводилися для різних значень параметра  $r$ , що характеризує сумарну інтенсивність парних кореляцій у вихідному потоці.

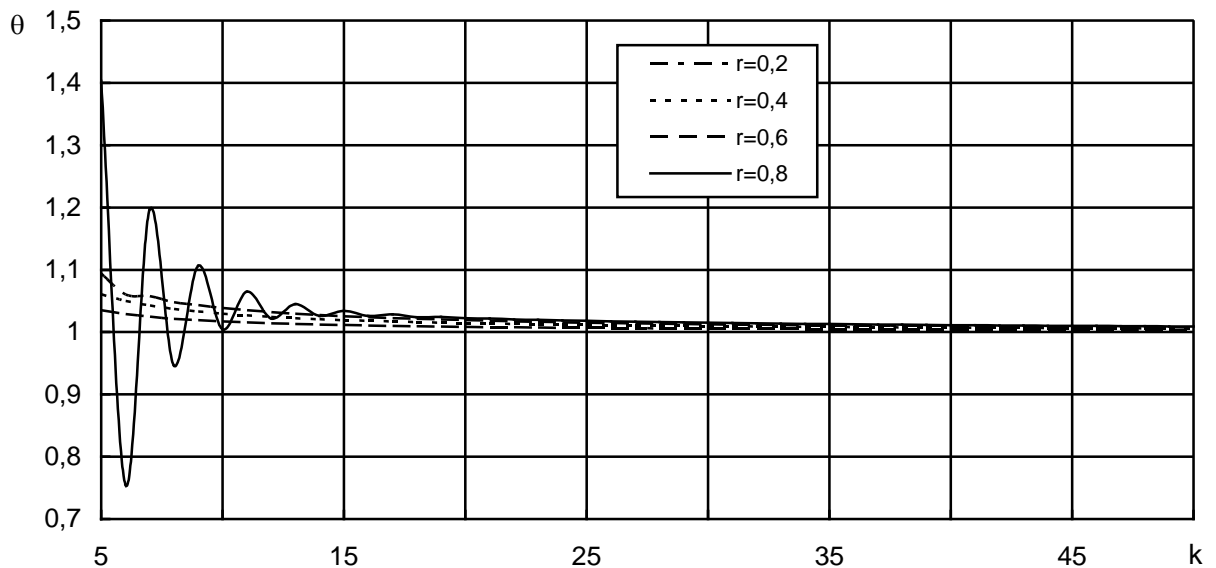


Рисунок 4.2 – Оцінювання середньої кількості подій сигнального парнокорельованого потоку для різних параметрів  $r$ , які характеризують сумарну інтенсивність парних кореляцій у вихідному потоці

Викладене уможлиблює формулювання таких висновків.

1. Фотоприймач не може оцінювати внесок парних кореляцій потоків окремо: сигнального потоку і потоку перешкод, оскільки вони, згідно з (4.39), (4.40) дають внесок у (4.42) за однакових умов.

2. Оптимальна оцінка  $\hat{X}_1^{c+\psi}$  може бути отримана тільки для сумарного середнього числа подій (суміші сигнального і шумового) парнокорельованого потоку. Потім, вважаючи відомою інтегральну інтенсивність парних кореляцій сумарного потоку  $G_2^{c+\psi}$ , можна отримати оптимальну оцінку для сумарного потоку  $\hat{G}_1^{c+\psi} = \hat{X}_1^{c+\psi} + G_2^{c+\psi}$ , з якої, знаючи  $G_1^\psi$ , – оптимальну оцінку для сигнального потоку  $\hat{G}_1^c = \hat{G}_1^{c+\psi} - G_1^\psi$ .

3. Вираз (4.42) дозволяє робити якісні висновки про характер його розв'язання. Оскільки, як видно з (4.43),  $Q_k(0)=1$ , то за відсутності парних кореляцій в обох потоках  $X_2^{c+\psi}=0$  оптимальне оцінювання зводиться до граничного пуассонівського випадку  $\hat{X}_1^{c+\psi} = k$ .

4. Із виразу (4.42) випливає, що при  $k \rightarrow \infty$  ефект парних кореляцій зникає, й результатом оптимального оцінювання знову є  $\hat{X}_1^{c+\psi} = k$ . Це пояснюється тим, що ступінь парних кореляцій у довільному парнокорельованому потоці визначається не абсолютною величиною  $X_2$ , а відношенням  $r(T) = G_2(T)/G_1(T)$ , причому значення  $r(T)=0$  відповідає відсутності парних кореляцій, а максимальне значення  $r(T)=1$  – виродженню в потік парних подій. Тому випадок  $k \rightarrow \infty$ , відповідний незалежному необмеженому збільшенню  $G_1(T)$ , призводить до уявного парадоксу «зникнення» парних кореляцій.

Матеріали підрозділу опубліковані в роботах [146], [224], в яких автор обчислював ефективність оптико-електронної системи за критерієм максимуму відношення правдоподібності, урахував властивості парнокорельованого потоку подій.

#### 4.4. Модель взаємодії оптичного випромінювання з елементами оптико-електронної системи в складі акустооптичного аналізатора спектра

Ще одним прикладом реєстрації випромінювання, що супроводжується нелінійними ефектами, які можуть реєструватися групами, при формуванні сигналу в площині фотоприймача оптико-електронної системи є формування сигналу при реєстрації випромінювання великої інтенсивності на прикладі оптико-електронної системи, що входить до складу акустооптичних аналізаторів спектра.

Принцип дії акустооптичних аналізаторів спектра ґрунтується на двох

фізичних явищах:

- дифракції світлової хвилі на звуковій хвилі, що поширюється в оптично прозорому середовищі і викликає збурення коефіцієнта заломлення;
- зв'язки розподілів світлових коливань у передній і задній фокальних площинах ідеальної лінзи перетворенням Фур'є.

Основними вимогами до систем є:

- швидкодія, що визначає можливість відображення швидкозмінюваного завантаження аналізованого діапазону;
- роздільна здатність індикатора, яка забезпечує роздільну реєстрацію сигналів на різних частотах;
- динамічний діапазон для забезпечення реєстрації оптичних сигналів у широкому діапазоні амплітуд;
- точність визначення амплітуди сигналу;
- кількість одночасно реєстрованих спектральних компонент у смузі аналізу.

У роботах [154] – [156], проведені дослідження, спрямовані на удосконалення й розроблення акустооптичних засобів радіочастотного аналізу спектра радіосигналів. У сучасних акустооптичних аналізаторах спектра реєстрація оптичного сигналу у вихідній площині пристрою, як правило, здійснюється за допомогою багатоелементних фотоприймачів: лінійок фотодіодів або лінійок приладів із зарядним зв'язком. При цьому відклик на виході аналізатора відповідає сигналу на вході й однозначно характеризує частоту вхідного сигналу (тобто кожній частоті вхідного радіосигналу відповідає один осередок лінійного фотоприймача на приладах із зарядним зв'язком). Моделі вихідних сигналів прийняті на основі спільного корпускулярної і хвильової теорій оптичного випромінювання. Це дало можливість пояснити відклики системи під час приймання складних оптичних сигналів різних просторово-часових і енергетичних характеристик, що супроводжуються нелінійними ефектами, які ускладнюють реєстрацію оптичних сигналів у широкому діапа-

зоні амплітуд і знижують роздільну здатність системи, що забезпечує реєстрацію сигналів на різних частотах.

У цьому підрозділі розглянуті особливості формування вихідного сигналу акустооптичних аналізаторів спектра при реєстрації сигналів великої інтенсивності. При збільшенні енергії радіосигналу певного порога на виході спектроаналізатора формується складний сигнал, за яким складно однозначно визначити частоту вхідного радіосигналу. Це зумовлено обмеженим динамічним діапазоном системи й і нелінійними залежностями, що виникають між передавальною функцією радіоканалу й оптичними елементами та потужністю приймального радіосигналу.

Робота акустооптичних аналізаторів спектра заснована на явищі дифракції світла на звуці в кристалах. Електромагнітний сигнал перетворюється на ультразвукову хвилю в кристалі. Опорний світловий пучок у результаті непружної взаємодії фотонів із квантами звуку – фононами – відчуває дифракцію, і частота (або довжина хвилі) вихідного електромагнітного сигналу [42] визначається за розміщенням дифракційних максимумів (як правило, використовуються максимуми 1-го порядку (рис. 4.3 а)).

Подальше зростання амплітуди вхідного сигналу призводить до появи нелінійних акустооптичних ефектів. Експериментальні дослідження показали, що при досить великих амплітудах вхідного сигналу, крім основного дифракційного максимуму, з'являються додаткові максимуми дифракції (рис. 4.3,б)). Причому розміщення цих максимумів таке, що їх не можна трактувати як максимуми вищих порядків вихідної дифракції. При подальшому збільшенні амплітуди вхідного сигналу кількість додаткових максимумів зростає, і при цьому амплітуда основного дифракційного максимуму може зменшуватися. Зауважимо, що наявність додаткових дифракційних максимумів ускладнює завдання аналізу спектра вхідного сигналу великої інтенсивності.

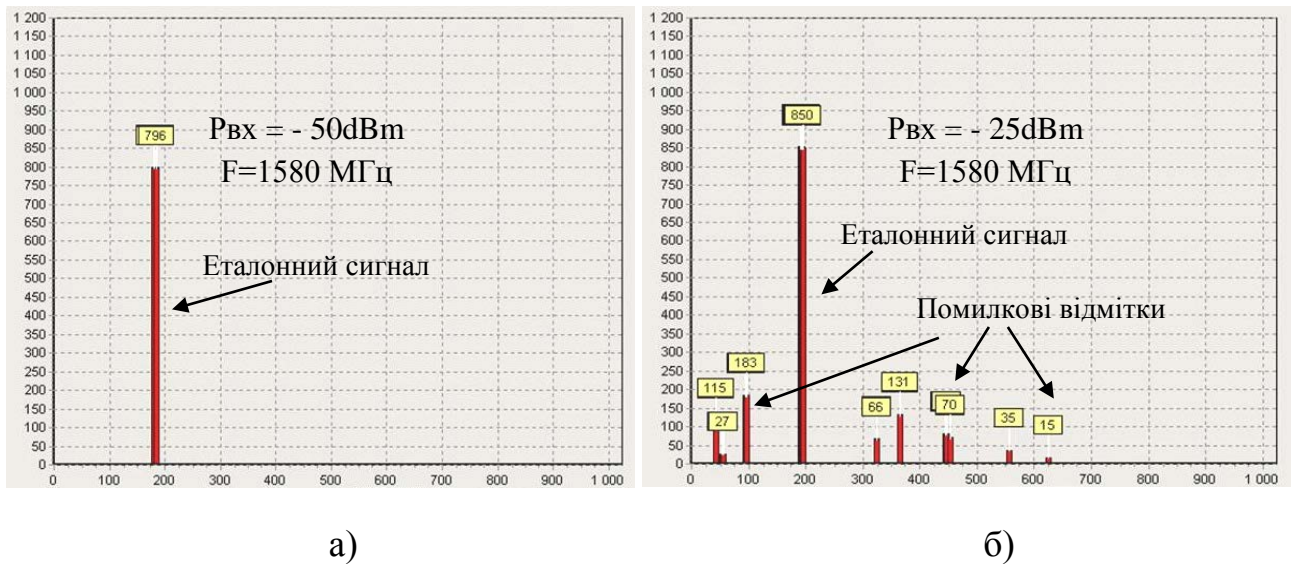


Рисунок 4.3 – Результати експериментальних досліджень із використанням блоку Ч-1 [156]

Якщо розглядати світло як падаючу електромагнітну хвилю з довжиною  $\lambda$ , то її дифракцію на звуці можна розглядати як процес розсіювання на неоднорідностях, які створює звукова хвиля в середовищі. Період неоднорідностей дорівнює довжині хвилі звуку  $\lambda$ . У найпростішому випадку таку структуру можемо вважати «дифракційними ґратами» і тоді кути дифракції  $\Phi$  при нормальному (по відношенню до звукової хвилі) падінні світла можуть бути знайдені із співвідношення

$$\lambda \sin \Phi = m\lambda, \quad (m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (4.44)$$

Для виразного спостереження дифракції необхідно, щоб довжина хвилі звуку  $\lambda$  була досить малою і порівнянною з довжиною хвилі світла  $\lambda$ . Тому дифракція спостерігається лише в ультразвуковому діапазоні.

З іншого боку, електромагнітну хвилю можна розглядати як потік квантів світла – фотонів, з імпульсом  $\vec{P} = \hbar \vec{K}$ , де  $\hbar$  – стала Планка,  $\vec{K}$  – хвильовий вектор світла. Звукову хвилю (особливо в ультра- і гіперзвуковому діапа-

зоні) можна розглядати як потік квантів звуку – фононів, з імпульсом  $\vec{p} = \hbar\vec{k}$ , де  $\vec{k}$  – хвильовий вектор звуку. У цьому випадку дифракцію світла можна пояснити [161] як результат непружного розсіювання фотонів на акустичних фононах. Сутність процесу полягає в тому, що квант світла  $\vec{K}$  при зіткненні поглинає квант звуку  $\vec{k}$  і при цьому утворюється новий світловий квант  $\vec{K}'$ . У такому процесі повинні виконуватися закони збереження енергії і імпульсу:

$$\hbar\Omega + \hbar\omega = \hbar\Omega', \quad (4.45)$$

$$\vec{K} + \vec{k} = \vec{K}', \quad (4.46)$$

де  $\Omega$  і  $\omega$  – циклічні частоти світла і звуку відповідно. Аналогічно відбуваються непружні процеси, що супроводжуються випромінюванням фонона.

Враховуючи, що швидкість звуку  $u$  значно менша за швидкість світла  $c$  ( $u \ll c$ ), можна показати, що при непружному розсіюванні на кванті звука частота і величина хвильового вектора фотона практично не змінюються, тоді:

$$k = 2K \sin \frac{\Phi}{2}. \quad (4.47)$$

Зауважимо, що (4.47) є повним аналогом (4.44) при малих кутах дифракції  $\Phi$  і  $m=1$ , оскільки  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $K = 2\pi/\lambda$ . Дифракцію в другому порядку ( $m=2$ ) можна пояснити непружним розсіюванням фотона з поглинанням (випромінюванням) двох фононів.

У корпускулярній моделі легко пояснюється безпосередній вплив інтенсивності звуку на дифракцію. Збільшення інтенсивності звуку в середовищі означає збільшення густини акустичних фононів. При цьому збільшується частота процесів поглинання (випромінювання) фононів і кількість квантів світла  $\vec{K}'$  розсіяних під кутами дифракції, які визначаються співвідношення-

ми (1.44) і (4.46). Таким чином, при великих амплітудах звуку вихідні дифракційні максимуми стають більш інтенсивними.

**3-фононні процеси.** Якісно іншим може бути вплив інтенсивності звуку на дифракцію, якщо врахувати ангармонічний характер коливань у середовищі при великих амплітудах звуку. У корпускулярному підході це призводить до того, що газ фононів перестає бути ідеальним (що не дивно, оскільки збільшується густина фононів), і необхідно враховувати взаємодію між ними. Як відомо [161], найпростішим типом фонон-фононної взаємодії є, так звані, 3-фононні процеси: розпад одного фонона на два інші фонони і зворотний процес – злиття двох фононів в один. У цьому випадку, як і раніше, мають виконуватися закони збереження енергії й імпульсу. Для процесу розпаду вони мають вигляд:

$$\omega = \omega_1 + \omega_2, \quad (4.48)$$

$$\vec{k} = \vec{k}_1 + \vec{k}_2. \quad (4.49)$$

Таким чином, ангармонізм коливань у звуковій хвилі спричиняє генерацію звукових хвиль із новими хвильовими векторами  $\vec{k}_1$ ,  $\vec{k}_2$ , і, отже, з новими довжинами хвиль  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ . На цих звукових хвилях відбудуватиметься дифракція падаючого світла, але, згідно з (4,44) і (4,46), під іншими дифракційними кутами  $\Phi$ . Отже, на тлі вихідних дифракційних максимумів повинні з'явитися нові дифракційні максимуми, що дуже ускладнює спектральний аналіз. Зміна хвильового вектора і довжини хвилі звуку може бути досить значною (на десятки відсотків), і додаткові максимуми дифракції будуть дуже зміщені по відношенню до вихідних, які спостерігалися при малих амплітудах звуку. Ця обставина дає принципову можливість розділити вихідні та додаткові дифракційні компоненти.

**Урахування законів дисперсії фононів.** Для протікання 3-фононних процесів необхідно, щоб одночасно виконувалися обидва закони збереження.

Ця вимога істотно обмежує можливі типи розпадів (злиття) фононів. Визначальним тут є закон дисперсії, тобто залежність частоти фонона від його хвильового вектора  $\omega = \omega(a, \vec{k})$ , де параметр  $a$  вказує на поляризацію фонона. У твердих тілах існує три звукові моди: поздовжня  $a = 1$  і дві поперечні  $a = t_1, t_2$ . У довгохвильовому наближенні закон дисперсії є практично лінійним:

$$\omega(a, \vec{k}) = u(a)k. \quad (4.50)$$

При цьому швидкості звукових мод  $u(a)$  зазвичай задовольняють співвідношення:

$$u(1) > u(t_1) > u(t_2). \quad (4.51)$$

Істинний закон дисперсії навіть при малих  $k$  дещо відрізняється від (4.50). У поздовжніх фононів, як правило,  $\omega(1, k) < u(1) \cdot k$ . У цьому випадку одночасне виконання законів збереження (4.48) і (4.49) для процесів розпаду (злиття) за участю тільки поздовжніх фононів неможливе. Тобто неможливі процеси  $1 \rightarrow 1+1$  і  $1+1 \rightarrow 1$ .

Для поперечних фононів у деяких напрямках закон дисперсії має властивість  $\omega(t, \vec{k}) > u(t) \cdot k$ . У цьому випадку можливе одночасне виконання законів збереження і, отже, для цих напрямів дозволені процеси  $t \rightarrow t+t$  і  $t+t \rightarrow t$ .

Якщо ж у процесах розпаду (злиття) одночасно беруть участь як поздовжні, так і поперечні фонони двох типів, то виконання законів збереження (4.48) і (4.49) істотно полегшується. У цьому випадку досить обмежитися лінійним наближенням закону дисперсії (4.50). Як показує аналіз [161], дозволеними є такі процеси розпаду:  $1 \rightarrow t+t$ ,  $1 \rightarrow 1+t$ ,  $t_1 \rightarrow t_2+1$ . Відзначимо, що

так само дозволені і зворотні процеси – процеси злиття фононів.

Зауважимо, що анізотропія закону дисперсії  $\omega(\vec{k})$  полегшує виконання законів збереження і цим частково знімає заборони на процеси розпаду (злиття) фононів.

**Числове оцінювання процесів розпаду фононів.** Оцінимо будь-які, на наш погляд, найбільш імовірні процеси розпаду в лінійному та ізотропному наближенні закону дисперсії (4.50).

1.  $1 \rightarrow t + t$ . В одновимірному випадку закони збереження енергії й імпульсу (4.48) і (4.49) мають вигляд:

$$\begin{array}{c}
 \vec{k}(l) \\
 \leftarrow \text{---} \bullet \text{---} \text{---} \bullet \text{---} \rightarrow \\
 \vec{k}_2(t) \quad \vec{k}_1(t) \\
 k = k_1 - k_2, \\
 u(l)k = u(t)k_1 + u(t)k_2.
 \end{array}$$

Рисунок 4.4 – Розпад фонона  $1 \rightarrow t + t$

Розв'язання системи дає:

$$k_1 = \frac{k}{2} \left( \frac{u(l)}{u(t)} + 1 \right), \quad k_2 = \frac{k}{2} \left( \frac{u(l)}{u(t)} - 1 \right).$$

Відношення швидкості поздовжнього звуку до швидкості поперечного звуку для різних твердих тіл змінюється в незначних межах (4.53). Використовуючи як оцінку  $\frac{u(l)}{u(t)} = 1,7$ , маємо  $k_1 = 1,35k$  і  $k_2 = 0,35k$ . Видно, що хвильові вектори (а отже, і довжини хвиль) фононів, що з'явилися в результаті розпаду, значно відрізняються від хвильового вектора (і довжини хвилі) вихідного звуку.

При дифракції світла на фононах кут дифракції  $\Phi$ , згідно з (4.47), визначається співвідношенням:

$$\Phi \approx 2 \sin \frac{\varphi}{2} = \frac{k}{K}. \quad (4.52)$$

Тоді кути дифракції світла на фононах, які генеруються в розглянутому процесі, становлять:  $\Phi_1 = 1,35\Phi$  і  $\Phi_2 = 0,35\Phi$ . Таким чином, додаткові дифракційні максимуми, що накладаються на вихідну дифракційну картину, будуть чітко розділені, що дає можливість для аналізу.

2.  $1 \rightarrow t+1$ . В одновимірному випадку закони збереження мають вигляд (рис. 4.5)

$$k = k_1 - k_2,$$

$$u(l)k = u(t)k_1 + u(l)k_2.$$

Рисунок 4.5 – Розпад фонона  $1 \rightarrow t+1$

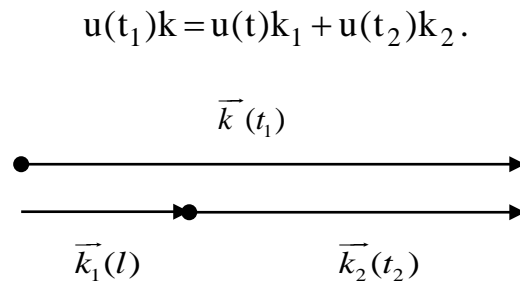
Звідси:

$$k_1 = 2k \frac{u(l)}{u(t)} \left/ \left( \frac{u(l)}{u(t)} + 1 \right) \right., \quad k_2 = k \left( \frac{u(l)}{u(t)} - 1 \right) \left/ \left( \frac{u(l)}{u(t)} + 1 \right) \right..$$

При,  $\frac{u(l)}{u(t)} = 1,7$  маємо:  $k_1 = 1,26k$  і  $k_2 = 0,26k$ . Для кутів дифракції, згідно з (4.52), отримуємо:  $\varphi_1 = 1,26\varphi$  і  $\varphi_2 = 0,26\varphi$ . Як і в першому випадку, нові кути дифракції значно відрізняються від вихідних.

3.  $t_1 \rightarrow 1+t_2$  Для одновимірного випадку закони збереження дають (рис. 4.6)

$$k = k_1 + k_2,$$

Рисунок 4.6 – Розпад фонона  $t_1 \rightarrow 1 + t_2$ 

Звідси

$$k_1 = k \left( \frac{u(t_1)}{u(t_2)} - 1 \right) / \left( \frac{u(l)}{u(t_2)} - 1 \right), \quad k_2 = k \left( \frac{u(l)}{u(t_2)} - \frac{u(t_1)}{u(t_2)} \right) / \left( \frac{u(l)}{u(t_2)} - 1 \right).$$

При  $\frac{u(l)}{u(t)} = 1,7$  і  $\frac{u(t_1)}{u(t_2)} = 1,07$  (4.54), (4.55) маємо  $k_1 = 0,106k$  і  $k_2 = 0,894k$ .

Що для кутів дифракції дає  $\varphi_1 = 0,106\varphi$  і  $\varphi_2 = 0,894\varphi$ .

*Оцінювання швидкостей звуку в ізотропному середовищі.*

1. У наближенні ізотропного середовища швидкості звуку визначаються співвідношеннями [157]:

$$u(l) = \sqrt{E/\rho}, \quad u(t) = \sqrt{G/\rho},$$

де  $\rho$  – густина середовища,

$E$  – модуль Юнга,

$G$  – модуль зсуву. Пружні модулі середовища пов'язані через коефіцієнт Пуассона  $\mu$  співвідношенням

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}.$$

Тоді для відношення швидкостей поздовжнього і поперечного звуку маємо

$$\frac{u(l)}{u(t)} = \sqrt{\frac{E}{G}} = \sqrt{2(1+\mu)}.$$

Як відомо, коефіцієнт Пуассона для різних середовищ змінюється у вузькому діапазоні  $0,3 < \mu < 0,5$ . Звідси, відношення швидкостей звуку для різних середовищ лежить у ще більш вузькому діапазоні:

$$1,61 < \frac{u(l)}{u(t)} < 1,73. \quad (4.54)$$

2. У моделі ізотропного середовища з двома поперечними модами звуку можемо записати:

$$\frac{u(t_1)}{u(t_2)} = \sqrt{\frac{G_1}{G_2}} = \sqrt{\frac{1+\mu_2}{1+\mu_1}}.$$

Нехай  $u(t_1) > u(t_2)$  (4.51), тоді для числового оцінювання візьмемо  $\mu_1 = 0,3$ . У цьому випадку для співвідношення поперечних швидкостей звуку маємо оцінку:

$$1 < \frac{u(t_1)}{u(t_2)} < 1,07. \quad (4.55)$$

Інтенсивність 3-фононних процесів визначається оператором Гамільтона фонон-фононної взаємодії [161]. Із використанням математичного апарату вторинного квантування оператор Гамільтона можна подати у вигляді

$$\hat{H}_{\text{вс}} = \sum_{\vec{k}, \vec{k}_1, \vec{k}_2} \frac{W(\vec{k}, \vec{k}_1, \vec{k}_2)}{\sqrt{\omega \omega_1 \omega_2}} (\hat{a}^-(\vec{k}) \hat{a}^+(\vec{k}_1) \hat{a}^+(\vec{k}_2) + \hat{a}^+(\vec{k}_2) \hat{a}^+(\vec{k}_1) \hat{a}^-(\vec{k})) \quad (4.56)$$

де  $W(\vec{k}, \vec{k}_1, \vec{k}_2)$  – коефіцієнти фонон-фононної взаємодії;

$\hat{a}^{\pm}(\vec{k})$  – оператори народження та знищення фонона із хвильовим вектором  $\vec{k}$ .

При цьому оператор  $\hat{a}^{-}(\vec{k})\hat{a}^{+}(\vec{k}_1)\hat{a}^{+}(\vec{k}_2)$  описує процес розпаду фонона  $\vec{k} = \vec{k}_1 + \vec{k}_2$ , а оператор  $\hat{a}^{+}(\vec{k}_2)\hat{a}^{+}(\vec{k}_1)\hat{a}^{-}(\vec{k})$  описує зворотний процес – злиття фононів  $\vec{k}_1 + \vec{k}_2 = \vec{k}$ .

Динамічний стан кристала визначається набором чисел заповнення  $\{N(\vec{k})\}$ , тобто кількістю фононів  $N(\vec{k})$  з усіма можливими хвильовими векторами  $\vec{k}$ . У поданні чисел заповнення, користуючись позначеннями Дірака, хвильову функцію кристала можна записати так:

$$|\dots, N(\vec{k}), \dots, N(\vec{k}_1), \dots, N(\vec{k}_2), \dots\rangle.$$

Як відомо [161], вплив оператора народження  $\hat{a}^{+}(\vec{k}_1)$  на хвильову функцію збільшує кількість фононів  $N(\vec{k})$  із хвильовим вектором  $\vec{k}$  на одиницю. Дія оператора знищення  $\hat{a}^{-}(\vec{k}_1)$  зменшує кількість фононів  $N(\vec{k})$  на одиницю. Доречними є такі співвідношення:

$$\hat{a}^{+}(\vec{k}) |N(\vec{k})\rangle = \sqrt{N(\vec{k})+1} \exp(i \omega(\vec{k}) t) |(N(\vec{k})+1)\rangle, \quad (4.57)$$

$$\hat{a}^{-}(\vec{k}) |N(\vec{k})\rangle = \sqrt{N(\vec{k})} \exp(i \omega(\vec{k}) t) |(N(\vec{k})-1)\rangle. \quad (4.58)$$

Імовірність розпаду фононів у звуковій хвилі з хвильовим вектором  $\vec{k}$  пропорційна кількості даних фононів:

$$p \sim N(\vec{k}),$$

і таким чином, пропорційна інтенсивності звукової хвилі.

Імовірність розпаду звукових фононів визначається також коефіцієнтами фонон-фононної взаємодії:

$$p \sim |W(\bar{k}, \bar{k}_1, \bar{k}_2)|^2,$$

які для різних типів розпаду мають відмінні значення. Таким чином, зі збільшенням інтенсивності вихідного звукового сигналу процес розпаду різних типів і дозволені законами збереження в даній кристалічній структурі будуть проявлятися в міру ієрархії відповідних їм коефіцієнтів фонон-фононної взаємодії.

Вихідний сигнал являє собою адитивну суміш стохастичних процесів, зумовлених внутрішніми шумами фотоприймача  $g_i$ , впливом світлового потоку  $s_i$  і впливом додаткового процесу, що виник у результаті фононних процесів  $s_{i,f}$ . Характеристики виявлення для цього процесу визначаються так:

$$F = P \left[ \left( g_i + \sum_f s_{i,f} \right) > n_0 \right], \quad (4.59)$$

$$D = P \left[ \left( g_i + s_i + \sum_f s_{i,f} \right) > n_0 \right]. \quad (4.60)$$

В результаті розробленої моделі вихідний сигнал характеризується, як адитивна суміш стохастичних процесів, зумовлених внутрішніми шумами фотоприймача  $g_i$ , впливом світлового потоку  $s_i$  і впливом додаткового процесу, що виник у результаті фононних процесів  $s_{i,f}$ .

Матеріали підрозділу опубліковані в роботах [143], [154] – [156], в яких автор запропонував на основі корпускулярної теорії світла врахувати стохастико-детермінований характер оптичних сигналів і перешкод із різними енергетичними параметрами, а також систематизував теоретичні методи опису й аналізу оптичних сигналів, на основі яких розроблені методи виявлення сигналів із заданими характеристиками.

#### 4.5. Висновки

Розділ присвячений виконанню визначених у дисертаційній роботі завдань: розробити й обґрунтувати адекватні математичні моделі взаємодії еле-

ктромагнітного випромінювання з елементами системи; вивчити статистичні характеристики приймальних сигналів з урахуванням стохастико-детермінованого характеру оптичних сигналів і перешкод; розглянути процеси, що впливають на формування вихідного сигналу, які виявляються під час роботи системи як на нижній, так і на верхній межі динамічного діапазону.

Процес формування вихідного сигналу оптико-електронних систем схарактеризований як нестационарний потік подій, який не має властивостей пуассонівського потоку і описаний пуассонівськими потоками зі зміненою дисперсією. Наявність зв'язку між просторово-часовими властивостями появи відклику фотоприймача пояснює те, що властивості пуассонівського потоку фізично не зберігаються. Процес взаємодії оптичного випромінювання з середовищем поширення та взаємодії з приймачем випромінювання описаний за допомогою умовно пуассонівських потоків, як потоків однорідних подій спостережуваних групами.

Урахування цих властивостей, використання корпускулярних і статистичних властивостей випромінювання в описі процесів, які спостерігаються під час приймання надслабких сигналів і складних оптичних сигналів великих інтенсивностей на межах динамічного діапазону оптико-електронних систем, дає підстави для таких висновків:

1. Розроблений підхід до оцінювання характеристик оптичного випромінювання, властивості якого характеризуються групованими параметрами, уможливив виявлення надслабких сигналів на тлі внутрішніх шумів фотоприймачів. Пропонований підхід і створена на його основі статистична модель вихідних сигналів оптико-електронних систем ґрунтуються на аналізі пуассонівських потоків зі зміненою дисперсією, що використовують властивості парнокорельованих потоків, й ураховують взаємодію вхідного випромінювання з елементами систем. Застосування математичного апарату твірних функціоналів сприяло виявленню як кількості реєстрованих сигналів, так і координат їхньої появи [146], [224].

2. Розроблена статистична модель вихідних сигналів при виявленні надслабкого випромінювання дозволила врахувати зміни дисперсії реєстрованого потоку, зумовленою тим, що час і місце реєстрації фотонів не є статистично незалежними при збереженні інтенсивності реєстрованого потоку.

3. Встановлена залежність між збереженням властивостей парнокорельованих потоків і інтенсивністю як сигнальної, так і шумових складових. Результати оцінювання інтенсивності реєстрованого потоку засвідчили, що використання цієї відмітної ознаки сигнальної складової дає можливість реєструвати надслабкі сигнали, інтенсивність яких менша за внутрішні шуми фотоприймача або порівнянна з ними.

4. При реєстрації акустооптичні аналізатори спектра сигналів великої інтенсивності основними нелінійними ефектами, що впливають на дифракцію, можна вважати процеси розпаду (злиття) фононів, у результаті яких виникають звукові хвилі з новими хвильовими векторами (новими довжинами хвиль). У процесі дифракції світла на цих звукових хвилях з'являються спектральні компоненти, частоти й амплітуди яких залежать від амплітуди вхідного звукового сигналу [143], [149].

5. Отримані числові оцінки хвильових векторів і кутів дифракції для розглядуваних спектральних компонент при аналізі процесів розпаду фононів показали, що кути дифракції нових максимумів значно, на десятки відсотків, відрізняються від вихідних. Це дає можливість ідентифікації спектра вхідного сигналу з урахуванням складної структури сигналу на виході акустооптичного аналізатора спектра [154] – [156].

У результаті проведених теоретичних і експериментальних досліджень сформульовані *нові наукові положення*:

1. При описі перетворення сигналів приймачем випромінювання розроблена нова математична модель вихідного сигналу в оптико-електронних системах при реєстрації надслабкого випромінювання, що враховує природу виникнення парнокорельованих сигналів.

2. Набула подальшого розвитку математична модель взаємодії оптичного випромінювання з елементами оптико-електронної системи, що входить до складу акустооптичних аналізаторів спектра, яка враховує стохастико-детермінований характер оптичних сигналів і перешкод різних просторово-частотних та енергетичних параметрів.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Запропонована методика оцінювання середнього числа подій парнокорельованого потоку може бути застосована для вивчення статистичних властивостей слабких світлових потоків. Урахування асоційованого параметра дозволить виявляти оптичне випромінювання, яке виникає:

- у результаті фотопроцесів, що відбуваються в атмосфері;
- у результаті фотопроцесів, які відбуваються в тканинах живих систем – біохемілюмінесценція, оскільки більшість захворювань супроводжується активацією перекисного окислення ліпідів, яке при виснаженні власної антиоксидантної системи може спричинити порушення структурно-функціонального стану мембран і посилення патологічного процесу і при цьому супроводжуватися слабким і хемілюмінесцентним випромінюванням квантів;
- при оцінюванні вірусних інфекцій;
- при визначенні бактеріального забруднення повітря і джерел водопостачання та харчових продуктів.

2. Запропоновані моделі уможливають оптимізацію енергетичних розрахунків під час приймання складних оптичних сигналів, що мають різні просторові й часові характеристики в оптико-електронних системах, і дозволять розширити діапазон чутливості систем як у бік реєстрації слабких сигналів на тлі внутрішніх шумів, так і реєстрації сильних сигналів.

Питання, пов'язані з виявленням і обробленням сигналів в оптико-електронних системах на основі отриманих наукових положень будуть розглянуті в Розділі 5 в п. 5.6 і п. 5.7.

**РОЗДІЛ 5**  
**ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ**  
**В ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ З УРАХУВАННЯМ**  
**РОЗВИТКУ СТОХАСТИКО-ДЕТЕРМІНОВАНИХ**  
**МЕТОДІВ ПРИЙМАННЯ Й ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ.**  
**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ**

**Мета.** Здійснити теоретичні й експериментальні дослідження із забезпечення високої точності визначення просторово-часових характеристик сигналів із підвищеними ймовірнісними характеристиками виявлення з урахуванням узгодження просторово-енергетичних властивостей сигналів і параметрів оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном.

Для досягнення окресленої мети проведено розрахунки виявної здатності на основі створених статистичних моделей; вивчені методи просторово-часового накопичення з метою збільшення параметрів виявлення стаціонарних малорозмірних, малоконтрастних об'єктів; розроблений квазіоптимальний виявник з урахуванням особливостей просторово-часових характеристик статистичних потоків. Матеріал, поданий у розділі, опублікований у [14], [137], [150], [153], [160], [204], [209] – [211], [215].

Розділ спрямований на виконання визначених у дисертаційній роботі завдань: розробити й оптимізувати методи процесу оброблення сигналів, які розширюють динамічний діапазон оптико-електронних систем, як у бік реєстрації надслабких, так і в бік сильних сигналів на тлі перешкод; вивчити можливості розроблених методів у практичному застосуванні; розробити методи і рекомендації щодо методів оптимізації параметрів виявлення оптико-електронних систем, що враховують характеристики спостережуваних об'єктів, які забезпечують високу точність вимірювання просторових і часових характеристик реєстрованих сигналів із підвищеними ймовірнісними характеристиками виявлення при значному зменшенні ймовірності прийняття помилкового рішення.

Завдання приймання й виявлення оптичних сигналів на тлі шумів висвітлені в [162] – [166], [170], [174]. Потенційні можливості оптико-електронних систем щодо вияву енергетичної чутливості, роздільної здатності та властивостями виявляти, як правило, обмежуються внутрішніми шумами фотоприймальних пристроїв, флуктуаціями приймального сигналу, квантовими шумами, а також геометричними розмірами спостережуваних об'єктів [170] – [172].

Описані в Розділах 3 і 4 результати досліджень, спрямованих на вивчення статистичних характеристик вихідних сигналів оптико-електронних систем, засвідчили, що сигнали, залежно від умов роботи системи мають різні статистичні, просторові і часові характеристики. При виявленні сигналів на межах динамічного діапазону систем були визначені (зафіксовані / зареєстровані) нелінійні ефекти. Додаткові експериментальні дослідження з урахуванням описаних процесів, спрямовані на вивчення методів оброблення сигналів оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном, є необхідними. Ці дослідження орієнтовані на оптимізацію методів виявлення сигналів на основі узгодження просторових і енергетичних характеристик досліджуваних сигналів із властивостями виявлення оптико-електронних систем, а також на врахування статистичних властивостей вихідних сигналів, що мають негауссову статистику. Урахування асимптотичної поведінки закону розподілу випадкового процесу, що характеризує вихідний сигнал оптико-електронних систем, дозволить оптимізувати стохастико-детерміновані методи оброблення сигналів, що характеризуються низькою величиною відношення сигнал/шум (менше, ніж 5), і цим уможливить розширення динамічного діапазону оптико-електронних систем.

Динамічний діапазон оптико-електронних систем визначається відношенням освітленості на верхній межі діапазону, при якій настає насичення, до освітленості на нижній межі діапазону, при якій величина відношення сигнал/шум дорівнює граничному значенню. Незважаючи на можливість посилення слабких сигналів до будь-якої величини, не завжди вдається зареєстру-

вати їх через хаотичні флуктуації різної природи.

Як зауважувалося в попередніх розділах, розподіл енергетичної освітленості в полі зору оптико-електронної системи має стохастичний характер, що створює неоднорідний фон, зв'язок між вхідним (оптичним сигналом) і вихідним потоком (сигналом із виходу фотоприймача) може мати детермінований і стохастичний характер. Нижня межа енергії, яка може бути виявлена оптико-електронною системою, обмежується рівнем флуктуацій шумової складової, на яку впливають середовище поширення, об'єкт спостереження, оптична ланка і фотоприймач.

Процес реєстрації сигналу за наявності шумів вимагає попереднього знання характерних ознак сигналу і шуму. Використання цих ознак сприяє виявленню сигналів. Зазвичай відповідь має імовірнісний характер. Це пов'язано з тим, що будь-яка ознака або властивість певною мірою притаманні як сигналу, так і шуму. Із погляду математичного опису шумова складова є випадковою функцією, яка в результаті досліду може набути того чи того вигляду випадкової реалізації, якого саме – заздалегідь невідомо.

В оптико-електронних системах при виявленні об'єктів не існує узагальненого параметра виявлення, наприклад, як для радіочастотного діапазону величина відношення сигнал/шум. Характеристики виявлення залежать від статистичних, енергетичних і геометричних характеристик перешкод і сигналу.

Для розроблення й застосування методів і алгоритмів покращення якості зображень в оптико-електронних системах оцінимо виявну здатність системи за критеріями максимуму відношення правдоподібності, умовних ймовірностей правильного виявлення і хибної тривоги, величини відношення сигнал/шум.

Беручи до уваги можливість використання різних граничних теорем, що лежать в основі розрахунку виявної здатності систем, проведемо порівняльний аналіз імовірності прийняття помилкового рішення при різних умовах роботи системи.

### 5.1. Аналіз характеристик виявлення в оптико-електронних системах

Для розрахунку характеристик виявлення необхідно знати розподіл перешкоди і суми сигналу з перешкодою на виході оптимального приймача. Оптимальна процедура виявлення зводиться до підрахування кількості фотоелектронів за час експозиції. Рішення про наявність сигналу приймається, якщо число фотоелектронів  $n$  не менше за порогове значення  $n_0$ , тобто становить  $n_0$ ,  $n_0 + 1$ ,  $n_0 + 2$ , тощо. При пуассонівському розподілі сигналу і перешкоди ймовірність формування  $n$  фотоелектронів описується співвідношенням (2.1). Середнє число фотоелектронів за час експозиції за відсутності сигналу дорівнює  $\bar{n}_n$ , а за його наявності  $\bar{n}_n + \bar{n}_c$ . При цьому ймовірність помилкової тривоги  $F$  і правильного виявлення  $D$  визначається такими виразами:

$$F = P_n(n_0) + P_n(n_0 + 1) + P_n(n_0 + 2) + \dots = \sum_{n_0}^{\infty} \frac{\bar{n}_n^n}{n!} e^{-\bar{n}_n};$$

$$D = P_{cn}(n_0) + P_{cn}(n_0 + 1) + P_{cn}(n_0 + 2) + \dots = \sum_{n_0}^{\infty} \frac{(\bar{n}_c + \bar{n}_n)^n}{n!} e^{-(\bar{n}_c + \bar{n}_n)}.$$
(5.1)

Як випливає з аналізу виразів (5.1), в оптичному діапазоні на відміну від радіодіапазону, не вдається ввести узагальнений параметр виявлення типу відношення сигнал/шум. Характеристики виявлення залежать безпосередньо від рівня перешкоди і сигналу. Для розрахунку значень  $F$  і  $D$  необхідно використовувати таблиці функцій виду (5.1). З аналізу залежностей випливає, що зменшення часу експозиції веде до зменшення необхідної для виявлення енергії оптичного сигналу при заданих  $D$  і  $F$ . Це відбувається внаслідок зменшення рівня перешкоди  $\bar{n}_n$ , що зменшує поріг виявлення  $n_0$ .

Квантова структура оптичних сигналів приводить до того, що навіть за відсутності перешкоди ( $\bar{n}_n = 0$ ) й наявності одиничного порога ( $\bar{n}_0 = 1$ ) виявлення мети не є достовірним, тобто ймовірність правильного виявлення не

дорівнює одиниці [14].

При  $\bar{n}_n \gg 10$  розподіл перешкоди і спільний розподіл сигналу і перешкоди наближаються до нормального. У цьому випадку:

$$F = 0,5 - \Phi_0\left(\frac{n_0 - \bar{n}_n}{\sqrt{\bar{n}_n}}\right), \quad (5.2)$$

$$D = 0,5 - \Phi_0\left(\frac{n_0 - (\bar{n}_n + \bar{n}_c)}{\sqrt{\bar{n}_n + \bar{n}_c}}\right),$$

де  $\Phi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$  – інтеграл імовірності.

Якщо виконується умова  $\bar{n}_n \gg \bar{n}_c$ , то характеристики виявлення стають такими:

$$F = 0,5 - \Phi_0\left(\frac{l_0}{\sqrt{\bar{n}_n}}\right); \quad D = 0,5 - \Phi_0\left(\frac{l_0 - \bar{n}_c}{\sqrt{\bar{n}_n}}\right), \quad (5.3)$$

де  $l_0 = n_0 - \bar{n}_n$ .

У цьому випадку характеристики виявлення оптичних сигналів описуються тими самими співвідношеннями, що й аналогічні характеристики виявлення радіолокаційних сигналів із відомими параметрами в білому шумі. Для радіолокаційних сигналів ці співвідношення зазвичай записують у вигляді:

$$F = 0,5 - \Phi_0(\Psi); \quad D = 0,5 - \Phi_0(\Psi - \varphi), \quad (5.4)$$

де  $\Psi$  – відносний поріг;

$\varphi$  – параметр виявлення, який дорівнює відношенню амплітуди сигналу до середньоквадратичного значення перешкоди.

Зважаючи на ідентичність співвідношень (5.3) і (5.4), можна зробити висновок про те, що при  $\bar{n}_n \gg \bar{n}_c$  під час виявлення оптичних сигналів теж можна ввести як параметр виявлення відношення сигнал/шум за напругою на виході приймача у вигляді:

$$\varphi = \bar{n}_c / \sqrt{\bar{n}_n} . \quad (5.5)$$

Вираз збігається з виразом величини відношення сигнал/шум для радіолокаційного сигналу  $x(t) \sim \mu_c(t)$  з повністю відомими параметрами, що спостерігається в білому шумі зі спектральною щільністю  $N_0/2 \sim \mu_n$ :

$$q = \sqrt{2E/N_0} ,$$

де  $E = \int_0^{\tau} x^2(t) dt$  – енергія сигналу.

Тоді для сигналу при  $x(t) \sim \mu_c(t) = \mu_c$ ,  $N_0/2 \sim \mu_n$ :

$$q = \sqrt{\mu_c^2 \tau / \mu_n} = \mu_c \tau / \sqrt{\mu_n \tau} = \bar{n}_c / \sqrt{\bar{n}_n} .$$

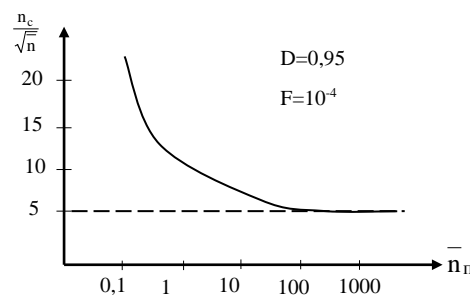


Рисунок 5.1

Можливість застосування величини відношення сигнал/шум  $\varphi$  як параметра виявлення оптичних сигналів лише за умови  $\bar{n}_n \gg \bar{n}_c$  ілюструє графік на рис. 5.1. На графіку наведена типова залежність відношення  $\bar{n}_c / \sqrt{\bar{n}_n}$  від  $\bar{n}_n$  при фіксованих  $D$  і  $F$ . Як випливає з аналізу рисунка 5.1, вже при  $\bar{n}_n > 100$  величина відношення  $\bar{n}_c / \sqrt{\bar{n}_n}$  стабілізується, а, отже, однозначно характеризує значення  $D$  і  $F$ . При виконанні цієї умови для визначення  $D$  і  $F$  можна розрахувати параметр  $\varphi$  і користуватися класичними співвідношеннями для характеристик виявлення радіолокаційного сигналу з відомими параметрами в білому шумі. Практично умова  $\bar{n}_n > 100$  завжди виконується, якщо використо-

вуються фотоприймачі з внутрішнім фотоефектом (фотодіоди, фоторезистори тощо.). Для таких фотоприймачів  $i_{\tau} \sim 10^{-8}$  А і, наприклад, навіть при реєстрації коротких імпульсів тривалістю  $\tau = 10^{-8}$  с, буде  $\bar{n}_{\tau} \sim 600$ .

Фізичне значення переходу до класичного випадку полягає в тому, що при  $\bar{n}_{\tau} \gg \bar{n}_c$  імпульси, які перешкода формує на виході оптимального фільтра, зливаються один з одним. Реалізація перешкоди набуває вигляду характерної шумової доріжки. При цьому для надійного виявлення сигналу досить забезпечити його перевищення над флуктуаціями перешкоди, а не над її постійною складовою.

Матеріали підрозділу опубліковані в [14].

## 5.2. Оцінювання виявної здатності оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном

Традиційні методи виявлення сигналів в оптико-електронних системах ґрунтуються на пороговому обробленні сигналу, тобто на порівнянні величини відклику фоточутливих елементів на вплив адитивної суміші сигнальної і фонові складові з установленим граничним значенням, величина якого зумовлена обраним критерієм якості прийняття рішення. Рішення про виявлення сигналу приймається, коли амплітуда електричного сигналу, сформованого одним елементом розрізнення матриці фотоприймачів, перевищує встановлене значення порога за різними критеріями, наприклад, критерієм Неймана-Пірсона [22] – [24]. У цьому випадку правило розв'язування полягатиме в обчисленні значення відношення правдоподібності і порівняння результату обчислень із граничним значенням. Вираз для відношення правдоподібності при розбитті інтервалу спостереження на статистично незалежні підінтервали має вигляд:

$$\Lambda = \prod_{i=1}^m P_{n_i}^{(сп)} / P_{n_i}^{(п)}. \quad (5.6)$$

Густину ймовірності сигнальної і фонові компонент, використовуючи загальноприйняту пуассонівську статистику, можна визначити відповідно:

$$P_{n_i}^{(сп)} = \frac{(\bar{n}_{ci} + \bar{n}_{pi}/k)^{n_i}}{n_i!} \cdot e^{-\left(\frac{\bar{n}_{ci} + \bar{n}_{pi}}{k}\right)}, \quad (5.7)$$

$$P_{n_i}^{(п)} = \frac{(\bar{n}_{pi}/k)^{n_i}}{n_i!} \cdot e^{-\left(\frac{\bar{n}_{pi}}{k}\right)}, \quad (5.8)$$

де  $k$  – коефіцієнт послаблення нейтрального фільтра;  $\bar{n}_{ci}$ ,  $\bar{n}_{pi}$  – середні значення сигнальної і перешкодової компонент на  $i$  – му інтервалі спостереження.

Відповідно логарифм відношення правдоподібності можна записати:

$$\ln \Lambda = \ln \prod_i \frac{P_{n_i}^{(сп)}(t_i)}{P_{n_i}^{(п)}(t_i)} = - \sum_{i=1}^m \bar{n}_{ci} k^{-1} + \sum_{i=1}^m \ln \left( \frac{((\bar{n}_{ci} + \bar{n}_{pi})k^{-1})^{n_i} / n_i!}{(\bar{n}_{pi}k^{-1})^{n_i} / n_i!} \right). \quad (5.9)$$

Якість алгоритмів оброблення й виявлення сигналів визначається значеннями імовірнісних характеристик, таких, як умовні ймовірності правильного виявлення  $D$  і хибної тривоги  $F$  (вирази (5.10) і (5.11) відповідно). Використовуючи вираз (5.2) і центральну граничну теорему, можна записати:

$$D = 1 - \Phi_0 \left( \frac{\left( n_0 - \sum_{i=1}^m (\bar{n}_{ci} + \bar{n}_{pi}) \right) k^{-1}}{\sqrt{(\bar{n}_{ci} + \bar{n}_{pi})k^{-1}}} \right), \quad (5.10)$$

$$F = 1 - \Phi_0 \left( \frac{\left( n_0 - \sum_{i=1}^m \bar{n}_{pi} \right) k^{-1}}{\sqrt{\bar{n}_{pi}k^{-1}}} \right), \quad (5.11)$$

де  $n_0$  – поріг виявлення;  $\Phi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ .

Для розрахунку ймовірності хибної тривоги необхідно знати закон розподілу (як, наприклад, вираз 5.8) і граничну теорему (наприклад, вираз 5.11)

для опису кількості викидів, які перевищують рівень спрацьовування системи (порога виявлення  $n_0$ ).

Необхідно взяти до уваги дослідження, проведені в Розділі 3, спрямовані на вивчення процесів перетворення оптичного випромінювання оптичною ланкою оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном і розроблену модель сигналів, що враховує залежність граничних законів розподілу флуктуацій вхідного сигналу від коефіцієнта послаблення нейтрального фільтра.

Ураховуючи чинники й умови, за яких немає можливості використовувати відому граничну статистику, а отже, й алгоритми оброблення сигналів, розроблені на її основі, вважаємо за доцільне проаналізувати помилки виявлення сигналів в оптико-електронних системах з обмеженим динамічним діапазоном, які можуть виникати при виявленні малорозмірних об'єктів, які реєструються на межі динамічного діапазону систем.

Граничний закон розподілу вихідного сигналу залежно від коефіцієнта послаблення нейтрального фільтра  $k$  можна визначити згідно з залежністю, наведеною на рисунку 3.35, і виразами (3.33), (3.34), (3.35):

$$P_{ni}^{(n)} = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{(n_n)^2}{4}\right) \text{ при } k \approx 1 \quad (5.12)$$

$$P_{ni}^{(n)} = \left|\pi(1 + (n_n)^2)\right|^{-1} \text{ при } k \approx 5 \quad (5.13)$$

$$P_{ni}^{(n)} = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} (n_n)^{-3/2} \exp\left(-\frac{1}{4n_n}\right) \text{ при } k \approx 10 \quad (5.14)$$

Дослідження (Розділ 3), спрямовані на вивчення стохастичної поведінки вхідних сигналів оптико-електронних систем у різних умовах і використання узагальнених граничних теорем показує, що при виборі порога виявлення  $n_0$  на рівні, наприклад,  $3\sigma$ , де  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення для гауссової статистики, імовірність помилкового рішення буде істотно від-

різнятися від помилкового рішення для статистики стійких законів (рис. 5.2).

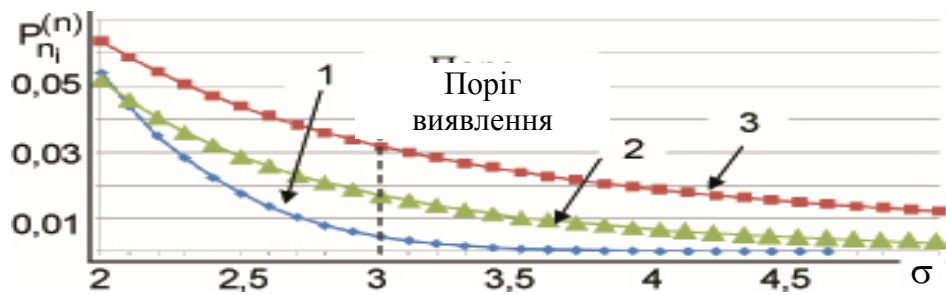


Рисунок 5.2 – Вибір порога виявлення сигналів в оптико-електронних системах. 1 – нормальний закон розподілу; 2 – стійкий закон розподілу  $\alpha = 0,5$ ; 3 – стійкий закон розподілу  $\alpha = 1$ .

Обчислимо умовну ймовірність хибної тривоги  $F$  (рис. 5.3) за виразом (5.11), використовуючи граничні розподіли (вирази (5,12), (5,13), (5,14)), при різних порогах виявлення  $n_0 = \sigma$ , де  $\sigma = 2, \dots, 7$  для гауссової статистики.

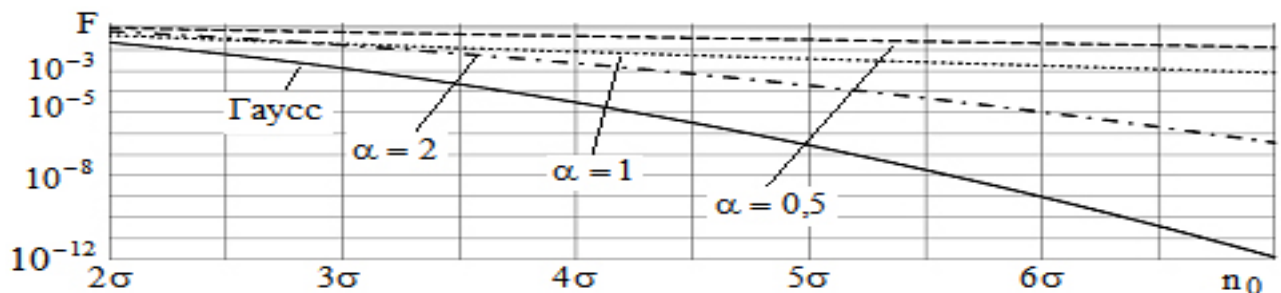


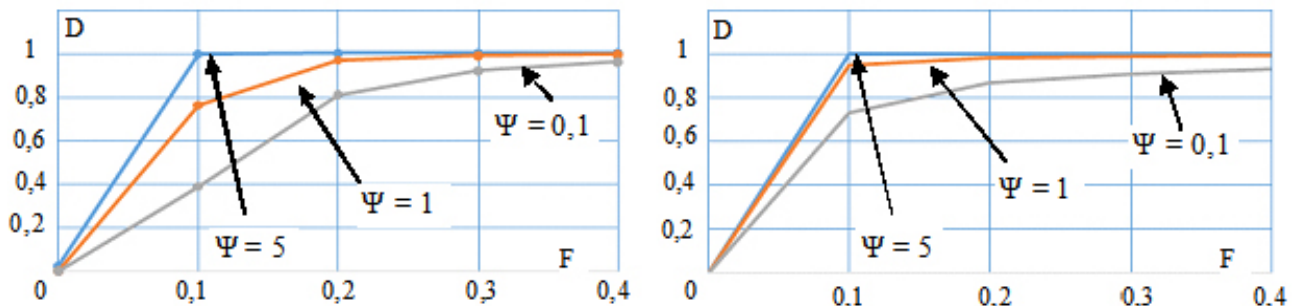
Рисунок 5.3 – Умовні ймовірності хибної тривоги при різних порогах виявлення  $n_0 = \sigma$  для гауссової статистики для різних граничних теорем, яким підпорядковуються статистичні характеристики вихідних сигналів оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном

Аналіз рис. 5.3 показує, що при малих коефіцієнтах послаблення оптичної ланки системи числові значення ймовірності хибної тривоги при виборі порогового значення до  $n_0 = 3\sigma$  для різних граничних теорем збігаються. При збільшенні коефіцієнта послаблення асимптотична поведінка хвоста щільності розподілу змінюється, що призводить до істотного збільшення

ймовірності хибної тривоги.

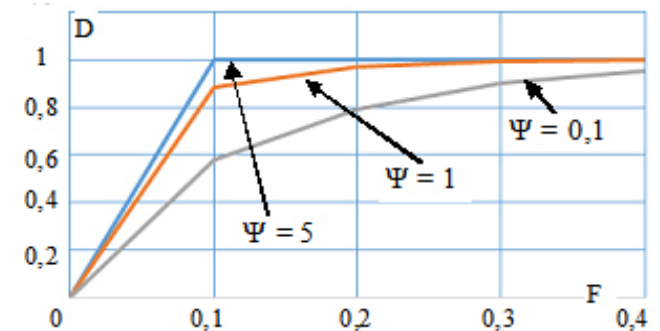
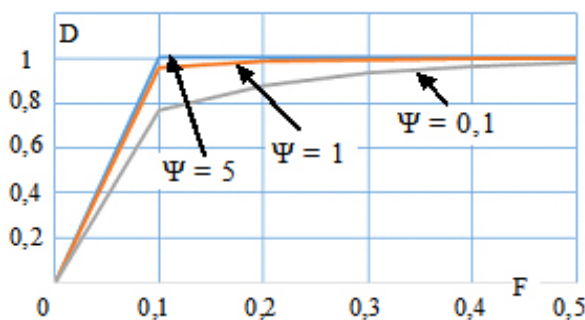
Проведемо порівняльний аналіз робочих характеристик оптико-електронних систем із різними характеристиками оптичних ланок, урахувавши статистичні характеристики вихідних сигналів (рис. 5.4).

Розрахунки характеристик оптико-електронних систем показали, що при незначних коефіцієнтах послаблення оптичної ланки числові значення ймовірностей хибної тривоги для різних граничних теорем збігаються. Зі збільшенням коефіцієнтів ослаблення оптичних ланок істотно збільшується умова ймовірність хибної тривоги.



с) стохастична поведінка флуктуаційної складової шуму прийнята на основі граничної теореми з  $\alpha = 1$

д) стохастична поведінка флуктуаційної складової шуму прийнята на основі граничної теореми з  $\alpha = 0,5$



а) стохастична поведінка флуктуаційної складової шуму прийнята на основі центральної граничної теореми

б) стохастична поведінка флуктуаційної складової шуму прийнята на основі граничної теореми з  $\alpha = 2$

Рисунок 5.4 – Робочі характеристики оптико-електронних систем виявлення, які працюють на основі критерію Неймана-Пірсона

Матеріали підрозділу опубліковані в [137].

### 5.3. Характеристики виявлення сигналу з випадковою амплітудою

Беручи до уваги статистичні характеристики сигналів, наведені в Розділі 2 (п. 2.6), розглянемо випадок виявлення сигналу, який статистично описує розподіли Бозе-Ейнштейна на тлі перешкоди з пуассонівським розподілом. Як було визначено, незалежно від розподілу сигнального потоку фотоелектронів оброблення зводиться до підрахунку фотоелектронів. Тому методика визначення характеристик виявлення аналогічна тій, яка передається виразом (5.1):

$$F = \sum_{n=n_0}^{\infty} P_n(n); \quad D = \sum_{n=n_0}^{\infty} P_{\text{сп}}(n).$$

Особливість завдання полягає лише у визначенні закону спільного розподілу сигналу і перешкоди  $P_{\text{сп}}(n)$ . Для виконання завдання необхідно згортати закони розподілу сигналу і перешкоди. Уникнути складного рішення можна, розглядаючи два окремі випадки: виявлення сигналу при слабкій перешкоді; виявлення сигналу при сильній перешкоді.

При малому рівні перешкоди імовірність хибної тривоги відіграє незначну роль у спільному розподіленні сигналу і перешкоди. З огляду на те, що розподіл Бозе-Ейнштейна значно ширший за пуассонівський, можна знехтувати впливом перешкоди. У цьому випадку

$$F = \sum_{n=n_0}^{\infty} \frac{\bar{n}_{\text{п}}^n}{n!} e^{-\bar{n}_{\text{п}}}, \quad (5.15)$$

$$D = \sum_{n=n_0}^{\infty} \frac{1}{\bar{n}_c + 1} \left( \frac{\bar{n}_c}{\bar{n}_c + 1} \right)^n. \quad (5.16)$$

Співвідношення може бути подане у зручному для розрахунків вигляді:

$$D = \frac{1}{\bar{n}_c + 1} \sum_{n=n_0}^{\infty} \left( \frac{\bar{n}_c}{\bar{n}_c + 1} \right)^n = \frac{1}{\bar{n}_c + 1} \left( \frac{\bar{n}_c}{\bar{n}_c + 1} \right)^{n_0} \sum_{n=n_0}^{\infty} \left( \frac{\bar{n}_c}{\bar{n}_c + 1} \right)^n. \quad (5.17)$$

З огляду на те, що сума членів геометричної прогресії

$$\sum_{n=n_0}^{\infty} a^n = \frac{1}{1-a}, \quad |a| < 1, \quad (5.18)$$

остаточно отримаємо:

$$D = \left( \frac{\bar{n}_c}{\bar{n}_c + 1} \right)^{n_0}. \quad (5.19)$$

Характерні значення  $D$  близькі до одиниці, тому ліву частину цього рівняння без особливих похибок можна замінити двома членами степеневого ряду:

$$1 - \frac{1}{n_0}(1-D) \approx \frac{\bar{n}_c}{\bar{n}_c + 1}. \quad (5.20)$$

Звідси отримуємо прості наближені формули:

$$D \approx 1 - \frac{n_0}{\bar{n}_c + 1}. \quad (5.21)$$

$$\bar{n}_c \approx \frac{n_0}{1-D} - 1. \quad (5.22)$$

У другому окремому випадку при сильній перешкоді можна вважати, що вона відіграє визначальну роль у спільному розподілі сигналу і перешкоди. Тобто в цьому випадку характеристики виявлення імпульсу зі стохастичною амплітудою і з детермінованою амплітудою збігаються [14].

#### 5.4. Характеристики виявлення сигналів в оптико-електронних системах при використанні методів накопичення послідовності кадрів

Використання послідовності кадрів замість одного кадру для виявлення оптичного сигналу може бути доцільним, якщо необхідна для виявлення сумарна енергія серії не перевищує енергію поодинокого кадру для тих самих значень  $F$  і  $D$ . Якщо  $\bar{n}_c$  – кількість фотоелектронів сигналу, необхідних для виявлення окремого імпульсу,  $M\bar{n}_{c1}$  – число фотоелектронів серії з  $M$  кадрів, необхідних для її виявлення з тими самими можливостями  $D$  і  $F$ , то ступенем енергетичної переваги буде слугувати відношення  $V = M\bar{n}_{c1} / \bar{n}_c$ .

Розглянемо різні процедури оброблення послідовності кадрів й оцінимо можливість енергетичної переваги, при їх використанні, беручи до уваги статистичні характеристики вихідного потоку.

**Накопичення послідовності кадрів.** При детермінованій амплітуді імпульсів (сигнал не флюктує) розподіл кількості фотоелектронів у послідовності кадрів буде підпорядковуватися закону Пуассона із середнім значенням  $M\bar{n}_{c1}$  (Розділ 2). Характеристики виявлення будуть описуватися виразами:

$$F = \sum_{n=n_0}^{\infty} \frac{M(\bar{n}_{п1})^n}{n!} e^{-M\bar{n}_{п1}},$$
(5.23)

$$D = \sum_{n=n_0}^{\infty} \frac{M(\bar{n}_{c1} + \bar{n}_{п1})^n}{n!} \cdot e^{-M(\bar{n}_{c1} + \bar{n}_{п1})},$$

де  $\bar{n}_{п1}$  – число фотоелектронів перешкоди за час одного кадру;

$n_0$  – поріг виявлення.

При випадковій амплітуді сигналів статистика числа фотоелектронів за час одного кадру відповідає розподілу Бозе-Ейнштейна. При незалежних

флуктуаціях сигналів число фотоелектронів у послідовності кадрів матиме негативно-біноміальний розподіл (Розділ 2). Тому ймовірність правильного виявлення визначиться виразом (при нехтуванні величиною перешкоди):

$$D = \sum_{n=n_0}^{\infty} \frac{(M+n-1)}{(M-1)n!} \left( \frac{\bar{n}_{c1}}{\bar{n}_{c1}+1} \right)^n \cdot \left( \frac{1}{\bar{n}_{c1}+1} \right)^M.$$

На рис. 5.5 показана залежність необхідної кількості сигнальних фотоелектронів  $M\bar{n}_{c1}$  від числа накопичених кадрів. З аналізу кривих випливає, що накопичення детермінованих сигналів спричиняє енергетичний програш. Це пояснюється зростанням порога виявлення  $n_0$  при накопиченні перешкоди. Таким чином, для виявлення пуассонівського сигналу енергетично вигідніше виявляти сигнал в одному кадрі.

При виявленні сигналів, що незалежно флюктуують у послідовності накопичених кадрів, відбувається згладжування флуктуацій. Це сприяє зменшенню необхідної енергії. Мінімум енергії виходить при накопиченні 3...5 кадрів. Надалі енергія в послідовності кадрів починає збільшуватися за рахунок зростання порога виявлення.

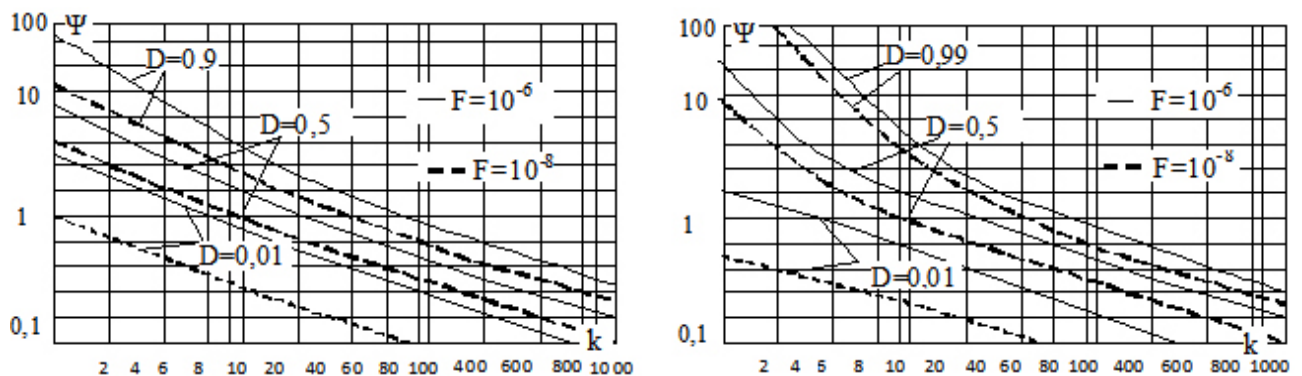


Рисунок 5.5 – Залежність величини сигнал/шум від кількості кадрів  $M$   
а) для детермінованого сигналу; б) для стохастичного сигналу

Як показано у п. 5.1, при  $\bar{n}_{\text{п1}} \gg \bar{n}_{\text{с1}}$  характеристики виявлення визначаються величиною параметра виявлення – відношення сигнал/шум  $\varphi$ . Для отримання необхідного значення  $\varphi$  для одного кадру можна використовувати залежності на рис. 5.5. На них наведена залежність відношення сигнал/шум, при заданих  $D$  і  $F$  для послідовності  $M$  накопичених кадрів із детермінованою (рис. 5.5 а) і зі стохастичною (рис. 5.5 б) амплітудою сигналів.

Для визначення результативності методу накопичення серії короткоекспозиційних кадрів оцінимо ефективність оптико-електронної системи за критеріями ймовірнісних характеристик виявлення сигналів і величині відношення сигнал/шум в одному кадрі і після накопичення серії кадрів. Окрім того, оцінимо дієвість методу накопичення серії короткоекспозиційних кадрів, що містять об'єкти, які характеризуються малою контрастністю, за допомогою методу імітаційного моделювання.

Величину відношення сигнал/шум в одному кадрі, згідно з виразом (3.30), можемо записати:

$$\varphi = \frac{\bar{n}_{\text{с+п}} - \bar{n}_{\text{п}}}{\sqrt{D_{\text{с+п}} + D_{\text{п}}}}, \quad (5.24)$$

де  $\bar{n}_{\text{с+п}}$  і  $D_{\text{с+п}}$  – математичне сподівання і дисперсія сигнальної складової;

$\bar{n}_{\text{п}}$  і  $D_{\text{п}}$  – математичне сподівання і дисперсія складової перешкод.

Для суми кадрів:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{M}} \frac{M\bar{n}_{\text{с+п}} - M\bar{n}_{\text{п}}}{(\sigma_{\text{с+п}} + \sigma_{\text{п}})}, \quad (5.25)$$

де  $M$  – кількість кадрів.

Як видно з виразу, величина відношення сигнал/шум збільшується в  $\sqrt{M}$  разів. Ця умова виконується при незалежній випадковій величині в кожному кадрі, тобто шум некорельований і статистично описується пуассонівською і гаусовою статистиками.

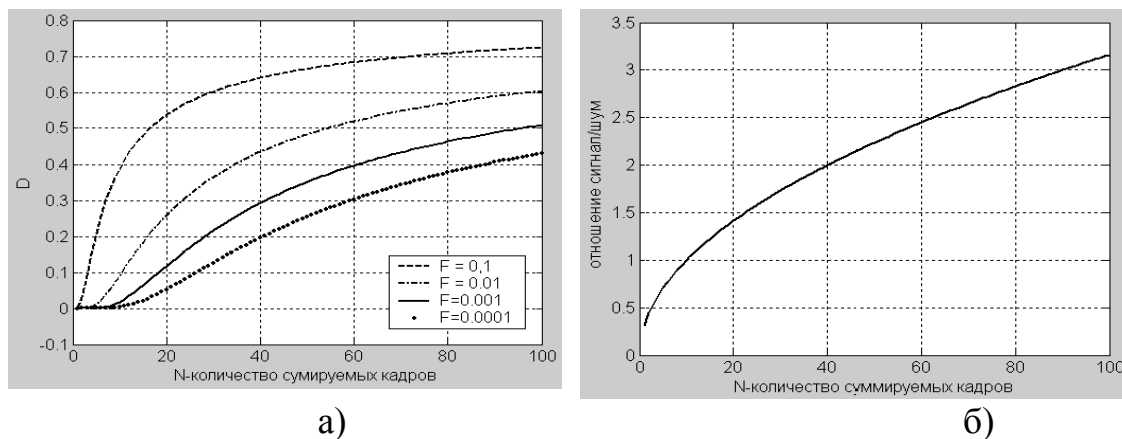


Рисунок 5.6 – Результати розрахунку дієвості накопичення серії кадрів:  
 а) зміна умовної ймовірності правильного виявлення при заданому значенні умовної ймовірності хибної тривоги; б) зміна величини відношення сигнал/шум

При проведенні моделювання та розрахунків як вихідні дані були прийняті такі значення:

- 1) розділення (розрізнення) фотоприймача  $500 \times 500$  елементів зображення;
- 2) детермінований корисний сигнал  $n_c = 2$ ;
- 3) шумова складова випадкової величина описується пуассонівським розподілом із параметром  $\bar{n}_n = 40$ .

Результати моделювання методу накопичення серії кадрів дозволяють зробити висновок, що ефективність оптико-електронної системи за критерієм сигнал/шум збільшується в  $\sqrt{M}$  разів, також збільшення часу експозиції збільшує ймовірність прийняття рішення про наявність сигналу. Матеріали підрозділу опубліковані в [14], [150].

У роботі [150] автор запропонував при виявленні слабкоконтрастних об'єктів використовувати метод узгодження енергетичних характеристик досліджуваних об'єктів із виявними властивостями оптико-електронних систем. Метод ґрунтується на характеристиці сигналів оптико-електронних сис-

тем на основі корпускулярного опису і застосовується при узгодженні часу експозиції з динамічним діапазоном фотоприймача.

### 5.5. Виявлення сигналу за перевищенням порога в послідовності з $M$ кадрів

При такій процедурі оброблення сигнал вважається виявленим, якщо станеться хоча б одне перевищення порога при прийманні  $M$  кадрів. Якщо ймовірності виявлення сигналу і хибної тривоги при прийманні одного кадру дорівнюють  $D_1$  і  $F_1$ , то при обробленні  $M$  кадрів:

$$D = 1 - (1 - D_1)^M,$$

$$F = 1 - (1 - F_1)^M \approx MF_1.$$

Кількість кадрів, необхідних для виявлення сигналу з імовірністю не нижчою за  $D$ , складе величину:

$$M = \frac{\ln(1 - D)}{\ln(1 - D_1)}.$$

На рис. 5.7 (б) наведені залежності величини  $M\bar{n}_{c1}$  (число фотоелектронів серії з  $M$  кадрів) від імовірності виявлення в одному кадрі  $D_1$ .

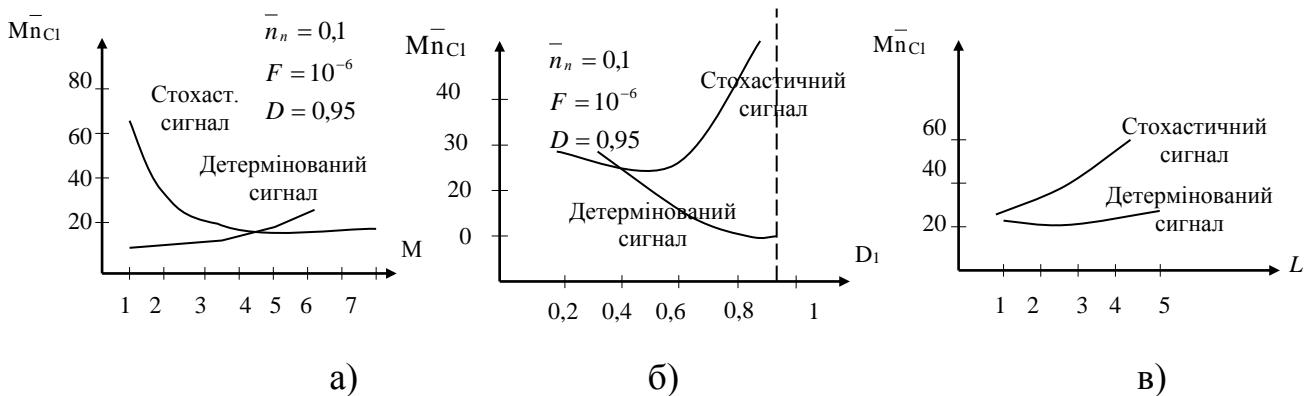


Рисунок 5.7 – Характеристики виявлення залежно від кількості накопичених кадрів для детермінованих і стохастичних сигналів

Ці залежності свідчать, що детермінований сигнал енергетично вигідніше виявляти в одному кадрі ( $D_1 = D$ ).

Для виявлення стохастичного сигналу енергетично вигідно використовувати серію з 4...8 кадрів залежно від величини  $D$ . При цьому ймовірність виявлення в одному кадрі повинна лежати в межах  $D_1 = 0,5...0,6$ .

#### 5.5.1. Виявлення сигналу за $L$ перевищення сигналу в серії з $M$ кадрів

При такій процедурі оброблення сигнал вважається виявленим, якщо станеться  $L$  перевищень порога (наприклад, 2 з 5), коли реєструється в  $M$  послідовних кадрах. Сутність методу полягає в можливості зниження порога виявлення, і тим самим розширення проникної здатності і динамічного діапазону системи. Імовірності правильного виявлення і хибної тривоги підпорядковуються біноміальному закону розподілу:

$$D = \sum_{v=1}^M c_M^v (1-D_1)^{M-v} D_1^v, \quad (5.26)$$

$$F = \sum_{v=1}^M c_M^v (1-F_1)^{M-v} F_1^v,$$

де  $c_M^v$  – число поєднання з  $M$  по  $v$ ;

$D, F$  – імовірність правильного виявлення і хибної тривоги при реєстрації сигналу в одному кадрі.

На рис. 5,7 (в) наведені залежності  $\overline{Mn_{cl}}$  від  $L$  для послідовності з 5 кадрів, з яких випливає, що енергія стохастичного сигналу практично не залежить від  $L$ .

Стохастичний сигнал енергетично вигідніше виявляти за одним перевищенням порога в серії. Звичайно, це окремий приклад. Більш узагальненим

завданням є знаходження оптимального поєднання L і M.

Однак із розгляду різних процедур оброблення можна зробити важливий висновок про те, що детермінований сигнал доцільно виявляти в одному кадрі. Для виявлення стохастичного сигналу доцільно використовувати послідовність накопичених кадрів.

**Експериментальна перевірка** обговорюваних методів накопичення послідовності кадрів здійснена на прикладі вивчення процесу гемолізу еритроцитів. Процес гемолізу вивчався за допомогою оптико-електронного комплексу мікроскопії, що включає мікроскоп, оптико-електронну систему візуалізації, програмне забезпечення [41].

У процесі лізису клітин, гемолітики руйнують еритроцити, і гемоглобін виходить у плазму крові, при цьому клітини стають малоконтрастними, що значно ускладнює процес визначення форми еритроцитів при мікроскопічних дослідженнях. На рис. 5.8 подані зображення різних стадій гемолізу еритроцитів.

**Методика проведення експериментальних досліджень** із використання стохастико-детермінованих методів оброблення сигналів в оптико-електронних системах:

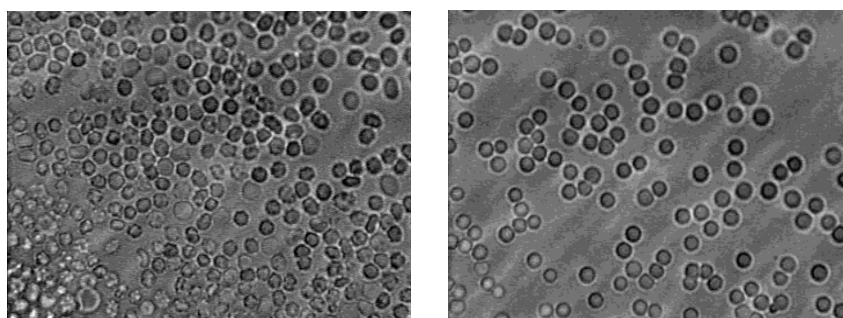
- 1) отримати за допомогою оптико-електронної системи послідовність кадрів, що містять досліджувані об'єкти;
- 2) обрахувати числові характеристики статистичного ряду досліджених сигнальних і фонових складових – статистичне математичне сподівання, статистичну дисперсію і статистичне середньоквадратичне відхилення (відповідно до методики п. 3.2);
- 3) визначити граничний закон розподілу вихідних сигналів оптико-електронної системи (згідно з п. 3.8);
- 4) обчислити величину сигнал/шум (вираз (3.30));
- 5) обчислити ймовірні характеристики правильного виявлення і хибної тривоги, згідно з обраними граничними теоремами (вирази (5.10) – (5.14));
- 6) експортувати послідовність телевізійних кадрів у програму, робоче

вікно якої наведене на рис. 5.9;

7) обрати параметри накопичення, згідно з отриманими параметрами в п. 2–5 цієї методики;

8) обчислити статистичні характеристики оброблених сигналів (відповідно до методики п. 3.2);

9) визначити ефективність використання цієї методики покращення якості зображення за критеріями величини відношення сигнал/шум і ймовірнісними характеристиками виявлення сигналу і перешкоди.



перший телевізійний кадр,  
еритроцити до початку гемолізу

останній телевізійний кадр,  
кінцева стадія гемолізу

Рисунок 5.8 – Зображення еритроцитів у процесі гемолізу

Результат покращення якості зображень при застосуванні методу між-кадрового накопичення наведений на рис. 5.9.

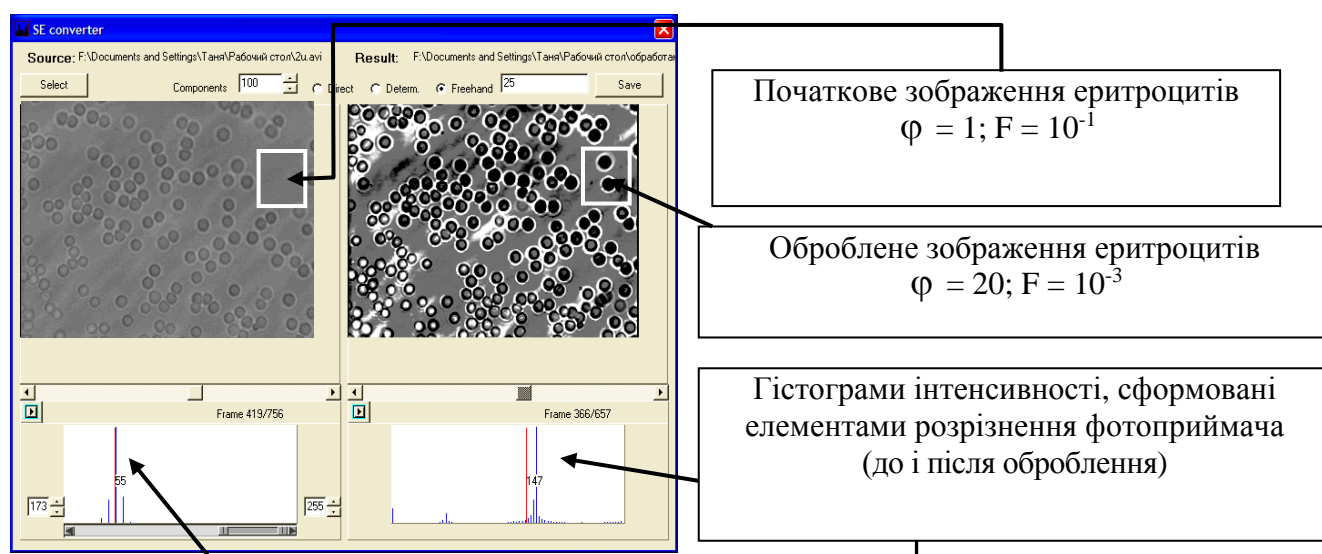


Рисунок 5.9 – Експериментальні результати оброблення  
малоконтрастних зображень

Проводилося міжкадрове попиксельне підсумовування всіх елементів зображення, послідовне нормування масивів для можливого візуального контролю, формувалася послідовність кадрів, кожен з яких був результатом попиксельного підсумовування, формувалися гістограми інтенсивностей, сформованих елементами розділення (розрізнення) фотоприймача до і після оброблення.

Згідно з методикою проведення експерименту були отримані статистичні характеристики фонові і сигнальної складових. Асимптотична поведінка густини ймовірності вихідних сигналів відповідала центральній граничній теоремі.

Аналіз результатів експериментальних досліджень дає підстави стверджувати, що для цих умов експерименту ефективність системи покращилася, за критерієм величини відношення сигнал/шум у 20 разів, за критерієм умовної ймовірності хибної тривоги в  $10^2$  разів.

Також була проведена експериментальна перевірка обговорюваних методів міжкадрового накопичення на прикладі оптико-електронної системи з обмеженим динамічним діапазоном. Згідно з методикою проведення експерименту були отримані статистичні характеристики фонові складові. Асимптотична поведінка густини ймовірності вихідних сигналів відповідала узагальненій граничній теоремі. Результат міжкадрового накопичення поданий на рис 5.10.

Обчислена ефективність оптико-електронної системи з різним складом оптичних ланок за критерієм імовірнісних характеристики виявлення при використанні методу виявлення сигналів у послідовності  $M$  кадрів, результати наведені на рис. 5.11.

З огляду на статистичне поводження шумової складові і граничні розподіли для вихідних сигналів оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном можна зробити висновок, що при використанні різного часу накопичення (експозиції) ймовірність хибної тривоги зберігається практично на одному рівні. Це можна пояснити тим, що при накопиченні стохас-

тичного сигналу, який має статистику  $\alpha$ -стійких законів, не відбувається просторово-часове усереднення флуктуаційної складової.

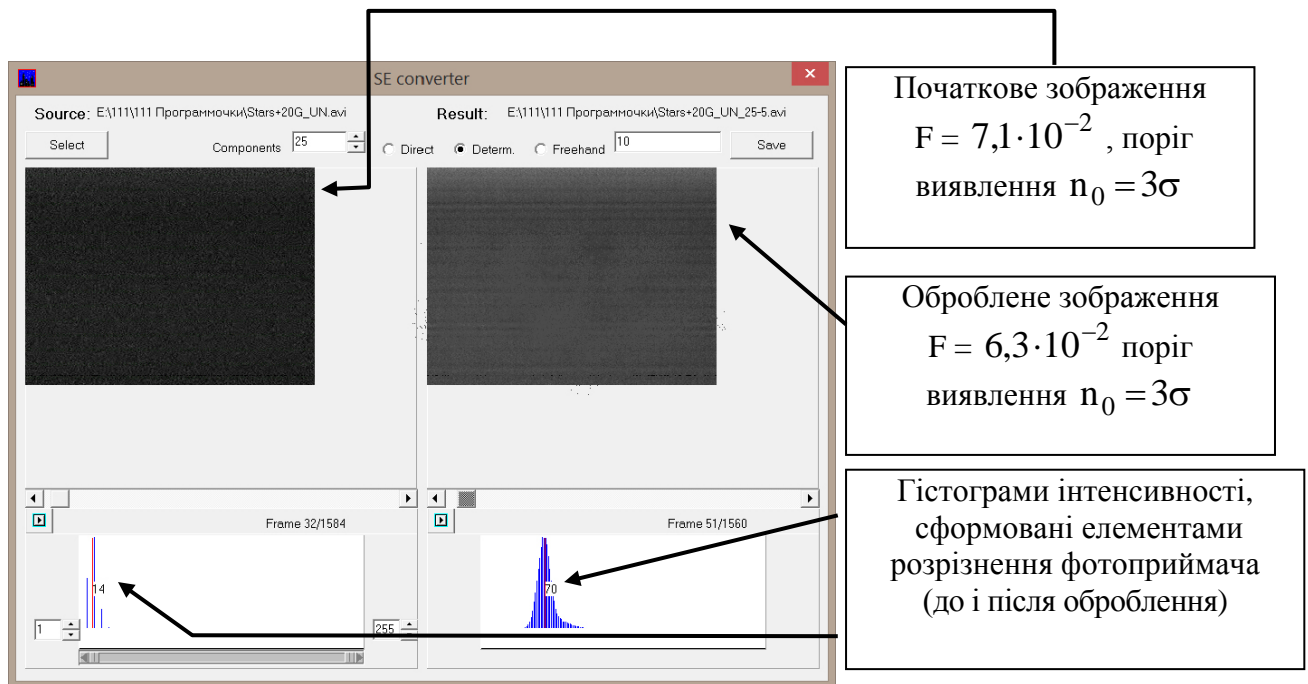


Рисунок 5.10 – Експериментальні результати дослідження поведінки флуктуаційної складової фону оптико-електронної системи з обмеженим динамічним діапазоном

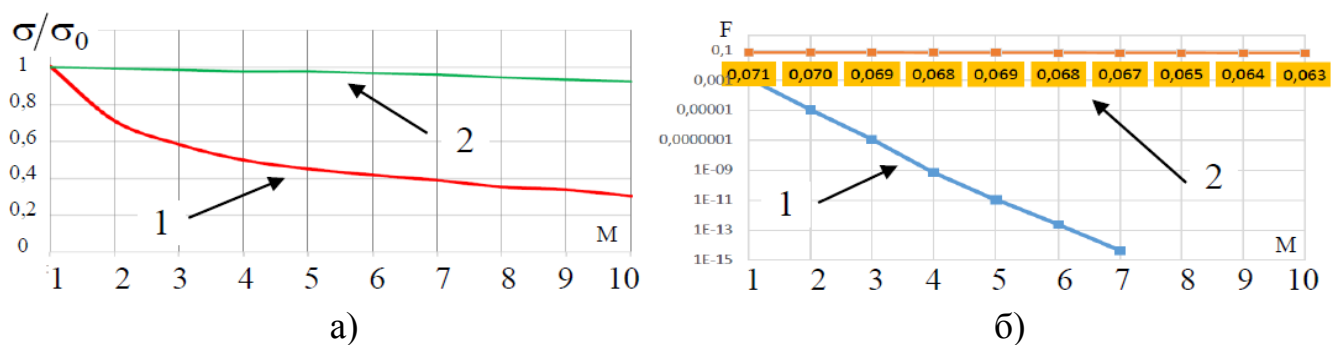
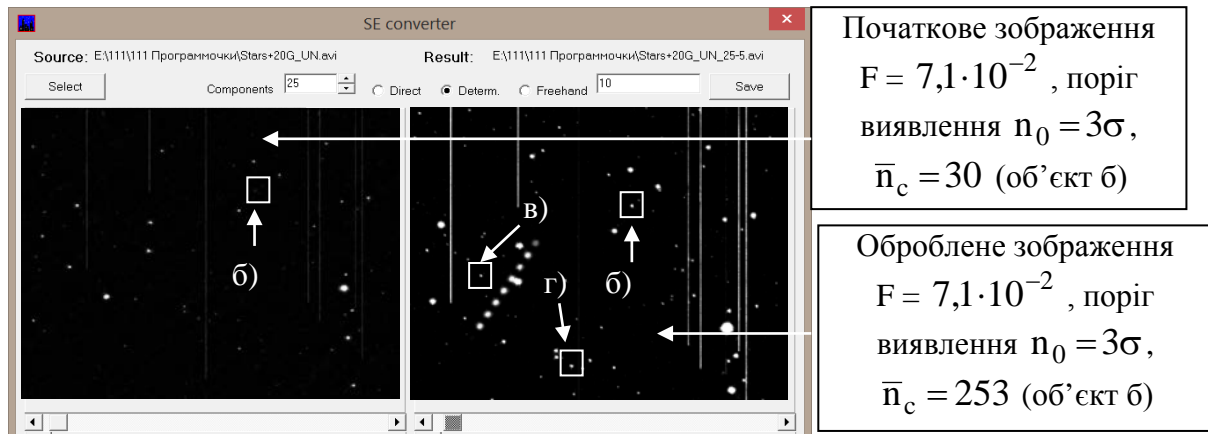
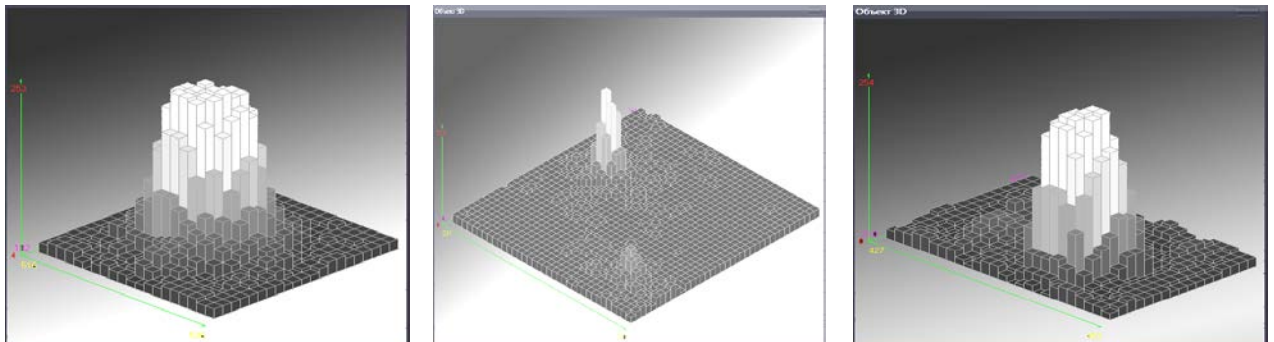


Рисунок 5.11 – Залежність а) зміни СКВ від кількості накопичених кадрів; б) умовної ймовірності хибної тривоги від кількості накопичених кадрів; 1 – стохастична поведінка шумової складової прийнята на основі центральної граничної теореми; 2 – стохастична поведінка шумової складової прийнята на основі узагальненої граничної теореми

На рис. 5.12 показані експериментальні результати оброблення астрономічних спостережень. Статистичні характеристики фонові складові підпорядковувалися сталому закону розподілу з характеристичним показником  $\alpha = 1$ .



а)



б)

в)

г)

Рисунок 5.12 – Експериментальні результати оброблення фрагмента зоряного неба: а) результат міжкадрового накопичення; б) гістограма амплітуди спостережуваного сигналу; в) гістограма амплітуди шумової складової; г) гістограма амплітуди шумової флуктуації великої інтенсивності

Аналіз результатів експериментальних досліджень уможливорює формулювання висновку про те, що для цих умов експерименту ефективність системи за критерієм умовної ймовірності хибної тривоги не змінилася. Засто-

сування міжкадрового накопичення дозволило збільшити амплітуду сигнальної складової (об'єкт б)) у 8 разів. Таким чином, при загальному покращенні якості зображення у вислідному зображенні виявлені неправдиві позначки (перешкода г)).

Матеріали підрозділу опубліковані в [14], [203], [204], [205], [215], [216], [219]. У роботах запропоновано використовувати метод узгодження просторових та енергетичних характеристик об'єктів із виявною здатністю оптико-електронних систем.

Матеріали підрозділів 5.4 і 5.5 реалізовані у вигляді методики дослідження енергетичних і просторово-часових параметрів сигналів за допомогою методів математичної статистики та лабораторних досліджень (Акт впровадження наукової роботи автора в навчальний процес Української інженерно-педагогічної академії Міністерства освіти і науки України (додаток А)).

#### 5.6. Виявлення ослаблених оптичних сигналів із використанням методів накопичення

Як відзначалося в попередніх підрозділах, для збільшення динамічного діапазону й узгодження динамічних діапазонів вхідного сигналу і приймача оптичного випромінювання на практиці активно застосовують різні пристрої типу нейтральних фільтрів і діафрагм, які реалізують стохастичне ослаблення світлових потоків. Такий спосіб ослаблення вхідного сигналу погіршує відношення сигнал/шум ослабленого світлового потоку (п. 3.2). Водночас відомо, що застосування процедури дискретного міжкадрового накопичення сигналу дозволяє наблизитися до потенційних значень імовірнісних показників виявлення (п. 5.5). Очевидно, що комбінування цих двох методів оброблення оптичних сигналів у додетекторній і піследетекторній областях оптико-електронної системи розширює її можливості з виявлення об'єктів на тлі адитивних перешкод великої інтенсивності.

Приймаючи пуассонівську модель вихідних сигналів, розглянемо реа-

лізацію випадкового потоку з випадковими моментами появи фотовідліків на виході фотоприймача з коефіцієнтом квантової ефективності  $q$ . Для проведення вимірювань в умовах впливу сильних адитивних перешкод потрібно узгодити інтенсивність сигналу з динамічним діапазоном фотоприймача. Розглянемо метод узгодження, який полягає в ослабленні вхідного сигналу за допомогою нейтрального фільтра. Послаблення оптичного сигналу після нейтрального фільтра можна розглядати як результат проріджування вихідного пуассонівського потоку квантів світла. Для нейтрального фільтра послаблення в  $k > 1$  разів реалізується випадковим (з імовірністю  $p = k^{-1}$ ) пропусканням кожного фотона вихідного потоку. У цьому випадку реалізується стохастичне, ймовірнісне послаблення потоку світла (п. 3.6).

Унаслідок стохастичного послаблення вихідних світлових потоків статистика не змінюється через інваріантність потоків Пуассона до такого типу перетворення. Випадкові потоки  $N(t)$ , одержувані послабленням у  $k$ -разів вихідних, так само є найпростішими потоками. У процесі виявлення висуваються гіпотези про відсутність сигналу від об'єкта -  $H_0$  і його наявність -  $H_1$ . Таким чином, виявлення зводиться до прийняття однієї з гіпотез за результатами спостереження реалізації  $n(t)$  випадкового потоку  $N(t)$  і формулювання рішення  $\gamma_0$  або  $\gamma_1$  про прийняття відповідної гіпотези [23].

В оптико-електронній системі реалізується дискретна форма реєстрації сигналу, у результаті чого реалізація випадкового потоку  $n(t)$  піддається тимчасовій дискретизації. Накопичення сигналу в післядетекторній області реалізується шляхом накопичення  $M$  кадрів, сумарна тривалість яких дорівнює часу накопичення сигналу  $T_H$ . При обмеженому  $T_H$  й інтервалі дискретизації (тривалості кадру)  $t_i$  ( $n(t_i) = n_i$ ;  $t_i \in T_H$ ;  $q$ ) отримуємо однорідну вибірку  $n = (n_1, \dots, n_i, \dots, n_m)$  з імовірністю за наявності сигналу і його відсутності відповідно:

$$P_{n_i}^{(cn)}(t_i) = \frac{\left(\frac{\bar{n}_{ci} + \bar{n}_{mi}}{k}\right)^{n_i}}{n_i!} \cdot e^{-\left(\frac{\bar{n}_{ci} + \bar{n}_{mi}}{k}\right)}, \quad (5.28)$$

$$P_{n_i}^{(n)}(t_i) = \frac{\left(\frac{\bar{n}_{mi}}{k}\right)^{n_i}}{n_i!} \cdot e^{-\left(\frac{\bar{n}_{mi}}{k}\right)}, \quad (5.29)$$

де  $\bar{n}_{ci}$ ,  $\bar{n}_{mi}$  – середні значення фотовідліків на  $i$ -му підінтервалі спостереження у вихідному пуассонівському потоці для сигнальної складової і складової перешкод, відповідно.

За невідомий параметр сигналу приймається номер гіпотези з невизначеними апіорі можливостями. До алгоритму висувається вимога формулювання єдиного рішення в результаті оброблення вхідних даних за весь фіксований інтервал спостереження. Матриця втрат вважається апіорно не заданою.

Зважаючи на наявні апіорні дані, синтез алгоритму виявлення сигналу доцільно здійснювати за критерієм Неймана-Пірсона. У цьому випадку правило розв'язування полягатиме в обчисленні значення відношення правдоподібності і порівняння результату обчислень із порогом  $C$ . Вираз для відношення правдоподібності при розбитті інтервалу спостереження на статистично незалежні підінтервали (кадри) тривалістю  $t_i$ , має вигляд:

$$l = \prod_{i=1}^m \frac{P_{n_i}^{(cn)}(t_i)}{P_{n_i}^{(n)}(t_i)}, \quad (5.30)$$

$$\frac{P_{n_i}^{(cn)}(t_i)}{P_{n_i}^{(n)}(t_i)} = \frac{\frac{\left((\bar{n}_{ci} + \bar{n}_{mi})k^{-1}\right)^{n_i}}{n_i!} \cdot e^{-\left((\bar{n}_{ci} + \bar{n}_{mi})k^{-1}\right)}}{\frac{\left(\bar{n}_{mi}k^{-1}\right)^{n_i}}{n_i!} \cdot e^{-\left(\bar{n}_{mi}k^{-1}\right)}} = e^{-\left(\bar{n}_{ci}k^{-1}\right)} \frac{\left((\bar{n}_{ci} + \bar{n}_{mi})k^{-1}\right)^{n_i}}{\left(\bar{n}_{mi}k^{-1}\right)^{n_i}} \cdot \frac{n_i!}{n_i!}. \quad (5.31)$$

Відповідно, для логарифма відношення правдоподібності маємо:

$$\ln l = \ln \prod_i \frac{P_{n_i}^{(cn)}(t_i)}{P_{n_i}^{(n)}(t_i)} = -\sum_{i=1}^m \bar{n}_{ci} k^{-1} + \sum_{i=1}^m \ln \left( \frac{\left( (\bar{n}_{ci} + \bar{n}_{ni}) k^{-1} \right)^{n_i}}{n_i!} \cdot \frac{n_i!}{\left( \bar{n}_{ni} k^{-1} \right)^{n_i}} \right). \quad (5.32)$$

Як видно з (5.32), перший член виразу не несе статистично залежних характеристик спостережуваної реалізації сигналу, тому як достатню статистику можна прийняти:

$$S(l) = \sum_{i=1}^m \ln \left( \frac{\left( (\bar{n}_{ci} + \bar{n}_{ni}) k^{-1} \right)^{n_i}}{n_i!} \cdot \frac{n_i!}{\left( \bar{n}_{ni} k^{-1} \right)^{n_i}} \right). \quad (5.33)$$

Оскільки в процесі реєстрації зображення об'єкта при малому інтервалі спостереження зміна середнього значення фотовідліків для сигналу і перешкоди в кадрі буде незначним, то правомірним буде припущення про сталість середніх значень сигналу і перешкоди на всьому інтервалі спостереження  $\bar{n}_{ci} \rightarrow \bar{n}_c = \text{const}; \bar{n}_{ni} \rightarrow \bar{n}_n = \text{const}$ . Тоді вираз для відношення правдоподібності можна записати у вигляді:

$$S(l) = \sum_{i=1}^m \ln \left( \frac{\left( (\bar{n}_c + \bar{n}_n) k^{-1} \right)^{n_i}}{n_i!} \cdot \frac{n_i!}{\left( \bar{n}_n k^{-1} \right)^{n_i}} \right) = \sum_{i=1}^m \ln \left( \frac{\left( \bar{n}_c + \bar{n}_n \right)^{n_i}}{\bar{n}_n^{n_i}} \right) = \sum_{i=1}^m n_i (\ln(\bar{n}_c + \bar{n}_n) - \ln(\bar{n}_n)). \quad (5.34)$$

Як випливає з (5.34), оброблення результатів зводиться до підрахування відкликів із вагою  $(\ln(\bar{n}_c + \bar{n}_n) - \ln(\bar{n}_n))$  у кожному елементі розділення (розрізнення).

Очевидно, що функціональне оброблення кадрів із метою їх виявлення

з урахуванням (5.34), буде здійснюватися паралельним або послідовним зчитуванням інтенсивностей у кожному елементі розділення (розрізнення). На виході алгоритму виявлення буде формуватися значення відношення правдоподібності, у результаті порівняння якого з обраним значенням порога виробляється рішення про наявність чи відсутність сигналу в кожному елементі розділення (розрізнення) фотоприймача.

Так само можна помітити, що отриманий нами вираз для достатньої статистики відношення правдоподібності не залежить від величини коефіцієнта послаблення. Це може пояснюватися тим, що статистика сигналу і перешкоди не змінюється при їх стохастичному послабленні.

Отримаємо вирази для обчислення робочих характеристик алгоритму виявлення. Процес виявлення сигналу на фоні перешкод буде супроводжуватися наявністю помилок прийняття рішення, умовною ймовірністю помилкового виявлення й умовною ймовірністю пропуску сигналу. Якість отриманих алгоритмів буде визначатися значеннями імовірнісних характеристик, які забезпечуються використанням цих алгоритмів. Імовірнісні характеристики виявлення розраховані за виразами

$$D = \sum_{n=n_0}^{\infty} \frac{\left( (\bar{n}_c + \bar{n}_n) T_H k^{-1} \right)^n}{n!} \cdot e^{-\left( (\bar{n}_c + \bar{n}_n) T_H k^{-1} \right)}, \quad (5.35)$$

$$F = \sum_{n=n_0}^{\infty} \frac{\left( \bar{n}_n T_H k^{-1} \right)^n}{n!} \cdot e^{-\left( \bar{n}_n T_H k^{-1} \right)}, \quad (5.36)$$

де  $n_0$  – поріг виявлення;

$\bar{n}_c + \bar{n}_n$  та  $\bar{n}_n$  - середня швидкість рахунку фотовідліків.

Перетворюючи вирази (5.35), (5.36) з урахуванням параметрів оптико-електронної системи отримаємо:

$$D = 1 - e^{-\left( \frac{(\bar{n}_c + \bar{n}_n) \tau_o q T_H}{k} \right)} \sum_{n=0}^{n_0} \frac{\left( \frac{(\bar{n}_c + \bar{n}_n) \tau_o q T_H}{k} \right)^n}{n!}, \quad (5.37)$$

$$F = 1 - e^{-\left(\frac{\bar{n}_\Pi \tau_o q T_H}{k}\right)} \sum_{n=0}^{n_0} \frac{\left(\frac{\bar{n}_\Pi \tau_o q T_H}{k}\right)^n}{n!}. \quad (5.38)$$

Для розрахунку робочих характеристик алгоритму виявлення при великих значеннях перешкоди і з огляду на задовільну апроксимацію закону Пуассона нормальним законом розподілу в області математичного сподівання запишемо (5.37) і (5.38) через інтеграл імовірності виду

$$\Phi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \text{ тоді}$$

$$D = 0,5 - \Phi_0 \left( \frac{(n_0 - (\bar{n}_c + \bar{n}_\Pi)) k^{-1} \tau_o q T_H}{\sqrt{(\bar{n}_c + \bar{n}_\Pi) k^{-1} \tau_o q T_H}} \right), \quad (5.39)$$

$$F = 0,5 - \Phi_0 \left( \frac{(n_0 - \bar{n}_\Pi) k^{-1} \tau_o q T_H}{\sqrt{\bar{n}_\Pi k^{-1} \tau_o q T_H}} \right). \quad (5.40)$$

Із наведених аналітичних виразів (5.39) і (5.40) якісних характеристик роботи алгоритму виявлення видно, що при заданій імовірності хибної тривоги й інтенсивності перешкоди збільшення коефіцієнта послаблення і відсутності накопичення спричиняє зменшення ймовірності правильного виявлення пропорційно величині  $k$ . Водночас, при  $k > 1$  застосування операції накопичення сигналу дозволяє компенсувати вплив коефіцієнта послаблення на імовірнісні характеристики і при значенні часу накопичення сигналу  $T_H = \sum_{i=0}^M t_i$ , коли  $M = k$  запропонований метод забезпечує виявлення сигналів

без втрат в імовірнісних характеристиках при різних значеннях  $F$  і  $\bar{n}_\Pi$ .

Результати досліджень, розглянуті в п. 5.6, використані при вивченні процесу розширення динамічного діапазону оптико-електронних систем у складі акустооптичних аналізаторів спектра.

Розширення динамічного діапазону акустооптичних аналізаторів

спектра та їхня адаптація до одночасного приймання й аналізу спектрів радіосигналів у широкому діапазоні потужностей визначається точністю відліку частоти реєстрованого сигналу. Імовірність одночасного впливу на вхід фотоприймача з різними амплітудами визначається умовами проведення експерименту.

Для забезпечення високої ефективності оптико-електронної системи, включеної до складу акустооптичних аналізаторів спектра, за критерієм максимуму величини умовної ймовірності правильного виявлення застосовуються методи міжкадрового накопичення сигналу, розглянуті в п. 5.4, п. 5.5. Як зауважувалося в попередніх підрозділах, вибір методу і часу накопичення сигналів зумовлений початковими умовами, що характеризують приймальний сигнал, і параметрами системи, що обмежують приймання і реєстрацію сигналів. Багатоелементні фотоприймальні пристрої характеризуються обмеженням за часом експозиції, пов'язаного з режимом насичення приймача. Дослідження, проведені в розділі 4, роботах [143], [155] – [156], показали, що енергетичні й часові характеристики сигналів можуть бути пов'язані з мультиплікативними викривленнями, що призводять до формування сигналів з умовнопуассонівською статистикою зі збільшеною дисперсією за рахунок угруповання вихідних сигналів. Це порушує принцип лінійної суперпозиції.

У [156] запропонований метод розширення динамічного діапазону оптико-електронної системи, включеної до складу акустооптичного аналізатора спектра, заснований на комбінованому використанні методів послаблення і методів міжкадрового і внутрішньокадрового накопичення. Для уникнення появи нелінійного відгуку за рахунок фонон-фононного ефекту на виході акустооптичного аналізатора спектра використовується метод урахування енергетичних параметрів вхідного сигналу.

У роботі [210] автор висунув пропозицію використовувати стохастико-детерміновані методи оброблення сигналів в оптико-електронних системах, що входять до складу акустооптичних аналізаторів спектра, а також враховувати квантову природу взаємодії електромагнітного випромінювання із сере-

довищем поширення. Дисертантка розробила метод стохастико-детермінованої оброблення сигналів (розглянутий у п. 5.5), який дозволяє підвищити величину відношення сигнал/шум пропорційно  $\sqrt{M}$  – кількості накопичених реалізацій.

У роботі [153] здобувач запропонував застосувати методи міжкадрового накопичення при реєстрації сигналів слабкої інтенсивності на фоні сильних перешкод.

Матеріали підрозділу наведені в [156] і впроваджені у вигляді математичної моделі взаємодії оптичного випромінювання з елементами оптико-електронної системи, яка входить до складу акустооптичних аналізаторів спектра. Метод і алгоритм послідовного послаблення й міжкадрового та внутрішньокадрового накопичення, розроблений на основі запропонованих стохастико-детермінованих методів оброблення сигналів, уможливив збільшення динамічного діапазону на 40%. (Акт впровадження наукової роботи автора у Відкритому акціонерному товаристві «Спеціальне конструкторське бюро радіотехнічних приладів» – дочірньому підприємстві Державної акціонерної холдингової компанії «Топаз» Міністерства промислової політики (додаток В)).

Матеріали підрозділу реалізовані у вигляді методики створення оптимальних і квазіоптимальних алгоритмів сигналів і зображень (Акт впровадження наукової роботи автора в навчальний процес Української інженерно-педагогічної академії Міністерства освіти і науки України (додаток А)).

#### 5.7. Виявлення парнокорельованого потоку сигналів на тлі пуассонівського шуму

Метою підрозділу є синтез квазіоптимального виявника для реєстрації парнокорельованого потоку сигналів у фотометричних системах. Для синтезу виявника використана модель сигналів в оптико-електронних системах при реєстрації надслабкого випромінювання, розроблена в Розділі 4.

Світловий потік реєструється за допомогою прямого фотодетектування фотоелектронним помножувачем, який працює в режимі лічення фотонів. Кількість імпульсів і фотовідліків на виході фотоелектронного помножувача пропорційні інтенсивності вимірюваного світлового потоку. Фотовідліки реєструються за час накопичення  $T_H$ .

При реєстрації та вимірюванні інтенсивності слабких світлових потоків мінімум відносної похибки вимірювань буде дуже обмежуватися значенням внутрішніх шумів ФЕМ, на тлі яких проводиться статистичне оцінювання інтенсивності приймального випромінювання.

В основу побудови схеми детектора парнокорельованого потоку, покладений факт наявності парних кореляцій між сигнальними фотонами, сигнальними та шумовими імпульсами, а також імовірність появи ініційованого парного шумового імпульсу. Імовірність появи ініційованого імпульсу на інтервалі  $t_i, t_i + \tau$  можна визначити:

$$P = P_0 \int_{t_i}^{t_i + \tau} f(t) dt,$$

де  $P_0$  – імовірність ініціації парного імпульсу;

$f(t)$  – функція щільності розподілу часу появи парного імпульсу;

$t_i$  – момент появи  $i$ -го сигнального імпульсу на виході фотоелектронного помножувача.

Схема виявника парнокорельованого потоку імпульсів наведена на рис. 5.13.

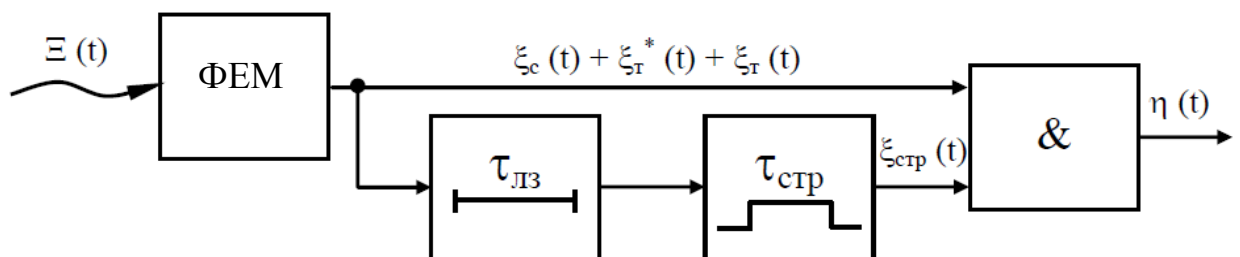


Рисунок 5.13 – Схема виявника парнокорельованого потоку

Схема являє собою два паралельні канали, сигнали надходять на схему порівняння. На перший вхід схеми порівняння надходить адитивна суміш шумових  $\xi_{ш}(t)$ , сигнальних  $\xi_c(t)$  та ініційованих імпульсів  $\xi_{ш}^*(t)$  тривалістю  $\tau_{и}$  і середнім значенням  $\lambda T_H$  на інтервалі накопичення. На другий вхід схеми подається потік стробових імпульсів тривалістю  $\tau_{стр}$ . Імпульсами запуску формувача строба є випадковий потік імпульсів ФЕМ із зсувом за часом на  $\tau_{лз}$ . При виконанні умов

$$\tau_{и} < \tau_{лз} \ll \tau_{стр} < T_H \quad \text{і} \quad \lambda^{-1} \gg \tau_{стр}$$

імовірність потрапляння в строб ініційованих шумових імпульсів велика, і на виході схеми порівняння формується потік фотовіддіків, середнє значення яких близьке до потоку сигнальних імпульсів. Тривалість стробового імпульсу необхідно обирати з урахуванням імовірності потрапляння парного імпульсу.

На рисунках 5.14 і 5.15 наведені часові послідовності роботи виявника парнокорельованих імпульсів: вхідний потік фотонів на вході ФЕМ; адитивна суміш сигнальних і шумових імпульсів; вихідні імпульси фотовіддіків, які формуються ФЕМ.

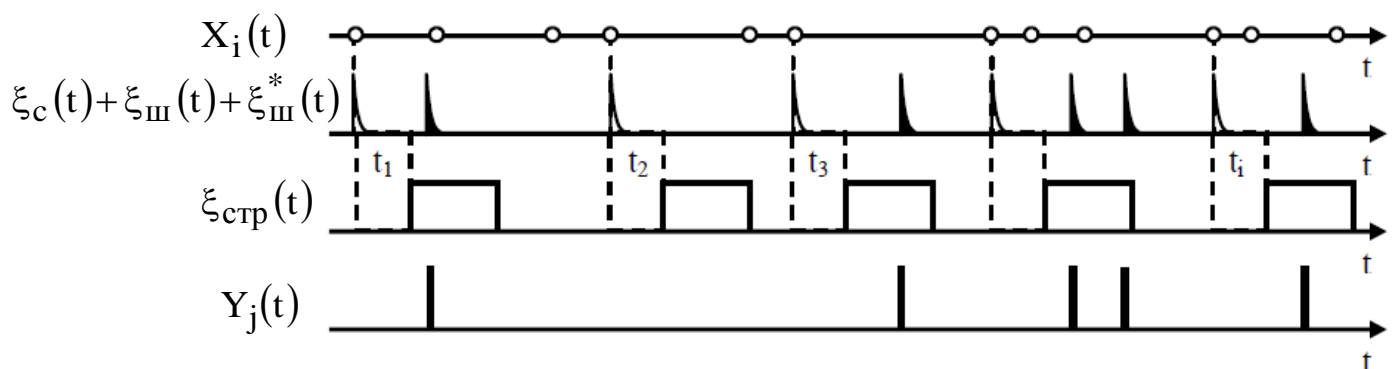


Рисунок 5.14 – Оброблення парнокорельованого потоку за наявності сигналу (■ – шумові імпульси; □ – сигнальні імпульси)

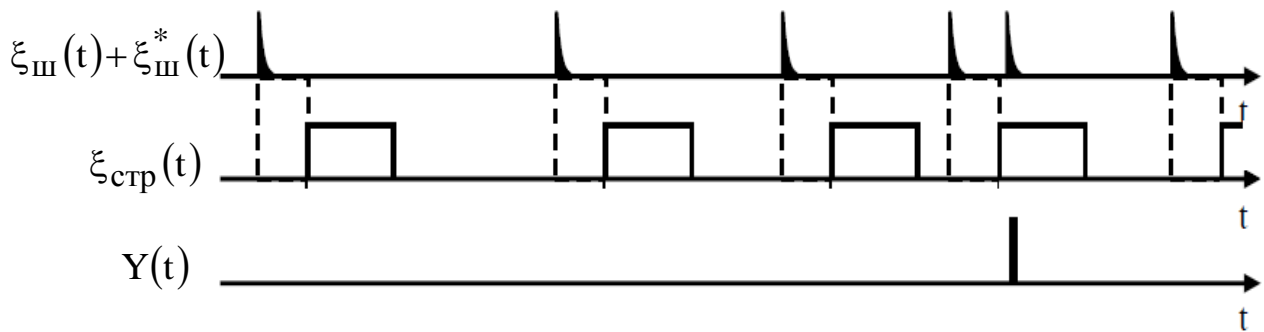


Рисунок 5.15 – Оброблення парнокорельованого потоку за відсутності сигналу

Відносну похибку оцінки інтенсивності потоку сигнальних фотовідліків можна описати як величину обернену відношенню сигнал/шум. Якщо прийняти пуассонівську статистику випадкового потоку, можна записати:

$$\delta = \frac{1}{\varphi} = \frac{(\lambda_c + \lambda_{\text{ш}})^{0,5}}{\lambda_c T_{\text{н}}^{0,5}},$$

де  $\lambda_c$  – інтенсивність потоку імпульсів фотовідліків, зумовлених сигнальним потоком;

$\lambda_{\text{ш}}$  – інтенсивність потоку фотовідліків, зумовлених шумом;

$T_{\text{н}}$  – час накопичення.

З урахуванням оброблення в запропонованій схемі виявника парнокорельованих сигналів можна записати:

$$\delta = \frac{[\lambda_c P(\tau_{\text{стр}}) + \lambda_{\text{ш}} \tau_{\text{стр}} \tau_{\text{ш}}^{-1}]^{0,5}}{\lambda_c P(\tau_{\text{стр}}) \Gamma_{\text{н}}^{0,5}}$$

Відносна похибка виявлення парнокорельованого імпульсу визначається тривалістю строга.

### Квазіоптимальний виявник парнокорельованого потоку.

Структура приймача визначається в дискретному часі відношенням правдоподібності:

$$\Lambda = \frac{\pi_k^{c+\text{ш}}(\tau_1 \dots \tau_k; \Omega)}{\pi_k^{\text{ш}}(\tau_1 \dots \tau_k; \Omega)}, \quad (5.41)$$

де  $\pi_k^{c+\text{ш}}(\tau_1 \dots \tau_k; \Omega)$  і  $\pi_k^{\text{ш}}(\tau_1 \dots \tau_k; \Omega)$  – густини ймовірності, якщо сигнал наявний і якщо його немає.

Для знаходження густини ймовірності адитивної суміші сигнальної і шумової складових, згідно з [34], при додаванні  $m$  статистично незалежних потоків із твірними функціоналами  $L^{(i)}[u; \Omega]$  твірний функціонал сумарного потоку дорівнює добутку твірних функціоналів потоків доданків:

$$L[u; \Omega] = \prod_{i=1}^m L^{(i)}[u; \Omega]$$

а його кореляційні функції, відповідно, дорівнюють сумі парних кореляцій:

$$g_k(\tau_1 \dots \tau_k) = \sum_{i=1}^m g_k^{(i)}(\tau_1 \dots \tau_k) \quad (5.42)$$

Парнокорельований потік корисного сигналу, твірний функціонал якого, згідно з (4.32), має вигляд:

$$L^c[u; \Omega] = \exp \left[ \int_{\Omega} d\tau g_1^c(\tau) u(\tau) + \frac{1}{2} \int_{\Omega} d\tau_1 \int_{\Omega} d\tau_2 g_2^c(\tau_1, \tau_2) u(\tau_1) u(\tau_2) \right], \quad (5.43)$$

і пуассонівський потік шумів, твірний функціонал якого, згідно з [34], має вигляд:

$$L^{\text{ш}}[u; \Omega] = \exp \left[ \int_{\Omega} d\tau g_1^{\text{ш}}(\tau) u(\tau) \right]. \quad (5.44)$$

для сумарного потоку отримуємо:

$$L^{c+\text{ш}}[u;\Omega] = \exp \left[ \int_{\Omega} d\tau g_1^{c+\text{ш}}(\tau) u(\tau) + \frac{1}{2} \int_{\Omega} d\tau_1 \int_{\Omega} d\tau_2 g_2^{c+\text{ш}}(\tau_1, \tau_2) u(\tau_1) u(\tau_2) \right], \quad (5.45)$$

де

$$\begin{aligned} g_1^{c+\text{ш}}(\tau) &= g_1^c(\tau) + g_1^{\text{ш}}(\tau), \\ g_2^{c+\text{ш}}(\tau_1, \tau_2) &= g_2^c(\tau_1, \tau_2) + g_2^{\text{ш}}(\tau). \end{aligned} \quad (5.46)$$

Сума статистично незалежних парнокорельованого сигнального і пуассонівського шумового потоків також є парнокорельованим потоком і має однакову з сигнальним потоком другу кореляційну функцію.

Запишемо вирази для  $\pi_k^{c+\text{ш}}(\tau_1 \dots \tau_k; \Omega)$  і  $\pi_k^{\text{ш}}(\tau_1 \dots \tau_k; \Omega)$ . Густина ймовірності для пуассонівського шуму:

$$\pi_k^{\text{ш}}(\tau_1 \dots \tau_k; \Omega) = \exp \left[ \chi_0^{\text{ш}}(\Omega) + \sum_{i=1}^k \ln \chi_1^{\text{ш}}(\tau_i; \Omega) \right], \quad (5.47)$$

де

$$\begin{aligned} \chi_0^{\text{ш}}(\Omega) &= -G_1^{\text{ш}}(\Omega) = - \int_{\Omega} d\tau g_1^{\text{ш}}(\tau), \\ \chi_1^{\text{ш}}(\tau; \Omega) &= g_1^{\text{ш}}(\tau). \end{aligned}$$

Густина ймовірності для сумарного потоку сигналу і шуму отримуємо:

$$\pi_k^{c+\text{ш}}(\tau_1 \dots \tau_k; \Omega) = \exp \left[ \chi_0^{c+\text{ш}}(\Omega) + \sum_{i=1}^k \ln \chi_1^{c+\text{ш}}(\tau_i; \Omega) \right] U_k^{c+\text{ш}}(\tau_1 \dots \tau_k). \quad (5.48)$$

$U_k^{c+\text{ш}}(\tau_1 \dots \tau_k)$  визначається виразом:

$$U_k(\tau_1, \dots, \tau_k; T) = U_{k-1}(\tau_1, \dots, \tau_{k-1}; T) + \sum_{i=1}^{k-1} q(\tau_i, \tau_k) U_{k-2}(\tau_1, \dots, \tau_{i-1}, \tau_{i+1}, \dots, \tau_{k-1}; T) \quad (5.49)$$

Для логарифма відношення правдоподібності  $l = \ln \Lambda$  знаходимо:

$$l = \ln U_k^{c+\text{ш}}(\tau_1 \dots \tau_k) + \sum_{i=1}^k \ln \left[ 1 + \frac{\chi_1^c(\tau_i; \Omega)}{\chi_1^{\text{ш}}(\tau_i; \Omega)} \right] + \chi_0^c(\Omega). \quad (5.50)$$

У граничному випадку відсутності парних кореляцій у сигнальному потоці  $g_2^c(\tau', \tau'') = 0$  отримуємо  $U_k^{c+\text{ш}}(\tau_1 \dots \tau_k) = 1$  і (5.50) переходить у результат для оптимального оброблення пуассонівського потоку сигналів на тлі пуассонівських шумів).

**Структура виявника парнокорельованого потоку.** Розглянемо випадок рівня шумів, досить високого для виконання нерівності:

$$\chi_1^c(\tau_i; T) \ll \chi_1^{\text{ш}}(\tau_i; T). \quad (5.51)$$

Тоді в другому члені достатньої статистики (5.50) можна записати:

$$\sum_{i=1}^k \ln \left[ 1 + \frac{\chi_1^c(\tau_i; T)}{\chi_1^{\text{ш}}(\tau_i; T)} \right] \approx \sum_{i=1}^k \frac{\chi_1^c(\tau_i; T)}{\chi_1^{\text{ш}}(\tau_i; T)}, \quad (5.52)$$

а в першому – знехтувати в знаменнику виразу для  $q^{c+\text{ш}}(\tau', \tau'')$  доданками  $\chi_1^c(\tau_i; T)$  порівняно з  $\chi_1^{\text{ш}}(\tau_i; T)$  і, наближено вважати, що :

$$q^{c+\text{ш}}(\tau', \tau'') \approx \frac{g_2^c(\tau', \tau'')}{\chi_1^{\text{ш}}(\tau'; T) \chi_1^{\text{ш}}(\tau''; T)} \quad (5.53)$$

Якщо рівень шумів досить високий і для виконання нерівності

$$\frac{g_2^c(\tau', \tau'')}{\chi_1^{\text{III}}(\tau'; T)\chi_1^{\text{III}}(\tau''; T)} \ll 1, \quad (5.54)$$

то, відповідно до (5.53),  $q^{c+\text{III}}(\tau', \tau'') \ll 1$ , й у виразах для  $U_k^{c+\text{III}}(\tau_1 \dots \tau_k)$  можна залишити тільки лінійні по  $q^{c+\text{III}}(\tau', \tau'')$  члени. Тоді зі співвідношень (5.49) маємо:

$$U_k^{c+\text{III}}(\tau_1, \dots, \tau_k; T) = 1 + \sum_{1 \leq i < j \leq k} q^{c+\text{III}}(\tau_i, \tau_j),$$

а для першого члена достатньої статистики:

$$\ln U_k^{c+\text{III}}(\tau_1, \dots, \tau_k; T) \approx \sum_{1 \leq i < j \leq k} q^{c+\text{III}}(\tau_i, \tau_j). \quad (5.55)$$

Якщо другим членом можна знехтувати порівняно з першим

$$\sum_{i=1}^k \frac{\chi_1^c(\tau_i; T)}{\chi_1^{\text{III}}(\tau_i; T)} \ll \sum_{1 \leq i < j \leq k} q^{c+\text{III}}(\tau_i, \tau_j), \quad (5.56)$$

то для достатньої статистики маємо остаточно:

$$I_{\text{дост}} = \frac{1}{\lambda_{\text{III}}^2} \sum_{1 \leq i < j \leq k} g_2^c(\tau_i, \tau_j), \quad (5.57)$$

де для простоти передбачалося, що пуассонівський шумовий потік є стаціонарним  $\chi_1^{\text{III}}(\tau; T) = g_1^{\text{III}}(\tau) = \lambda_{\text{III}}$ . Найпростіша структурна схема, що відповідає (5.57), наведена на рис 5.16 (РП – розв’язувальний пристрій,  $U_0$  – поріг прийняття рішення). У міру надходження сигналів у моменти часу  $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_k$  обчислюються функції  $g_2^c(\tau_i, \tau_j)$ , підсумовуються отримані значення і порівнюються із заданим порогом.

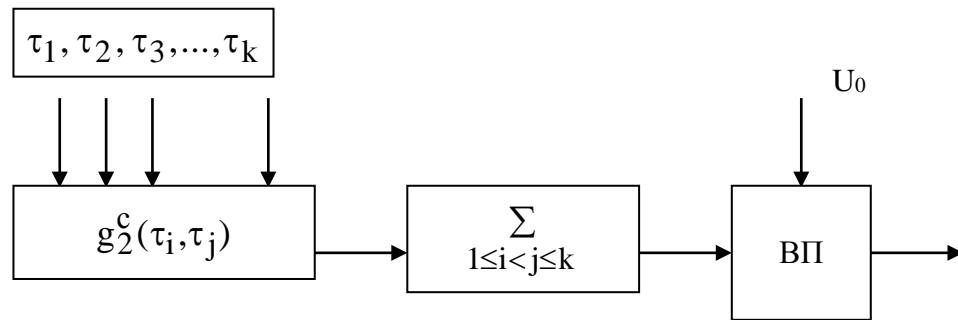


Рисунок 5.16 – Структурна схема квазіоптимального виявника парнокорельованого потоку в пуассонівському шумі

Виявник є одноканальним, містить операцію попарного підсумовування з вагою  $g_2^c(\tau_i, \tau_j)$ . Така реалізація може мати обмеження. Ступінь парних кореляцій у довільному (сигнальному) парнокорельованому потоці визначається, як показано в п. 4.3, відношенням  $r(T) = G_2^c(T) / G_1^c(T)$ , причому значення  $r(T) = 0$  відповідає відсутності парних кореляцій, а максимальне значення  $r(T) = 1$  – виродженню в потік парних подій.

Проінтегрувавши нерівності (5.51) і (5.54) по інтервалу, отримуємо:

$$\begin{aligned} \bar{n}_c(1-r(T)) &\ll \lambda_{\text{ш}} T, \\ r(T)\bar{n}_c &\ll (\lambda_{\text{ш}} T)^2, \end{aligned} \quad (5.58)$$

$$\lambda_{\text{ш}} \ll \frac{\sum_{1 \leq i < j \leq k} g_2^c(\tau_i, \tau_j)}{\sum_{i=1}^k \chi_1^c(\tau_i; T)}. \quad (5.59)$$

Перша нерівність (5.58) виконується, якщо парні кореляції в сигнальному потоці досить інтенсивні  $r(T) \approx 1$ . Тоді друга (5.59) зводиться до умови

$$\lambda_{\text{ш}} \gg \sqrt{\bar{n}_c} / T.$$

Нерівність (5.59) накладає на інтенсивність шуму обмеження: висока інтенсивність шуму може виявлятися великою частотою проходження шумових сигналів, і може помилково сприйматися квазіоптимальним виявником як прояв парних кореляцій у сигнальному потоці.

При прямокутній формі кореляційної функції  $g_2^c(\tau_i, \tau_j)$  (коли  $g_2^c(\tau_i, \tau_j) = \text{const}$  при  $|\tau_i - \tau_j| \leq \Delta$  і  $g_2^c(\tau_i, \tau_j) = 0$  в усіх інших випадках,  $\Delta$  – інтервал парних кореляцій), квазіоптимальне виявлення полягає в підрахуванні пар сигналів, рознесених у часі не більше, ніж на  $\Delta$ . Така схема легко реалізується формуванням (при надходженні кожної нової події) строба тривалістю  $\Delta$ , протягом якого відкритий блок лічильника.

Таким чином, отримані вирази для густини ймовірності  $\pi_k(\tau_1 \dots \tau_k; \Omega)$  появи в області спостереження  $k$  до нескінченно вузьких імпульсів парнокорельованого потоку подій дозволили синтезувати схему за критерієм Неймана-Пірсона виявлення парнокорельованого потоку сигналів на тлі пуассонівського потоку шумів.

Запропонована схема виявника парнокорельованих імпульсів, й оцінена інтенсивність сигнальних фотовідліків для випадку пуассонівського і парнокорельованих потоків.

5.8. Рекомендації щодо забезпечення високої точності визначення просторово-часових характеристик сигналів із підвищеними ймовірнісними характеристиками виявлення в оптико-електронних системах

Одним з основних напрямів розвитку теорії стохастико-детермінованого оброблення сигналів в оптико-електронних системах є удосконалення процесів перетворення стохастичних сигналів оптичною системою і приймачем випромінювання, а також процес виявлення сигналів на тлі шуму.

При підвищенні ефективності оптико-електронних систем необхідно

враховувати стохастичні, енергетичні і просторово-часові властивості сигналів. При виконанні різних завдань за допомогою оптико-електронних систем її структура може змінюватися. Залежно від призначення до її складу можуть входити пристрої, що перетворюють сигналів із метою більш ефективного прийняття рішення. Основним етапом при моделюванні і конструюванні оптико-електронних систем (як розглянуто в п. 2.2 Розділу 2) є узгодження параметрів обраних елементів системи, наприклад, характеристик оптичної ланки або фотоприймача з умовами спостереження і характеристиками спостережуваних об'єктів.

У дисертаційній роботі розглянуто сигнали, яким притаманні стохастичні й детерміновані властивості, а також сигнали, які характеризуються групованими властивостями і підпорядковуються різним граничним теоремам.

Названі властивості передбачають удосконалення методів виявлення сигналів в оптико-електронних системах з обов'язковим їх урахуванням.

Можна визначити критерій узгодження просторових і енергетичних характеристик спостережуваних сигналів із властивостями системи. Критерій враховує розмір і контраст об'єктів і визначає взаємозв'язок цих характеристик із частотно-контрастною чутливістю системи. Критерій визначається співвідношенням між сумарним впливом властивостей оптико-електронної системи і сумарним впливом властивостей сигналів за умови вибору критерію ефективності системи:

$$K = \left[ \sum_i \text{системи} - \sum_j \text{сигналів} \right] \Big| E_m,$$

де  $\sum_i \text{системи}$  – сумарний вплив параметрів системи;

$\sum_j \text{сигналів}$  – сумарний вплив властивостей сигналів;

$E_m$  – показники ефективності оптико-електронної системи.

Стохастико-детерміновані властивості приймальних сигналів, які необхідно враховувати в розробленні методів оброблення сигналів в оптико-електронних системах:

- ✓ енергетичні властивості;
- ✓ просторово-часові властивості;
- ✓ стохастичні властивості;
- ✓ детерміновані властивості;
- ✓ парнокорельовані властивості;
- ✓ груповані властивості;
- ✓ статистичні властивості, що підпорядковуються узагальненим

граничним теоремам.

Властивості оптико-електронних систем, що впливають на вибір і розроблення методів оброблення сигналів в оптико-електронних системах:

- якість і склад оптичної ланки;
- властивості фотоприймача;
- час реєстрації сигналів.

## 5.9. Висновки

У розділі в межах окресленої в дисертаційній роботі науково-технічної проблеми підвищення ефективності оптико-електронних систем за допомогою розвитку математичних моделей і стохастико-детермінованих методів приймання й оброблення сигналів виконані такі завдання:

– розроблені й оптимізовані методи процесу оброблення сигналів, які розширюють динамічний діапазон телевізійних систем, як у бік реєстрації надслабких, так і в бік сильних сигналів на тлі перешкод; вивчені можливості розроблених методів у практичному застосуванні;

– розроблені методи і рекомендації із проектування нових та удосконалення наявних систем, які враховують характеристики спостережуваних об'єктів і забезпечують високу точність вимірювання просторових і часових

характеристик реєстрованих сигналів із підвищеними ймовірнісними характеристиками виявлення при значному зменшенні прийняття помилкового рішення.

За результатами теоретичних і експериментальних досліджень виявної здатності оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном, проведених з урахуванням розроблених статистичних моделей і методів просторово-часового накопичення можна зробити такі висновки:

1. Для оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном не існує загального параметра виявлення, наприклад, як величина відношення сигнал/шум (для систем радіочастотного діапазону). Виявну здатність систем необхідно аналізувати з урахуванням ймовірнісних характеристик виявлення і співвідношень енергетичних характеристик сигналу і перешкоди [14].

2. Ефективність оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном за критеріями максимуму відношення правдоподібності, умовних ймовірностей правильного виявлення і хибної тривоги, величини відношення сигнал/шум підвищена в десятки разів завдяки врахуванню додаткових статистичних особливостей приймальних сигналів.

3. Порівняльний аналіз ймовірності прийняття помилкового рішення при розрахунку виявної здатності систем з обмеженим динамічним діапазоном із використанням різних граничних теорем для опису статистичних характеристик вихідних сигналів показав, що при виборі порогового значення виявлення до  $3\sigma$  спостерігається задовільний збіг для значень ймовірності для різних значень коефіцієнта послаблення. Збільшення коефіцієнта послаблення в системі призводить до істотного збільшення ймовірності прийняття помилкового рішення (рис. 5.3) [14], [139], [215].

4. Розраховані робочі характеристики виявлення оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном з урахуванням стохастичної поведінки шумової компоненти, що підпорядковується різним граничних теоремам показали, що при стабілізації ймовірності прийняття помилкового рі-

шення на заданому рівні ймовірність правильного виявлення буде істотно знижуватися через збільшення значення порога виявлення (рис. 5.4).

5. Експериментальні результати [14], [150], [153], [204], [209] – [211] щодо застосування методів міжкадрового і внутрішньокадрового накопичення, спрямовані на покращення характеристик виявлення сильних сигналів на тлі сильних перешкод і слабких сигналів на тлі внутрішніх шумів фотоприймача, показали, що:

5.1. Статистичні характеристики сигнальної і фонові компонент, що підпорядковуються центральній граничній теоремі, залежать від часу накопичення. При малому часі експозиції усереднення флуктуацій стохастичного сигналу не спостерігається. При тривалому часі експозиції спостерігається їхнє просторово-часове усереднення, що уможливило підвищення ефективності системи за критерієм величини відношення сигнал/шум у 20 разів, за критерієм умовної ймовірності хибної тривоги в  $10^2$  разів [14], [205], [212], [221].

5.2. З огляду на стохастичну поведінку вихідних сигналів, що підпорядковуються узагальненим граничним теоремам, збільшення часу експозиції не приводить до просторово-часового усереднення флуктуацій (рис. 5.10).

6. Експериментальні результати [14], [215], [217], [219], [220], отримані при оцінюванні енергетичної переваги для послідовності кадрів, і розраховані залежності енергії сигналу від часу накопичення для стохастичного і детермінованого сигналів показали, що:

6.1. Енергія детермінованого сигналу не залежить від кількості накопичених кадрів. Накопичення детермінованого сигналу спричиняє програш, що пояснюється збільшенням порога виявлення при накопиченні стохастичної шумової флуктуації.

6.2. Стохастичний сигнал, описуваний пуассонівською статистикою, доцільніше виявляти за правилом одноразового перевищення порога в послідовності кадрів.

6.3. При виявленні стохастичного сигналу, який описують статистикою

стійких законів розподілу з характеристичним показником  $0 < \alpha < 2$ , для стійкого виявлення сигналу рекомендовано провести процедуру попередньої фільтрації, спрямовану на зниження впливу флуктуацій великої інтенсивності.

7. Отримані вирази для густини ймовірності появи в області спостереження імпульсів парнокорельованого потоку подій дозволили синтезувати схему виявлення за критерієм Неймана-Пірсона парнокорельованого потоку сигналів на тлі пуассонівського потоку шумів, що уможливило виявлення слабких сигналів на рівні внутрішніх шумів фотоприймача за рахунок додаткової статистичної ознаки [160].

Здійснені теоретичні й експериментальні дослідження дали змогу сформулювати нове *наукове положення*:

При описі процесу виявлення сигналів удосконалений метод виявлення на основі критерію узгодження просторових та енергетичних характеристик об'єктів із виявними властивостями оптико-електронної системи. Критерій враховує розмір і контраст об'єктів і відображає взаємозв'язок цих характеристик зображення з частотно-контрастною чутливістю системи. Розраховані характеристики виявлення малорозмірних і малоконтрастних об'єктів на спеціалізованих зображеннях.

## 6 РОЗДІЛ

### СТВОРЕННЯ МЕТОДІВ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ В ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВІ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ СТОХАСТИКО-ДЕТЕРМІНОВАНОГО ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

**Мета.** Збільшити ефективність оптико-електронних систем завдяки створенню методів і алгоритмів оброблення сигналів, що враховують ефекти взаємодії прийнятого оптичного випромінювання з елементами оптико-електронної системи.

Для досягнення визначеної мети на основі комплексного підходу, який включає спільне використання хвильового і корпускулярного опису сигналів, розроблені методи просторово-часової міжкадрового і внутрішньокадрового оброблення сигналів, які покращують якість зображень рухомих і близько розташованих малорозмірних, малоконтрастних об'єктів; вивчений вплив методів компресії на мікроструктуру і статистичні характеристики зображень. Матеріал, запропонований у розділі, опублікований у [14], [139], [148], [150], [152], [197], [199], [207], [209], [212], [213].

Розділ спрямований на виконання поставленого в роботі завдання: розробити методи й алгоритми фільтрації шумових складових корисного сигналу на основі стохастико-детермінованого оброблення сигналів. Методи й алгоритми, орієнтовані на розширення динамічного діапазону оптико-електронних систем і ґрунтуються на комбінованому використанні корпускулярних і хвильових теоретичних методів опису сигналів з урахуванням енергетичних і просторово-часових властивостей сигналів та перешкод. Здійснені експериментальні дослідження скеровані на вивчення можливості розроблених (оптимізованих) алгоритмів у практичному застосуванні.

Завдання просторового розрізнення та енергетичного виявлення виконуються шляхом цифрового оброблення сигналів і зображень [168], [169],

[173], [182]–[184] засновані на порогових [22], [23], [38], [44], [71], [162], [166] і кореляційних [225], [226] методах виявлення. При створенні методів оброблення сигналів використовують модель вихідного сигналу, подану некорельованим гауссовим випадковим процесом [22] – [32], [85]. Однак на практиці реалізувати оптимальний прийом сигналів, які мають гауссову статистику не завжди вдається. У наш час дедалі більше приділяють уваги методам оброблення сигналів, які враховують додаткові характеристики реєстрованих сигналів [44], [72], [75], [94].

Основні проблемні питання пов'язані зі спостереження і розрахунком параметрів малоконтрасних і малорозмірних об'єктів, сигнали від яких характеризуються значеннями енергії нижчими за поріг чутливості оптико-електронних систем. Проблеми виявлення, супроводу, розпізнавання рухомих або близько розташованих об'єктів на сьогодні не мають однозначного розв'язання. Наприклад, кореляційні методи досить добре застосовувати для виявлення сигналів, що характеризуються малими значеннями величини сигнал/шум, при цьому необхідна апіорна інформація про спостережувані об'єкти [227] – [229]. Для реалізації методів сегментації зображень використовують розпізнавальні ознаки, характерні тільки для спостережуваних об'єктів [230], [231]. Різницеві методи добре себе зарекомендували для виділення рухомих об'єктів у послідовності аналізованих кадрів, якщо не спостерігається вплив шумової складової [232] – [238]. Також при відносно однорідному тлі ефективні методи виділення об'єктів із використанням лінійної і нелінійної просторової фільтрації та порогові методи [239] – [241].

Отже, універсальних методів для реєстрації малорозмірних, малоконтрасних об'єктів на сьогодні не існує [243] – [245].

Перспективним напрямом є розроблення методів, які поєднують різні теоретичні методи оброблення даних і використовують додаткові статистичні характеристики як сигналів, так і перешкод в оптико-електронних системах.

### 6.1. Імітаційне моделювання методу виявлення зображення рухомих об'єктів відомої форми в телевізійних кадрах в умовах слабкої освітленості

Розширення динамічного діапазону на нижній межі досягається шляхом зниження порогів чутливості. У Розділі 5 розглянуті методи виявлення стаціонарних малорозмірних, малоконтрастних об'єктів. Виявлення і супровід малоконтрастних рухомих об'єктів значно ускладнюється при спостереженні рухомих об'єктів, тобто змішування зображення об'єкта за час експозиції і в одному кадрі значно перевищує розміри одного елемента розрізнення зображення. У результаті чого за час експозиції на зображенні виникають викривлення, пов'язані з його розмиттям. Методи виявлення рухомих об'єктів в оптико-електронних системах описані в роботах [162], [168], [169], [193], наприклад: диференціальні методи першого і другого порядку, тензорні, кореляційні та фазові методи. Тільки деякі з описаних методів можна застосовувати в умовах слабкої освітленості, тим більше при значній швидкості руху об'єктів. Ці методи складно реалізувати через обчислення, що обмежують їх застосування в умовах реального часу.

**Опис методу й імітаційної моделі.** Сигнал на вході оптико-електронних систем описується його статистичними параметрами, які визначаються з урахуванням просторово-часової структури цього сигналу. В умовах слабкої освітленості зображення об'єктів, які рухаються швидко, як через відносно тривалий час накопичення, так і при накопиченні коротко експозиційних кадрів, піддаються ефекту розмиття. Для демонстрації цього ефекту побудована імітаційна модель, яка формує зображення об'єкта в кадрі в умовах слабкої освітленості і швидкого руху об'єкта. Результат моделювання показаний на рисунку 6.1.

Аналізуючи рисунок 6.1, можна зробити висновок про неможливість визначення основних ознак зображення об'єкта: форми, розміру і розміщення (відповідно до швидкості і траєкторії руху).

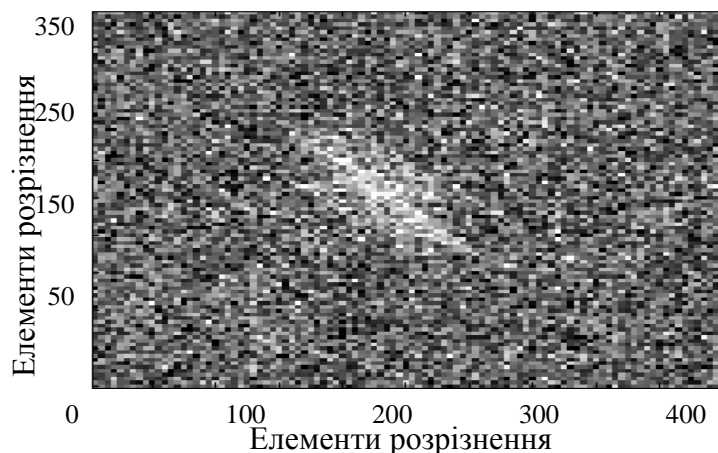


Рисунок 6.1 – Ефект розмиття при тривалому часі накопичення сигналу

Для зменшення ефекту розмиття необхідно зменшувати час накопичення (експозиції), проте це спричиняє зменшення контрастності сигналу і відповідно зменшення величини відношення сигнал/шум. Як приклад візьмемо за основу модель сигналу наведеного на рис. 6.1, і зменшимо час накопичення у 20 разів. У результаті чого отримане зображення кадру має вигляд, показаний на рис. 6.2. Видно, що ефект розмиття практично не виявляється, проте зображення об'єкта на тлі перешкод візуально розрізнити складно, що свідчить про низьке співвідношення сигнал/шум.

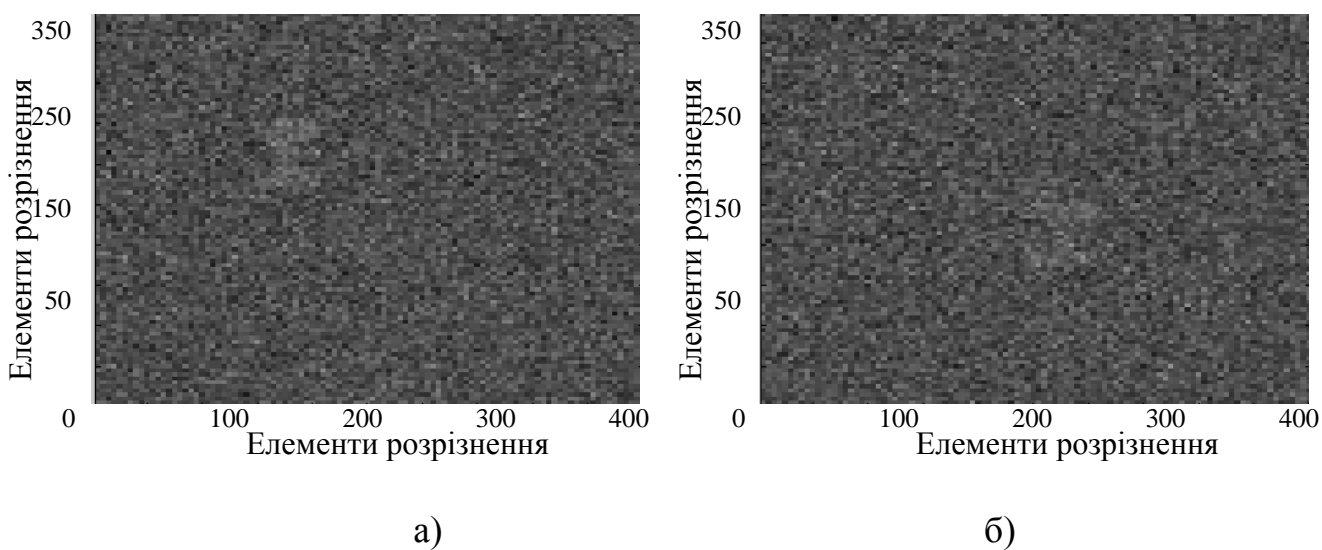


Рисунок 6.2 – Розміщення зображення об'єкта: а) початкове; б) кінцеве

Величину відношення сигнал/шум в одному елементі розділення (розрізнення) визначимо відповідно до виразу (3.30):

$$\varphi = \frac{\bar{p}_c}{\sigma_{c+\pi}}. \quad (6.1)$$

де:  $\sigma_{c+\pi}$  – середньоквадратичне відхилення адитивної суміші сигналу і шуму;

$\bar{p}_c$  – математичне сподівання сигналу.

Для зображення, наведеного на рис. 6.2, обрані параметри: дисперсія адитивної суміші сигналу і шуму дорівнює  $\sigma_{c+\pi}^2=20$ , і математичне сподівання сигналу  $\bar{p}_c=5$ , відповідно відношення сигнал/шум в одному кадрі дорівнюватиме  $\varphi=1,12$ . Однак зображення об'єкта має значні розміри, більші за один елемент розділення (розрізнення), відповідно, враховуючи загальну енергію сигналу, можна досить точно визначити розташування зображення об'єкта в кадрі. Оскільки форма і розміри зображення об'єкта відомі, то для його виявлення і визначення координат його центра доцільно застосувати кореляційний метод виявлення. Для цього необхідно знайти кореляційний інтеграл між вихідним зображенням  $U$  і стробом  $St$  (форма і розмір якого відповідають зображенню об'єкта). Оскільки модельоване зображення має дискретний характер, вираз для взаємної кореляції має вигляд:

$$Kr(k,l) = \sum_i \sum_j St(i,j)U(i+k,j+l). \quad (6.2)$$

де  $Kr$  – отримане зображення функції кореляційного інтеграла;

$U$  – початкове зображення кадру;

$St$  – строб;

$k,l$  – координати елементів розрізнення отриманого зображення;

$i,j$  – координати сумовних елементів розрізнення.

Кореляційний інтеграл подамо як зображення і надамо йому зручної

для спостереження форми. Спочатку виконаємо масштабування. Для цього необхідно всі отримані значення розділити на коефіцієнт масштабування (рис. 6.3 а):

$$k_m = \max(Kr)/255 \quad (6.3)$$

$$Kr_m = Kr/k_m \quad (6.4)$$

де  $\max(Kr)$  – максимальне значення сигналу в зображенні;

$k_m$  – коефіцієнт масштабування;

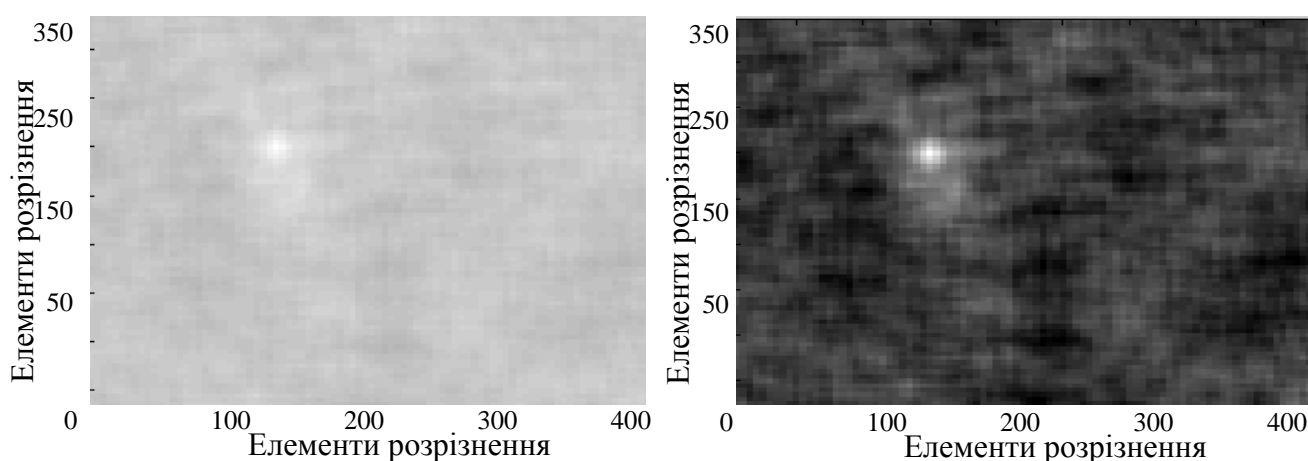
$Kr_m$  – зображення, отримане після масштабування.

Для підвищення контрастності цього зображення від усіх значень, отриманих після масштабування, віднімемо мінімальне значення, а також помножимо на коефіцієнт, який збільшує рівень яскравості (0-255) до повного динамічного діапазону монітора (рис. 6.3 б):

$$k_p = 255/(255 - \min(Kr_m)), \quad Kr_{mp} = (Kr_m - \min(Kr_m)) * k_p. \quad (6.5)$$

де  $k_p$  – коефіцієнт підвищення контрастності;

$Kr_{mp}$  – зображення, отримане підвищенням контрастності.



а)

б)

Рисунок 6.3 – Зображення: а) після масштабування;

б) після підвищення контрастності

Знайдемо координати розміщення об'єкта в зображенні кадру. Для цього визначимо координати максимального значення кореляційного інтеграла  $K_r$  в кадрі:

$$U_{\max} = \max(K_r), (i_k, j_k) \Rightarrow U_{\max} = K_r(i_k, j_k). \quad (6.6)$$

де  $U_{\max}$  – максимальне значення сигналу в зображенні  $K_r$ ;

$i_k, j_k$  – координати розміщення центру зображення об'єкта в ТВ кадрі.

Після визначення координат  $(i_k, j_k)$  виділимо область зображення, що відповідає положенню об'єкта на зображенні кадру, так, щоб вона повністю охоплювала об'єкт. З урахуванням похибок визначення координат об'єкта зображення цієї області (строба) знаходимо з виразу:

$$Q = U(x_1 : x_2, y_1 : y_2), \quad (6.7)$$

де  $x_1 = i_k - V/2 - k_s, x_2 = i_k + V/2 + k_s, y_1 = j_k - S/2 - k_s, y_2 = j_k + S/2 + k_s,$

$Q$  – строб – область кадру, що включає зображення об'єкта;

$k_s$  – поправка, що враховує похибку визначення координат  $k_s = 1, 2; V, S$  – відповідно висота і ширина об'єкта.

Оскільки у результаті зменшення часу накопичення в 20 разів зменшилося відношення сигнал/шум (у корінь із 20 разів), то для отримання прийнятної зображення і досягнення високого відношення сигнал/шум необхідно накопичити серію кадрів. Вираз для розрахунку відношення сигнал/шум при накопиченні за часом за умови незмінності положення зображення об'єкта в кожному з кадрів, як показано в п. 5.4, буде таким:

$$\varphi = \sqrt{M} \frac{\bar{n}_c}{\sigma_{c+n}}, \quad (6.8)$$

де  $M$  – кількість сумовних кадрів.

Щоб усунути викривлення, викликані змішуванням зображення об'єкта, необхідно підсумувати кадри, суміщуючи зображення об'єкта. Для цього в кожному кадрі визначаємо строб (6.8) і підсумовуємо їх:

$$U_s = \sum_{n=1}^N U_n, \quad (6.9)$$

$$Q_s = \sum_{n=1}^N Q_n, \quad (6.10)$$

де  $N$  – кількість сумовних кадрів;

$U_s$  – сума послідовності зображень кадрів;

$Q_s$  – сума стробів.

Потім у зображенні суми кадрів  $U_s$  область, що відповідає положенню об'єкта в останньому кадрі, замінюємо сумою стробів  $Q_s$ :

$$U_s(x_1 : x_2, y_1 : y_2) = Q_s. \quad (6.11)$$

де  $x_1 = i_N - V/2 - k_s, x_2 = i_N + V/2 + k_s,$

$y_1 = j_N - S/2 - k_s, y_2 = j_N + S/2 + k_s,$

Отримані зображення, перетворені відповідно до виразу (6.5), наведені на рис. 6.4. На цих зображеннях чітко виділяється об'єкт на тлі шуму, що свідчить про збільшення величини відношення сигнал/шум.

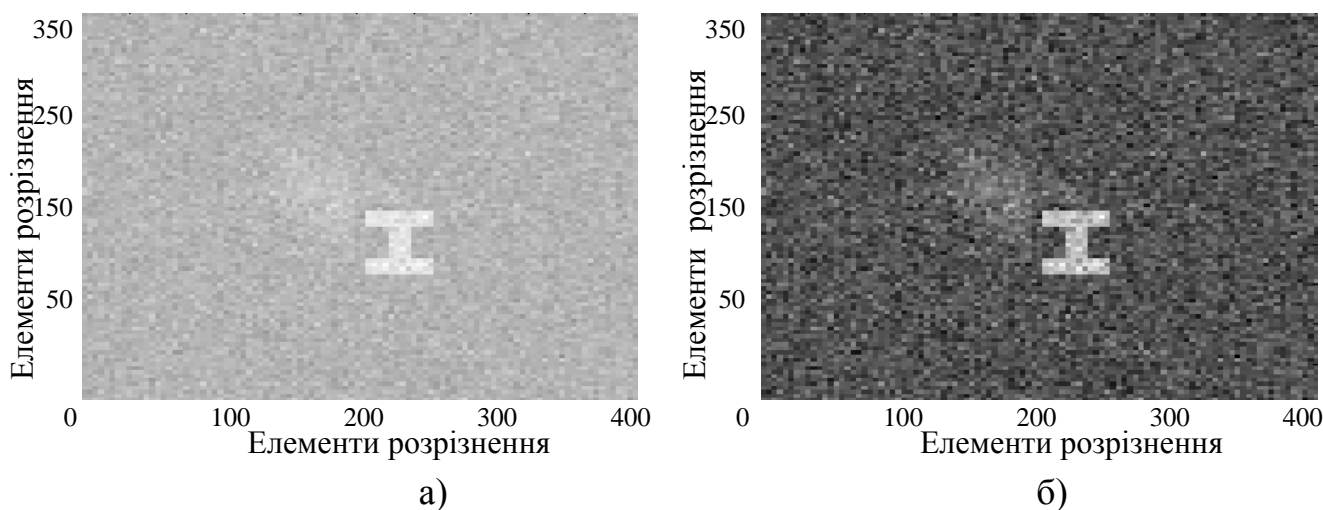


Рисунок 6.4 – Зображення суми кадрів: а) після масштабування;  
б) після підвищення контрастності

Положення зображення об'єкта відповідає кінцевій точці траєкторії його руху. Запропонований алгоритм виявлення рухомих об'єктів в умовах слабкої освітленості, який дозволяє не допустити прояв ефекту розмиття. Імітаційна модель цього алгоритму довела його працездатність навіть при незначному відношенні сигнал/шум. Однак цей метод передбачає апріорне знання розмірів і форми об'єкта. Усунення ефекту розмиття і виявлення рухомих об'єктів в умовах слабкої освітленості, при невідомих параметрах сигналу, вимагає більш складного алгоритму із застосуванням ряду еталонних стробів.

Матеріали підрозділу опубліковані в [212].

## 6.2. Оцінювання характеристик роботи алгоритму отримання зображення рухомих об'єктів відомої форми в умовах слабкої освітленості

Необхідно оцінити якісні характеристики роботи алгоритму отримання зображення рухомих об'єктів відомої форми в умовах слабкої освітленості, зокрема: відношення сигнал/шум, умовні ймовірності правильного виявлення і хибної тривоги, а також похибку оцінювання положення центру зображення

об'єкта.

При синтезі оптимального алгоритму виявлення зручно використовувати не саме відношення правдоподібності, а значення лінійних функцій від відношення правдоподібності, наприклад, його логарифма. У [23] показано, що для білого шуму достатньою статистикою логарифма відношення правдоподібності є

$$L = \frac{Y(x_o, y_o, t_o)}{N_o}, \quad (6.12)$$

де:

$$Y(x_o, y_o, t_o) = \iiint_{xyt} n(x, y, t) s(x - x_o, y - y_o, t - t_o) dx dy dt \quad (6.13)$$

- кореляційний інтеграл,

$$n(x, y, t) = \xi(x, y, t) + s(x, y, t) \quad (6.14)$$

- зображення, що формується у фокальній площині системи (реалізація адитивної суміші складової перешкод і сигнальної складової, відповідно),

$$s(x - x_o, y - y_o, t - t_o) \quad (6.15)$$

- сигнальна складова сигналу;

$N_o = \sigma_\xi^2$  - спектральна щільність білого шуму.

Значення кореляційного інтеграла  $Y(x_o, y_o, t_o)$ , є випадковим і характеризується в разі гауссової статистики величини  $n(x, y, t)$  нормальною густиною ймовірності.

Оскільки математичне сподівання шуму дорівнює 0, то математичне сподівання кореляційного інтеграла  $m_Y$  за відсутності сигнальної складової дорівнює 0. За наявності сигнальної складової в приймальній адитивній су-

міші математичне сподівання кореляційного інтеграла можна записати:

$$m_Y = \iiint_{xyt} \overline{n(x, y, t)s(x - x_o, y - y_o, t - t_o)} dx dy dt, \quad (6.16)$$

З огляду на те, що  $\overline{n(x, y, t)} = \overline{\xi(x, y, t)} + \overline{s(x, y, t)}$  і середнє значення перешкоди становить:

$$\overline{\xi(x, y, t)} = 0, \quad (6.17)$$

отримуємо:

$$m_Y = \iiint_{xyt} \overline{s(x, y, t)s(x - x_o, y - y_o, t - t_o)} dx dy dt = E, \quad (6.18)$$

тобто математичне сподівання кореляційного інтеграла дорівнює повній енергії приймального сигналу при оптимальній відповідності параметрів приймального й сподіваного сигналів.

Дисперсія кореляційного інтеграла  $\sigma_Y^2$  визначається виразом

$$\sigma_Y^2 = \overline{[Y(x_o, y_o, t_o) - m_Y]^2}. \quad (6.19)$$

Підставляючи, отримаємо для випадку відсутності сигнальної складової:

$$\sigma_Y^2 = \overline{\left[ \iiint_{xyt} \xi(x, y, t)s(x - x_o, y - y_o, t - t_o) dx dy dt \right]^2}, \quad (6.20)$$

або, здійснивши перетворення:

$$\sigma_Y^2 = \overbrace{\int \int \int \int \int \int \xi(x_1, y_1, t_1) \xi^*(x_2, y_2, t_2) \times}_{x_1 y_1 t_1} \times s(x_1 - x_0, y_1 - y_0, t_1 - t_0) s^*(x_2 - x_0, y_2 - y_0, t_2 - t_0) dx_1 dy_1 dt_1 dx_2 dy_2 dt_2 \quad (6.21)$$

де зірочка використана для позначення комплексної спряженої величини.

Середній добуток перших двох співмножників у підінтегральному виразі (6.21) являє собою кореляційну функцію складової перешкоди, яка дорівнює, в разі гауссової дельта, – функції корельованої перешкоди:

$$\overbrace{\xi(x_1, y_1, t_1) \xi^*(x_2, y_2, t_2)} = \frac{N_0}{2} \delta(x_2 - x_1, y_2 - y_1, t_2 - t_1), \quad (6.22)$$

де  $\delta(x_2 - x_1, y_2 - y_1, t_2 - t_1)$  – дельта-функція Дірака.

Підставивши (6.22) в (6.21) й урахувуючи фільтрувальну властивість дельта-функції, а також здійснивши інтегрування по  $x_2, y_2, t_2$ , отримаємо:

$$\sigma_Y^2 = \frac{N_0}{2} E. \quad (6.23)$$

Дисперсія кореляційного інтеграла за наявності детермінованого сигналу дорівнює обчисленій за відсутності сигнальної складової, і також визначається виразом (6.23).

Будемо вважати, що перешкода є гауссовою, в цьому випадку значення кореляційного інтеграла є випадковою величиною. Тоді закон розподілу значення кореляційного інтеграла за відсутності сигнальної складової описується таким виразом:

$$P[Y(x_0, y_0, t_0) | \xi] = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_Y^2}} e^{-\frac{Y^2}{2\sigma_Y^2}}, \quad (6.24)$$

де  $Y = Y(x_0, y_0, t_0)$  – кореляційний інтеграл.

Оскільки при додаванні випадкової і сталої величини отримуємо випадкову величину з дисперсією, що дорівнює дисперсії випадкової величини, і математичним сподіванням, що дорівнюють сумі математичних сподівань, то закон розподілу значення кореляційного інтеграла за наявності сигнальної компоненти описується таким виразом:

$$P[Y(x_o, y_o, t_0)|s] = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_Y^2}} e^{-\frac{(Y+E)^2}{2\sigma_Y^2}}. \quad (6.25)$$

Одним із критеріїв якості виявлення є імовірнісні характеристики – умовна ймовірність хибної тривоги й умовна ймовірність правильного виявлення. При використанні кореляційного виявника вимірюваною величиною є значення кореляційного інтеграла. Запишемо вирази для умовної ймовірності хибної тривоги  $F$  й умовної ймовірності правильного виявлення  $D$  так:

$$F = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_Y^2}} \int_{Y_o}^{\infty} e^{-\frac{Y^2}{2\sigma_Y^2}} dY, \quad (6.26)$$

$$D = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_Y^2}} \int_{Y_o}^{\infty} e^{-\frac{(Y-E)^2}{2\sigma_Y^2}} dY. \quad (6.27)$$

де  $Y_o$  – поріг.

Відношення сигнал/шум:

$$\varphi = \frac{\bar{Y}}{\sqrt{D_Y}}, \quad (6.28)$$

або, для аналізованого кореляційного виявника, використовуючи введені раніше позначення, отримаємо:

$$\varphi = \sqrt{\frac{2E}{\sigma_Y^2}}. \quad (6.29)$$

### 6.2.1. Оцінювання просторового положення зображення об'єкта

Для оцінювання просторового положення об'єкта скористаємося методом максимальної правдоподібності. Припустимо, що нам відомо положення об'єкта по осі  $y$ , тобто значення  $y_0$ . Оцінку координати центру зображення об'єкта по осі  $x$ , позначимо як  $\hat{x}_0$ . Ця оцінка відповідає точці координат, в якій відношення логарифма правдоподібності набуває максимального значення:

$$L = \frac{Y(x_{oi}, y_{oi}, t_i)}{N_o} \rightarrow \max_{x_{io} = \hat{x}_{io}} \quad (6.30)$$

Рівняння, яке задовольняє цю вимогу, запишемо у вигляді:

$$\frac{\partial}{\partial x_{io}} L \Big|_{x_{io} = \hat{x}_{io}} = 0, \quad (6.31)$$

$$\frac{1}{N_o} \frac{\partial Y(x_{oi}, t_i)}{\partial x_{oi}} = 0, \quad (6.32)$$

де  $\hat{x}_{oi}$  – оцінка в  $i$ -кадрі;

$i = 1, \dots, m$ . – номери кадрів, зроблені в моменти часу  $t_i$ .

Слід врахувати, що вирази (6.31) і (6.32) справедливі тільки за відсутності розриву функції частинної похідної, інакше з'являється невизначеність, при якій дана функція не дорівнює нулю в точці максимуму кореляційного інтеграла. Для розв'язання цієї невизначеності вважають максимумом точку, в якій частинна похідна змінює знак.

Оскільки обробляється послідовність кадрів у дискретні моменти часу, вираз кореляційного інтеграла має вигляд:

$$Y(x_{oi}, t_i) = \iint_{XY} n(x_i, t_i) s(x_i - x_{oi}, t_i) dx_i. \quad (6.33)$$

де  $n(x_i, t_i) = \xi(x_i, t_i) + s(x_i, t_i)$  – зображення, що формується в площині зображення оптико-електронної системи (реалізація адитивної суміші

перешкодової і сигнальної складової, відповідно);

$s(x_i - x_{oi}, t_i)$  – сигнальна складова.

Знайдемо частинну похідну кореляційного інтеграла (6.33) за параметром  $x_0$ :

$$\left\langle \frac{1}{N_0} \frac{\partial Y(x_{oi}, t_i)}{\partial x_{oi}} \right\rangle = \frac{1}{N_0} \frac{\partial}{\partial x_{oi}} \int \int \langle n(x_i, t_i) s(x_i - x_{oi}, t_i) \rangle dx_i dy_i = 0, \quad (6.34)$$

$N_0 = \sigma_\xi^2$  – спектральна щільність білого шуму.

Оскільки математичне сподівання шуму дорівнює нулю, то  $\xi(x) = 0$ , можна записати:

$$\langle Y(x_{oi}, t_i) \rangle = \int_x \langle s(x_i) s(x_i - x_{oi}, t_i) \rangle dx_i. \quad (6.35)$$

Розглянемо випадок, при якому об'єкт має найпростішу прямокутну форму з рівномірною яскравістю, відповідно його зріз по осі  $x$  можна розглядати як прямокутний імпульс (рисунки 6.5 а) тривалістю  $\tau$ , який описується виразами:

$$s(x_i) = \begin{cases} 0 & \text{при } x_i < x_0 - \tau / 2, \\ u_0 & \text{при } x_0 - \tau / 2 < x_i < x_0 + \tau / 2, \\ 0 & \text{при } x_i > x_0 + \tau / 2. \end{cases} \quad (6.36)$$

З огляду на те, що вираз (6.26) не дорівнює нулю тільки на інтервалі  $[-\tau, \tau]$ , вираз (6.25) можна записати так:

$$\langle Y(x_{oi}, t_i) \rangle = \int_{x_{oi}-\tau}^{x_{oi}+\tau} \langle s(x_i) s(x_i - x_{oi}, t_i) \rangle dx_i. \quad (6.37)$$

Розв'язання цього інтеграла має вигляд:

$$\langle Y(x_{0i}, t_i) \rangle = \begin{cases} 0 & \text{при } x_i < x_0 - \tau, \\ I_0(x_i - x_0) + I_0\tau & \text{при } x_0 - \tau < x_i < x_0, \\ I_0\tau - I_0(x_i - x_0) & \text{при } x_0 < x_i < x_0 + \tau, \\ 0 & \text{при } x_i > x_0 + \tau. \end{cases} \quad (6.38)$$

де  $I_0 = u_0^2 \tau$ .

Зображення функції кореляційного інтеграла показано на рисунку 6.5 (б). Знайдемо частинну похідну за параметром  $x_0$  кореляційного інтеграла й одержимо:

$$I(x_i) = \frac{\partial \langle Y(x_{0i}, t_i) \rangle}{\partial x_{0i}} = \begin{cases} 0 & \text{при } x_i < x_0 - \tau, \\ u_0 & \text{при } x_0 - \tau < x_i < x_0, \\ -u_0 & \text{при } x_0 < x_i < x_0 + \tau, \\ 0 & \text{при } x_i > x_0 + \tau. \end{cases} \quad (6.39)$$

Позначимо помилку в оцінці параметра  $x_0$ , як

$$\varepsilon = x_{0i} - \hat{x}_{0i}, \quad (6.40)$$

Оскільки частинна похідна (6.22) є оптимальним стробом при виявленні положення прямокутного імпульсу (рисунок 6.5 в), можна записати:

$$\varepsilon I_0 = \Delta I, \quad (6.41)$$

$$\Delta I = I_1 - I_2 = I_{01}\tau - I_{02}\tau,$$

де  $I_1, I_2$  – значення кореляційного інтеграла між сигналом (6,31) і стробом (при  $u_0 = 1$ ), для обох півстробів;

$$I_{01} = I_{02}.$$

Звідки знайдемо помилку оцінки параметра:

$$\varepsilon = \Delta I / I_0. \quad (6.42)$$

Визначимо дисперсію помилки:

$$D[\varepsilon] = \frac{1}{I_0^2} D[\Delta I] = \frac{\tau^2}{I_0^2} D[I_{01} + I_{02}]. \quad (6.43)$$

або

$$D[\varepsilon] = \frac{\tau^2}{I_0^2} \left[ \frac{N_0}{2} I_0 + \frac{N_0}{2} I_0 \right],$$

Відповідно дисперсія помилки буде дорівнювати відношенню довжини імпульсу на відношення сигнал/шум:

$$D[\varepsilon] = \frac{N_0 \tau^2}{I_0} = \frac{\tau^2}{I_0/N_0} \quad (6.44)$$

Визначимо також середньоквадратичне відхилення помилки оцінки параметра:

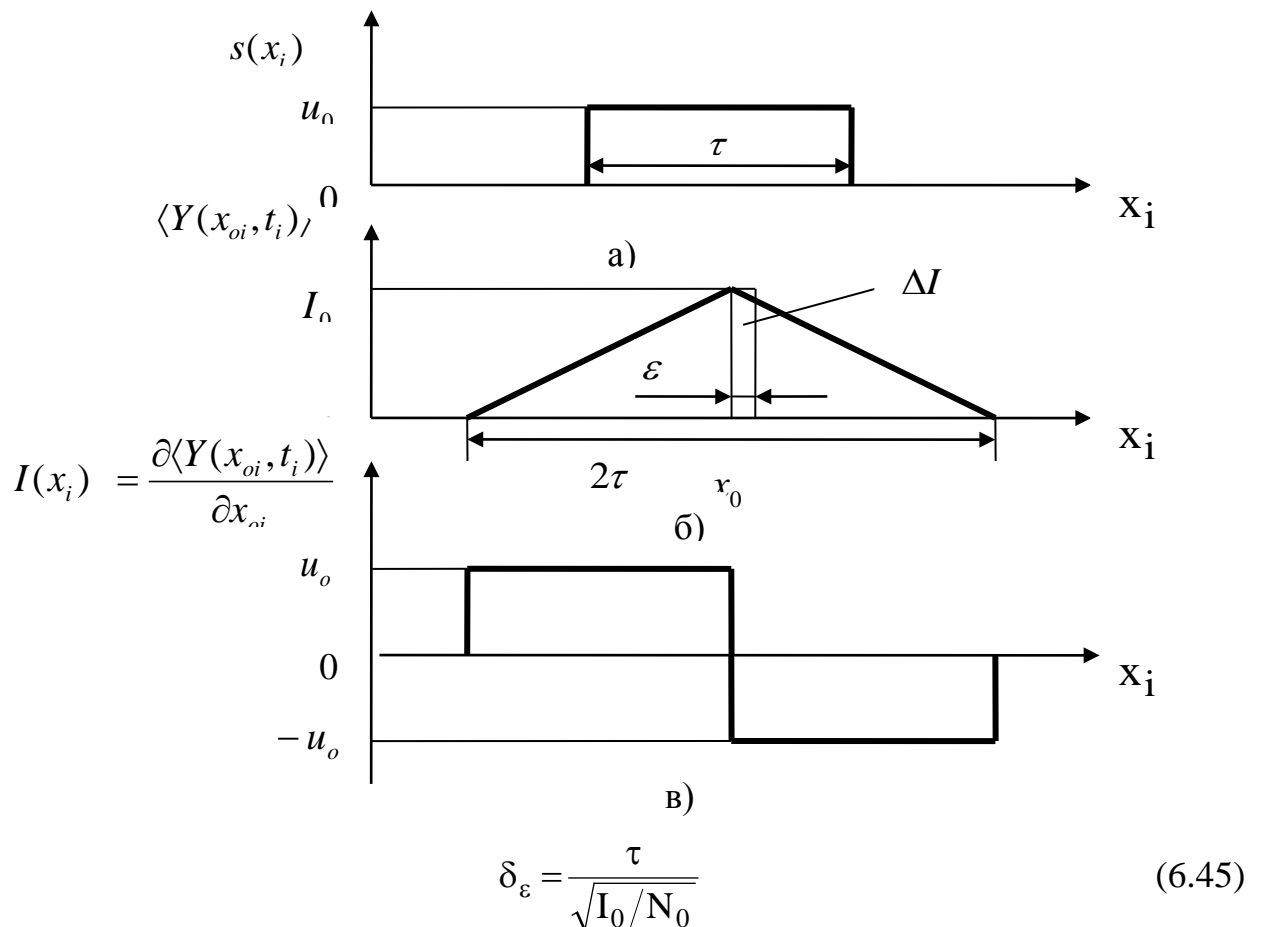


Рисунок 6.5 – а) сигнальний імпульс; б) кореляційний інтеграл;

в) частинна похідна від кореляційного інтеграла

**Експериментальні дослідження** запропонованого алгоритму виявленого рухомого об'єкта в умовах слабкої освітленості здійснені на прикладі оптико-електронної системи виявлення «Карат».

**Мета.** Аналіз можливості збільшення ефективності оптико-електронної системи виявлення «Карат» за критерієм величини відношення сигнал/шум.

### Опис експериментальної установки.

Склад експериментальної установки оптико-електронної системи: оптична система: діаметр вихідної апертури  $D_{\text{вх}} = 150$  мм, фокусна відстань  $f = 500$  мм; фотоприймач: площа фотокатода  $L_{\text{фк}} = 1 \text{ см}^2$ , кількість елементів розрізнення  $N = 1000 \times 1000$ . Об'єкт спостереження мір №1 площею  $S = 1 \text{ мм}^2$ .

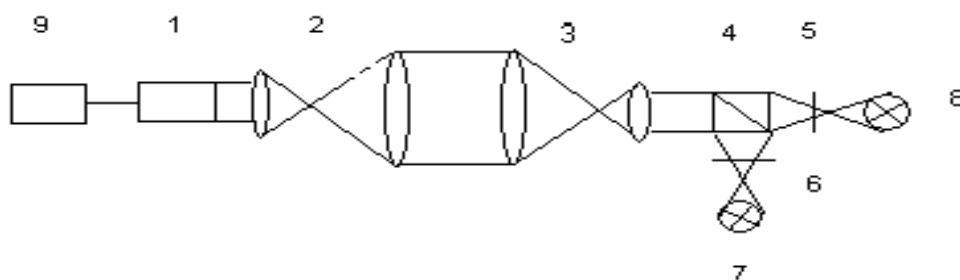


Рисунок 6.6 – Схема експериментальної установки

1 – фотоприймач; 2 – оптична система; 3 – коліматор; 4 – подільник; 5 – міра № 1; 6 – нейтральний фільтр; 7,8 – джерела випромінювання; 9 – комп'ютер.

Проаналізуємо реєстрацію оптичного випромінювання і прийняття рішення про виявлення досліджуваного об'єкта на основі розглянутих у дисертаційній роботі стохастико-детермінованих методів оброблення сигналів в оптико-електронних системах.

Освітленість, створювану досліджуваним об'єктом на фотоприймачі для точкових і протяжних об'єктів можна визначити відповідно [14]:

$$E_{\text{из}} = \frac{E_0 \sigma S_{\text{вх}} \cos \omega}{4\pi R^2 S_{\text{из}}} \tau_{\text{ср}} \tau_{\text{ос}}; \quad E_{\text{из}} = \frac{E_0 \sigma S_{\text{вх}} \cos \omega}{4\pi S_{\text{об}} f_{\text{экв}}^2} \tau_{\text{ср}} \tau_{\text{ос}},$$

де  $E_0$  – освітленість, створювана на об'єкті джерелом випромінювання;

$$S_{\text{вх}} = \pi D_{\text{вх}}^2 / 4; D_{\text{вх}} - \text{діаметр вихідної апертури};$$

$$\sigma = 4\pi R_g r_k^2 \sin \alpha \cos \phi,$$

$\tau_{\text{ср}} \tau_{\text{ос}}$  – коефіцієнти послаблення середовища й оптичної системи;

$S_{\text{об}}$  – площа об'єкта.

Визначимо відстань  $r^*$ , на якій оптико-електронна система розрізняє об'єкт із заданими параметрами  $S_{\text{із}} \succ S_{\text{ел.р.}} = 4 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$ . З аналізу рисунка 6.6 видно, що досліджуваний об'єкт буде розпізнавати система «Карат» на відстані до 6,6 км.

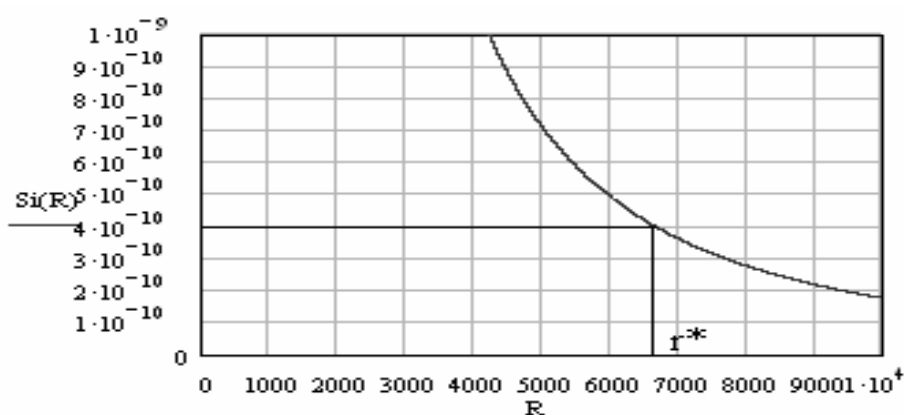


Рисунок 6.7 – Залежність площі зображення ракети від відстані до неї

Освітленість в одному елементі розрізнення фотоприймача залежить від яскравості фонового випромінювання, діаметра вхідної апертури, еквівалентної відстані оптичної системи, коефіцієнтів послаблення оптичної системи і середовища поширення. З урахуванням значень яскравості фонового випромінювання, характеристики якого наведені, наприклад, у [14], можна оцінити освітленість, створювану на фотокатоді.

Таблиця 6. 1

	Ясне небо	Хмари	Сутінки	Повний місяць
Освітленість фотоприймача, лк	$10^3$	76	0,36	$1,6 \cdot 10^{-3}$

Величина відношення сигнал/шум в елементі розрізнення визначається

відповідно до виразу (3.30):

$$\varphi = \frac{\bar{p}_c}{\sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_{ш}^2 + \sigma_T^2}},$$

де  $\bar{p}_c$  – середнє значення сигнальної складової;

$\sigma_c, \sigma_{ш}, \sigma_T$  – СКВ сигнальної, шумової складових сигналу і СКВ рівня внутрішніх шумів фотоприймача.

Результати аналізу залежностей засвідчують, що виявлення об'єкта в умовах, що характеризуються величиною відношення сигнал/шум, необхідно проводити додаткову просторово-часове оброблення.

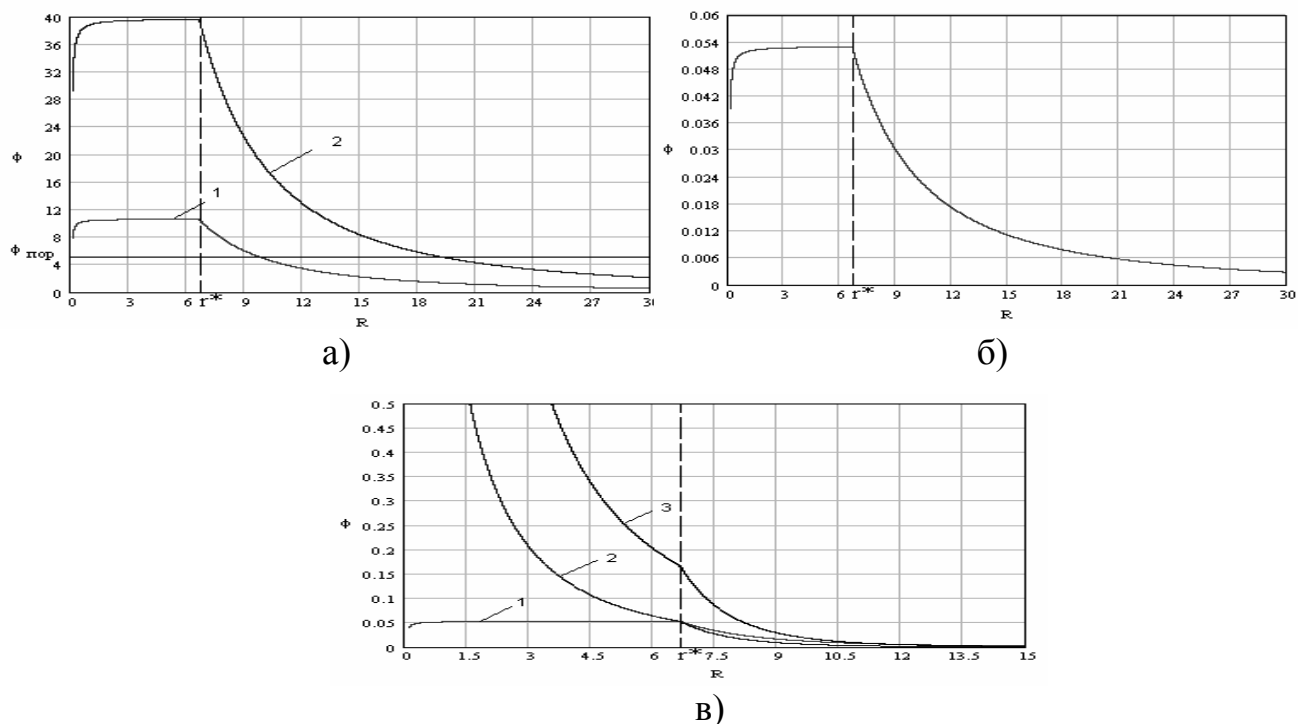
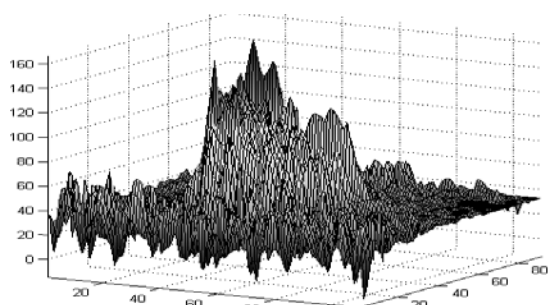
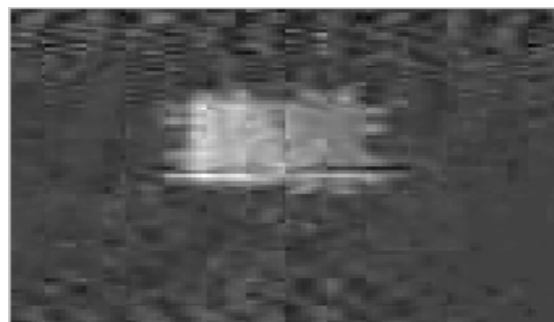


Рисунок 6.8 – а) залежність відношення сигнал/шум від відстані при виділенні сигналу цілі з сигналу від ясного неба (2) і хмар (1); б) залежність відношення сигнал/шум від відстані при виділенні сигналу цілі з сигналу від неба при освітленні повним місяцем; в) аналітичні розрахунки залежності відношення сигнал/шум від відстані до цілі в умовах освітлення повним місяцем (1 – залежності відношення сигнал/шум від відстані при виявленні в одному елементі розділення (розрізнення); 2 – залежності відношення сигнал/шум від відстані при оптимальному збиранні енергії просторових координат; 3 – залежності відношення сигнал/шум

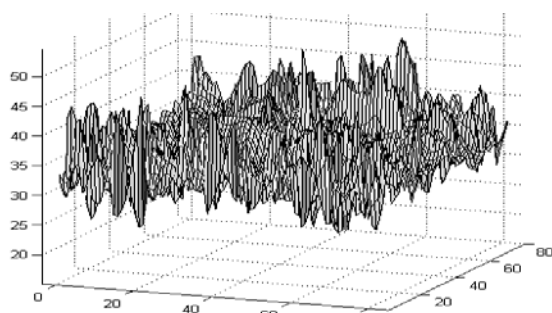
від відстані при оптимальному збиранні енергії просторових і 10 часових мод )



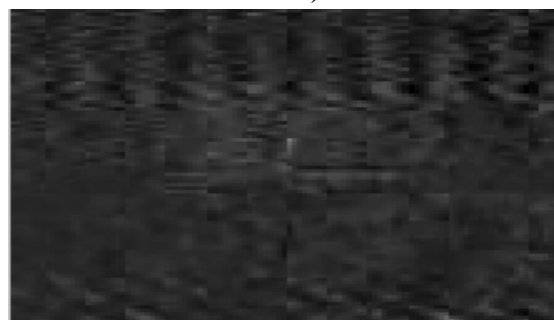
а)



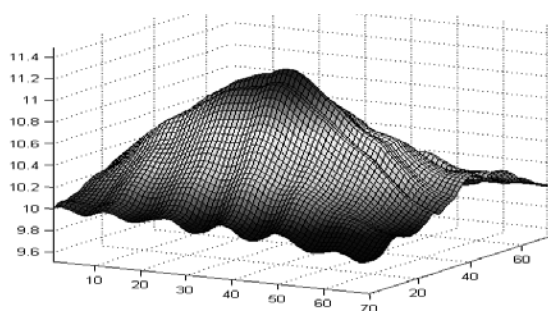
б)



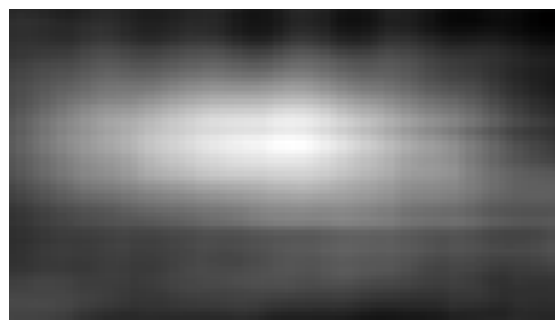
в)



г)



д)



е)

Рисунок 6.9 – Метод виявлення рухомих об'єктів: а) гістограма значень освітленості фотоприймача в умовах освітленості, яка характеризується величиною відношення сигнал/шум 20; б), г), е) зображення об'єкта спостереження на моніторі оптико-електронної системи «Карат»; в) гістограма значень освітленості фотоприймача в умовах освітленості, яка характеризується величиною відношення сигнал/шум 1,6; д) вислідне зображення

**Висновок.** Результати експериментальних досліджень, спрямованих на збільшення ефективності оптико-електронної системи виявлення «Карат» за критерієм величини сигнал/шум показали, що оптимальне використання ене-

ргії просторового розподілу сигнальної складової і часу реєстрації дозволяє збільшити ефективність оптико-електронної системи за критерієм величини відношення сигнал/шум у 5–10 разів.

Результати досліджень опубліковані в роботах [197], [209], де автор запропонував метод узгодження просторових та енергетичних характеристик спостережуваних об'єктів із властивостями виявлення оптико-електронних систем.

6.3. Імітаційне моделювання методу розрізнення зображень близько розміщених об'єктів, які мають різну яскравість

При експлуатації оптико-електронних систем виникає ситуація, коли спостерігаються близько розташовані об'єкти, які мають різну яскравість. У цьому випадку при спостереженні на зображенні виникають світлі плями засвічення, що істотно знижує рівень і якість отриманого результату у вислідних знімках, і відбувається втрата інформації про об'єкт із меншою яскравістю. Подібні ситуації можуть виникати, наприклад, за наявності яскравих джерел зустрічного світла, фари машин, ліхтарі; в астрономічних спостереженнях при вивченні близько розташованих космічних об'єктів; в акустооптичних аналізаторах спектра при розрізненні сигналів близьких за частотою [147] – [149], [152], [208], [213], [246] – [249].

Для виконання цих завдань використовують алгоритми оброблення даних, що уможлиблює розрізнення двох близько розташованих об'єктів не рівноцінних за яскравістю. У [153], [163], [165] розглядається алгоритм оброблення даних, що дозволяє покращити якість результату накопичення серії телевізійних кадрів. Цей метод дає можливість виділити слабкоконтрастний сигнал на тлі перешкод (посилити контрастні характеристики сигналу), але паралельно з цим сигнали, які мають меншу контрастність, зашумлюються цим сигналом. Отже, необхідно виділити слабкий сигнал на тлі сильного. Таке виділення можна здійснити за допомогою цифрової обробки сигналів

[164], [168], [182], а саме цифрової обробки зображень [169], [173], [174], [189], [190], [191], [196], яка пропонує широкий вибір методів підвищення якісних показників зображення: просторові і частотні методи. Але вони також не повністю розв'язують виниклу проблему.

Із [169] відомо: контрастність, помітна для ока, становить 15%, і якщо між двома суміжними елементами поверхні предмета або його зображенням немає різниці в яскравості, то виникають труднощі при розрізненні цих об'єктів. Відокремити один елемент зображення або предмета від іншого можна, очевидно, лише за умови відмінності в їхній яскравості; при цьому потрібно, щоб така різниця була не меншою за деяку «порогову» величини, неоднаковою для різних спостерігачів і різних інтенсивностей сигналів.

Випромінювання від точкових об'єктів, проходячи через оптичну систему, піддається розсіюванню, у фокальній площині приймача енергія цього випромінювання розподіляється відповідно до характеру даного розсіювання. Зокрема, для апертури таке розподілення має вигляд:

$$J(x) = J_0 \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2}{a^2}} \quad (6.46)$$

де  $J(x)$  – інтенсивність випромінювання на фокальній площині;

$J_0$  – інтенсивність у центральній точці (максимальна);

$x, x_0$  – координати на фокальній площині;

$a$  – коефіцієнт, що характеризує властивості апертури.

Зважаючи модель формування відклику на фотоприймачі, описаного в п. 2.8, розподіл від точкового об'єкта інтенсивністю  $J_1 = 50$  і при коефіцієнті  $a = 3$  буде мати вигляд, наведений на рисунку 6.10, а математично записується в такий спосіб:

$$J_1(x) = J_{01} \cdot e^{-\frac{(x-x_1)^2}{a^2}}$$

де  $J_1(x)$  – інтенсивність випромінювання на фокальній площині;

$J_{01}$  – інтенсивність у центральній точці (максимальна);

$x, x_1$  – координати на фокальній площині;

$a$  – коефіцієнт, що характеризує властивості апертури.

Можна припустити, що в області достатньо інтенсивного світіння навколо центральної точки можуть спостерігатися зображення таких самих точкових об'єктів, але значно менш яскравих. На рис. 6.10 подано зображення точкового об'єкта інтенсивністю  $J_2 = 20$ , при тому самому коефіцієнті  $a$  і координатах (центральної точки), зміщених по відношенню до центральної точки об'єкта на рис. 6.11, на три пікселі вправо. Математичний вираз для такого зображення має вигляд:

$$J_2(x) = J_{02} \cdot e^{-\frac{(x-x_2)^2}{a^2}} \quad (6.47)$$

де  $J_2(x)$  – інтенсивність випромінювання на фокальній площині;

$J_{02}$  – інтенсивність у центральній точці (максимальна);

$x, x_2$  – координати на фокальній площині;

$a$  – коефіцієнт, що характеризує властивості апертури.

При додаванні цих зображень (рис. 6.12) видно, що практично неможливо розрізнити об'єкт, показаний на рис. 6.11, на тлі більш яскравого об'єкта, наведеного на рис. 6.10.

Для виділення ознак менш яскравого точкового об'єкта, зокрема його розміщення і рівня яскравості, необхідно досить точно визначити параметри більш яскравого об'єкта (розташування і рівень яскравості), на основі отриманих даних обчислити різницеву матрицю і провести її віднімання з зображення (рис. 6.12).

Для виконання цього завдання скористаємося такою формою відновлення сигналу, як інтерполяція за отриманими даними, використовуючи ме-

тод найменших квадратів. Цей метод дозволяє визначити параметри заданої функції, що найбільше відповідають отриманим значенням [247].

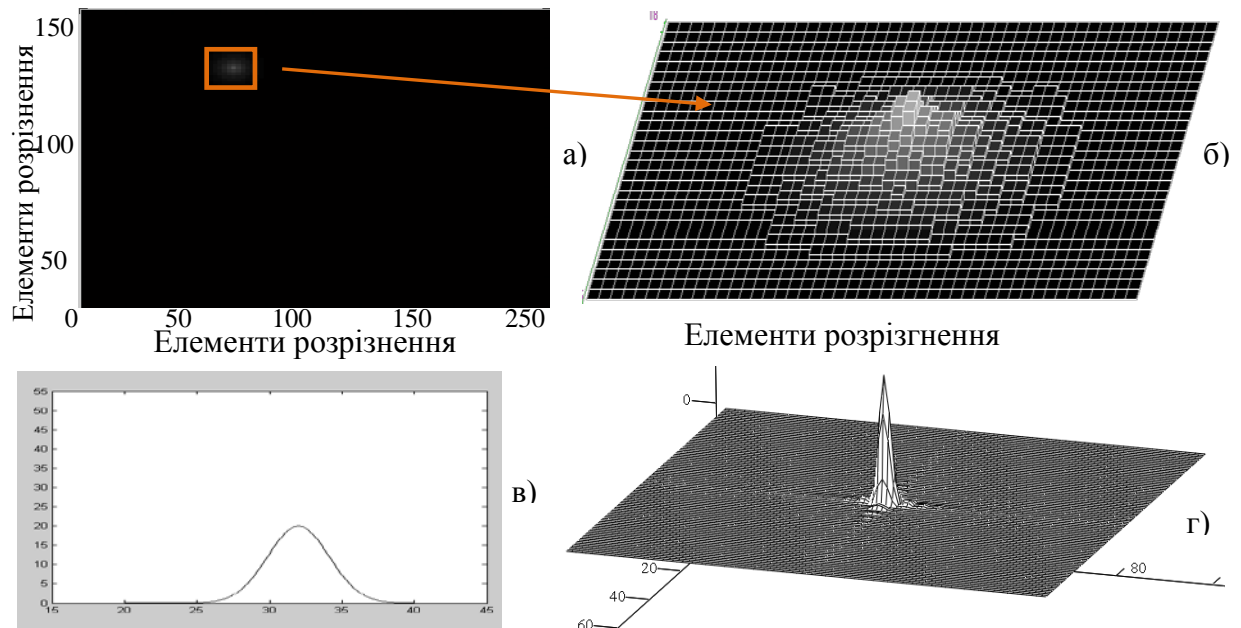


Рисунок 6.10 – Відклик оптико-електронної системи при реєстрації точкових об'єктів: а) зображення точкового об'єкта в телевізійному кадрі; б) просторовий розподіл освітленості від точкового об'єкта (комплексний корпускулярний і хвильовий опис); в) г) просторовий розподіл освітленості від точкового об'єкта (хвильовий опис)

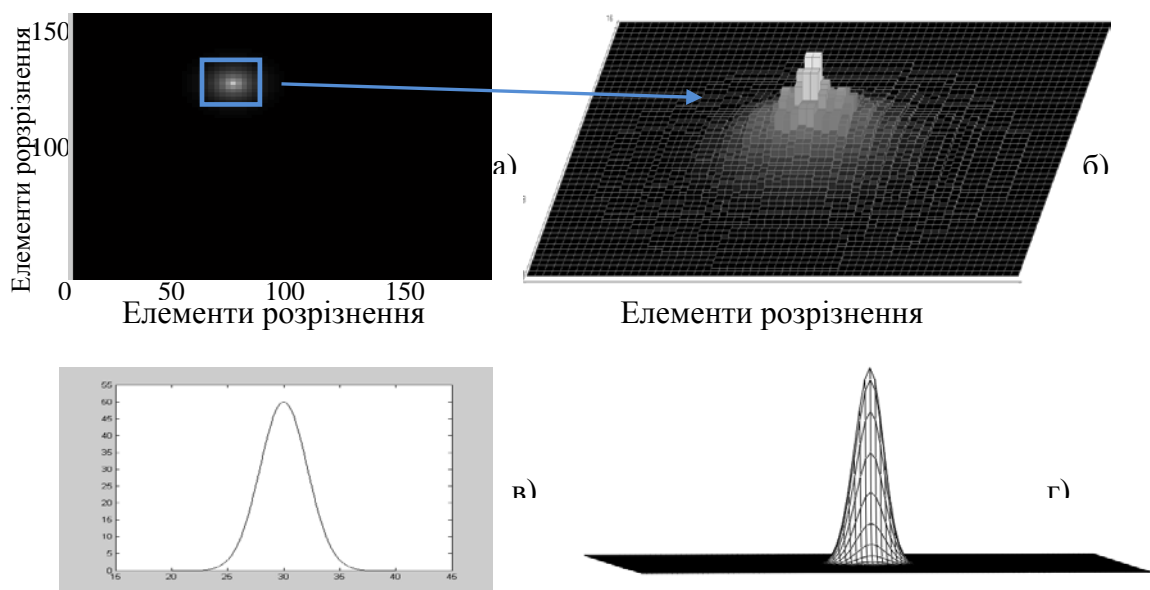
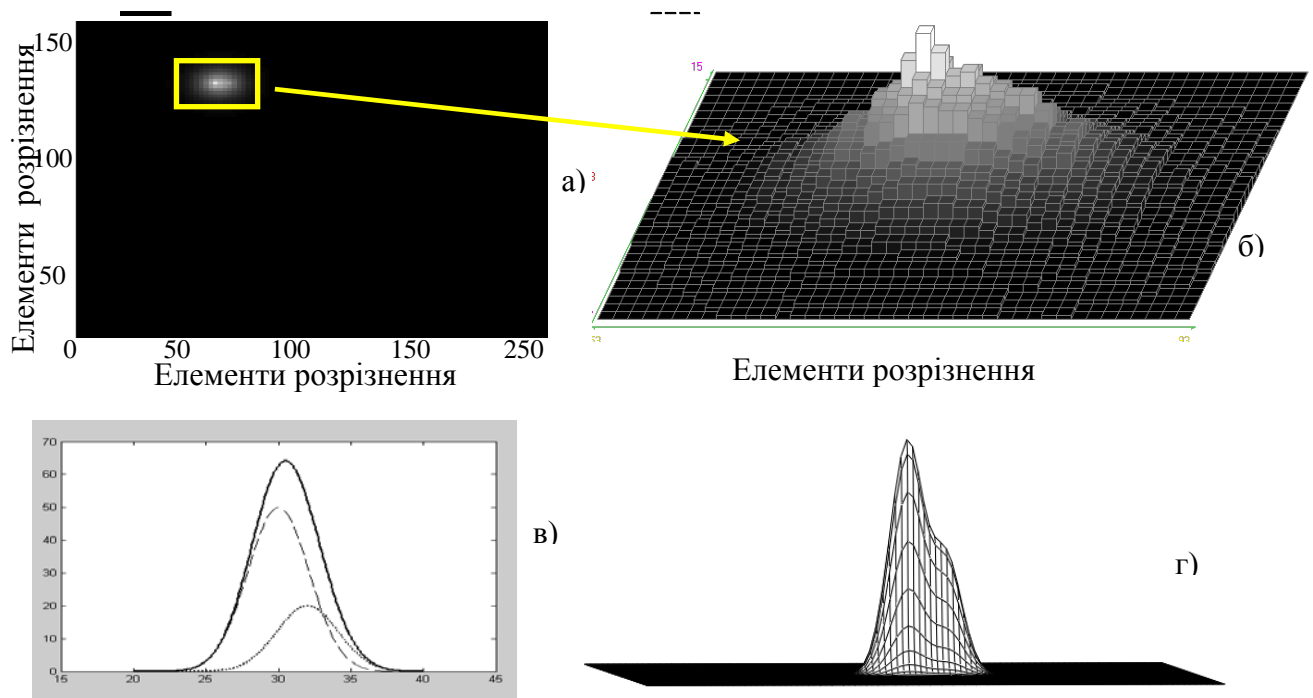


Рисунок 6.11 – Зображення точкового об'єкта з амплітудою меншої інтенсивності: а) зображення об'єкта, б) просторовий розподіл освітленості від точ-

кового об'єкта (комплексний корпускулярний і хвильовий опис); в) г) просторовий розподіл освітленості від точкового об'єкта (хвильовий опис)



сума сигналів  $J_3 = J_1 + J_2$ ; сигнал з інтенсивністю  $J_1 = 50$ ;  
сигнал з інтенсивністю  $J_2 = 20$ .

Рисунок 6.12 – Зображення сигналу суми двох сигналів  $J_1 = 50$  і  $J_2 = 20$ :

а) зображення отриманого об'єкта, б) просторовий розподіл освітленості отриманого об'єкта (комплексний корпускулярний і хвильовий опис); в) г) просторовий розподіл освітленості від точкового об'єкта (хвильовий опис)

Для обчислення різницевої матриці необхідно визначити параметри функції, яка описує зображення більш інтенсивного об'єкта, тобто максимальне значення і координати даного максимуму. Для цього визначимо координати максимуму на рис. 6.11, після чого візьмемо три найближчі точки відносно центра, по осі  $X$ , лівіше від центра. Використовуючи отримані точки і застосовуючи відому умову найкращого середньоквадратичного наближення

– мінімум суми квадратичних відхилень:

$$S = \sum_{i=1}^N [y_i - \varphi(x_i)]^2 \Rightarrow \min \quad (6.38)$$

де  $S$  – сума квадратичних відхилень;

$N$  – кількість точок функції;

$y_i$  – значення функції в заданих точках;

$x_i$  – задані точки, отримані в результаті дослідження;

$\varphi(x_i)$  – аналітична функція:

$$\varphi(x) = \sum_{k=1}^K a_k \varphi_k(x) \quad (6.39)$$

де  $K$  – число констант;

$a_k$  – константи.

Формування просторового розподілу сигналу в фокальній площині фотоприймача описуємо як дифракційну картину Фраунгофера при дифракції на вхідному отворі (п. 2.8 с. 71). Вид функцій  $\varphi_k(x)$  залежить від енергетичних характеристик сигналу і роздільної здатності оптико-електронної системи і визначається виразом (2.30). Кількість  $k$  визначається необхідною точністю розрізнення близько розташованих об'єктів.

Одержимо функцію, близьку до шуканої (рис. 6.13). Отримана функція має такі параметри:  $J_3 = 51,329$ ,  $x_3 = 30$ , а параметри шуканої функції мають такі значення:  $J_1 = 50$ ,  $x_1 = 30$ .

Після побудови різницевої матриці і віднімання від суми зображень отримаємо результат, показаний на рис. 6.14, на якому чітко видно зображення менш інтенсивного точкового об'єкта.

Отримане зображення дуже подібне до зображення об'єкта з меншою яскравістю. Як видно на рис. 6.14 (б), одержане зображення має меншу інтенсивність випромінювання, і координати максимуму функції зміщені

вправо, що вказує на похибки вимірювань і відновлення функції за допомогою інтерполяції.

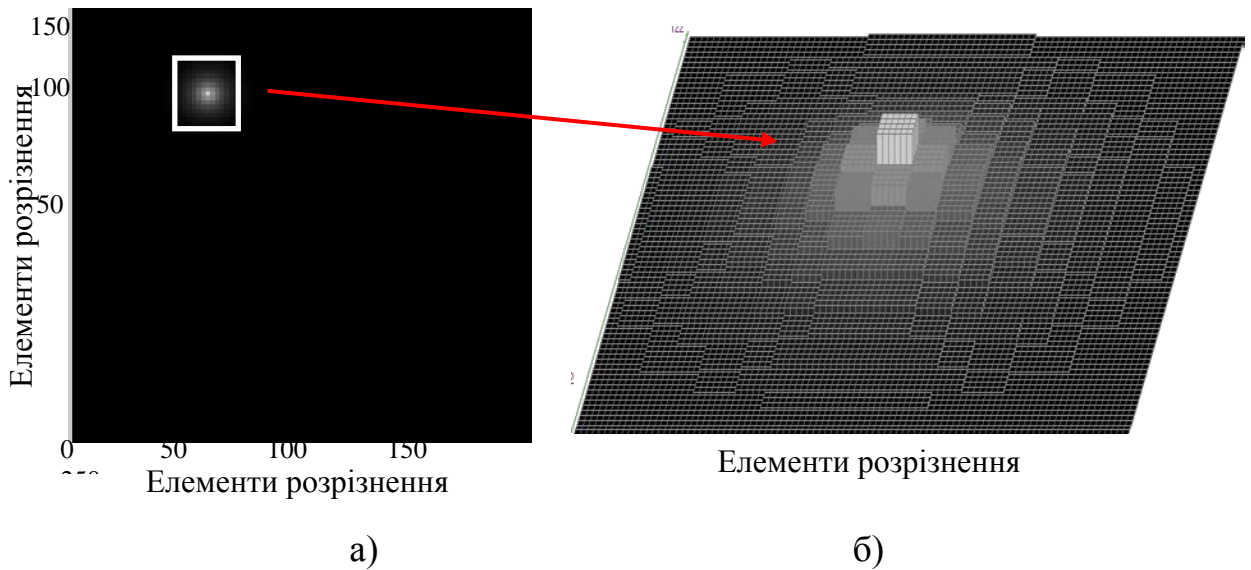


Рисунок 6.13 – Зображення шуканого сигналу, отриманого за допомогою методу найменших квадратів: а) зображення отриманого об'єкта, б) просторовий розподіл освітленості отриманого об'єкта.

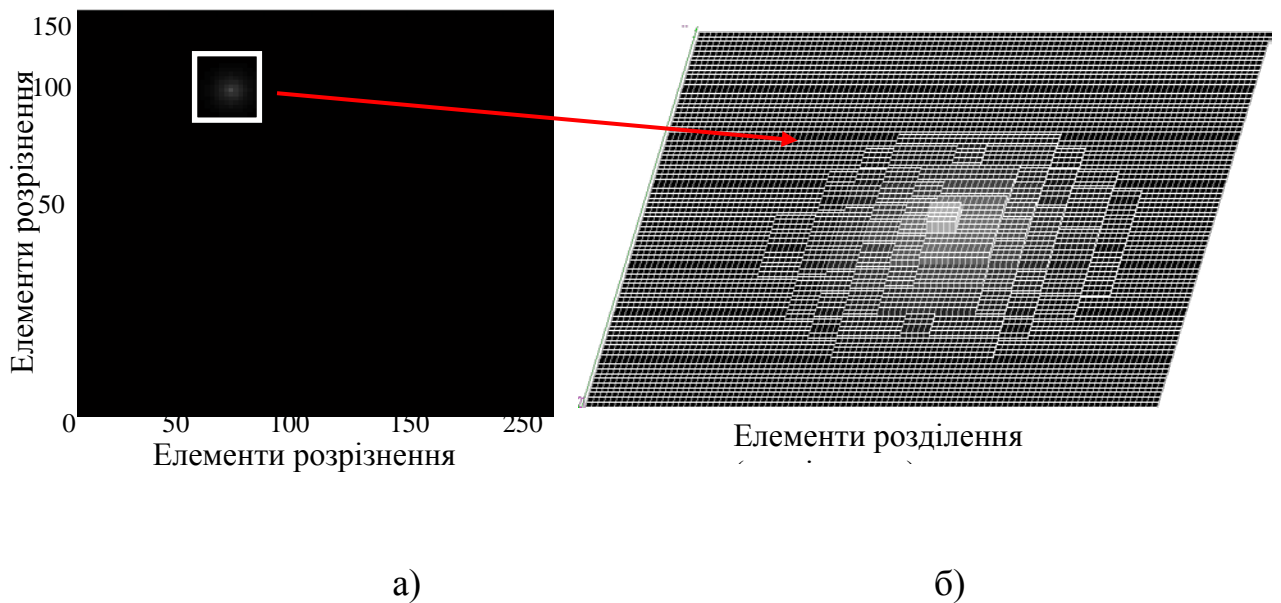
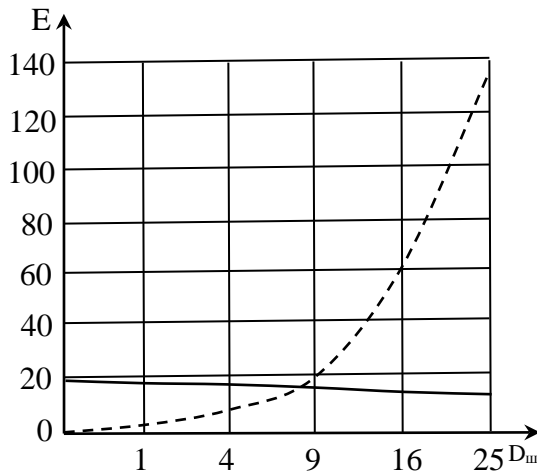
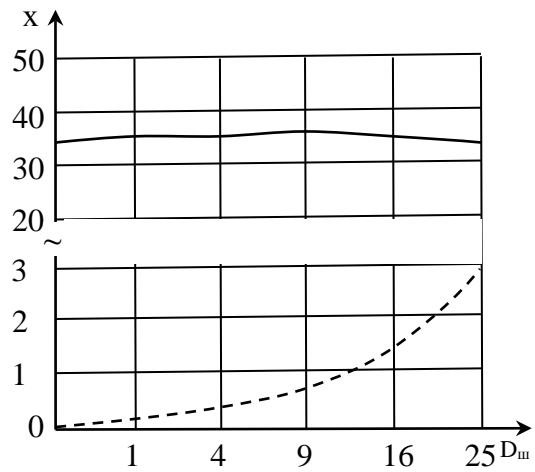


Рисунок 6.14 – Результат обчислення різницевої матриці: а) зображення отриманого об'єкта; б) просторовий розподіл освітленості отриманого об'єкта

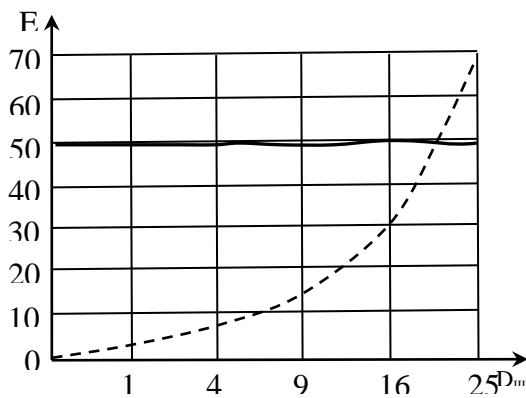
Залежність, що характеризує точність визначення параметрів об'єктів від дисперсії шуму, наведена на рис. 6.15.



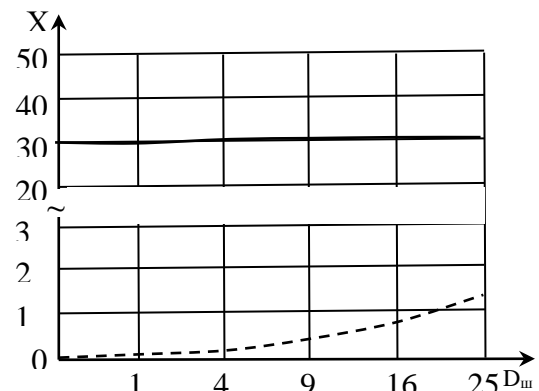
а)



б)



в)



г)

Рисунок 6.15 – Результати визначення статистичних параметрів близько розташованих сигналів нерівноцінних за яскравістю а) математичне сподівання яскравості; дисперсії яскравості сигналу з більшою інтенсивністю; б) математичне сподівання координати центра; дисперсії координати центра сигналу з більшою інтенсивністю; в) математичне сподівання яскравості; дисперсії яскравості сигналу з меншою інтенсивністю; г) математичне сподівання координати центра; дисперсії координати центра сигналу з меншою інтенсивністю

Застосування цього методу для оброблення зображень об'єктів, близько розташованих і не рівноцінних за яскравістю, дозволяє виділити об'єкт із меншою яскравістю і покращити його візуальне розрізнення, що відіграє істотну роль у процесі спостереження і супроводу об'єктів.

Матеріали підрозділу опубліковані в роботі [213], де автор запропонував алгоритм розрізнення близько розташованих малорозмірних об'єктів, що мають різні енергетичні характеристики.

Результати досліджень, розглянутих у п. 6.3 використані при вивченні процесу розрізнення близько розташованих об'єктів в оптико-електронних системах застосовуваних для астрономічних спостережень і оптико-електронних систем у складі акустооптичних аналізаторів спектра.

У роботі [142], [147] здобувач запропонував використовувати стохастико-детерміновані методи оброблення сигналів в оптико-електронних системах, що входять до складу акустооптичних аналізаторів спектра, а також враховувати квантову природу взаємодії електромагнітного випромінювання з фотоприймачем. Потік носіїв зарядів описаний на основі пуассонівської статистики. Знайдена оптимальна оцінка параметрів просторового положення сигналу в площині фотоприймача.

У роботі [141] дисертантка висунула таку пропозицію: основу методу розрізнення близько розташованих космічних об'єктів в астрономічних системах повинно становити спільне використання хвильових і корпускулярних властивостей оптичного випромінювання. Модель випромінювання описує процес формування сигнальних і фонових компонент з урахуванням впливу розмірів просторового радіусу кореляції атмосферних неоднорідностей на роздільну здатність оптико-електронних систем.

Матеріали підрозділу наведені в [155] і впроваджені у вигляді: математичної моделі взаємодії оптичного випромінювання з елементами оптико-електронної системи, яка входить до складу акустооптичних аналізаторів спектра. Метод і алгоритм розрізнення близько розташованих за частотою сигналів, розроблений на основі запропонованих стохастико-детермінованих

методів оброблення сигналів, дозволив збільшити спектральний діапазон на 30% (Акт впровадження наукової роботи автора у Відкритому акціонерному суспільстві «Спеціальне конструкторське бюро радіотехнічних приладів» – дочірньому підприємстві Державної акціонерної холдингової компанії «Топаз» Міністерства промислової політики (додаток Б)).

#### 6.4. Дослідження впливу методів компресії відеопотоків на мікро-структуру зображень

Зі збільшенням доступності засобів отримання цифрових відеозображень можливості візуалізувати й документувати дані значно розширилися. Однак накопичені відеодані потребують значних ресурсів для їхнього зберігання. Крім того, багато промислових рішень мають закриту архітектуру, що означає неможливість (або недоступність без додаткових компонентів) виведення зображень у вигляді файлів на зовнішні носії.

При обміні відеопотоками в інформаційних мережах актуальність використання компресії даних зумовлена бажанням користувачів отримувати мультимедійну інформацію в реальному масштабі часу. Звичайно, застосування методів компресії погіршує якість візуалізації і використовується лише з метою зменшення обсягу інформації, що передається. При оцінюванні ефективності методів стиснення відеоданих необхідно мати достовірну кількісну міру якості зображень. На жаль, не існує аналітичної об'єктивно адекватної міри якості зображення для різних систем стиснення. Велика кількість робіт присвячена аналізу впливу алгоритмів стиснення на якість відеоданих за різними критеріями, такими, як величина відношення сигнал/шум, PSNR (пікове відношення сигнал/шум), коефіцієнт контрастності, порівняння статистичних характеристик вихідного і компресованого потоку, час кодування, обсяг компресованого відеопотоку тощо. Ці методи досить ефективні при аналізі відеопотоків із PSNR, що перебуває в межах від 20 до 40 Дб [169], [173].

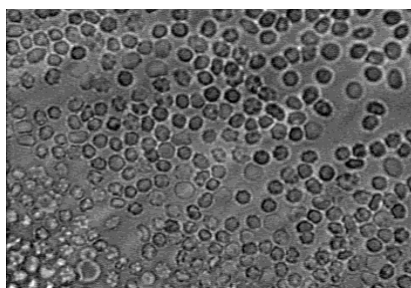
Одним із напрямів стохастико-детермінованих методів оброблення ін-

формації в оптико-електронних системах є розроблення і застосування методів компресії отриманих даних. Проте як зображення, так і відеопотоки можуть містити малорозмірні об'єкти з низькими коефіцієнтами контрастності і величиною відношення сигнал/шум, назвемо їх мікроструктурою зображень. Мікроструктура зображень має велике значення для детального аналізу інформації про досліджувані об'єкти [175] – [178].

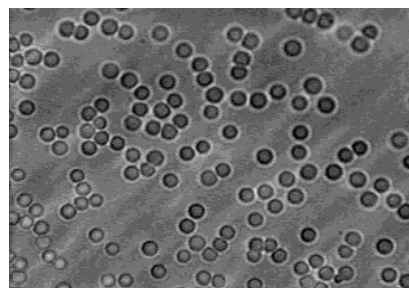
Розглянемо вплив форматів стиснення відеопотоків на мікроструктуру зображень на прикладі використання цифрового комплексу мікроскопії для дослідження динаміки гемолізу еритроцитів (п. 5.2).

На рис. 6.15 наведені зображення некомпресованого відеопотоку у форматі Avi uncompressed різних стадій гемолізу еритроцитів.

Для дослідження впливу різних форматів стиснення відеоданих був обраний фрагмент відеопотоку обсягом 53,7 МБ. Вивчення змін мікроструктури зображень у процесі компресії відеоданих і визначення статистичних характеристик сигнальної і фонових складових здійснювалося за виділеними фрагментами кадрів у вигляді просторового розподілу освітленості, що характеризує мікроструктуру зображень. Під час аналізу складної морфології еритроцитів у процесі гемолізу застосовуються методи виявлення корисного сигналу на тлі шуму, що ґрунтуються на пороговому виявленні, наприклад, за критерієм максимуму умовної ймовірності правильного виявлення при фіксованому рівні ймовірності помилкового рішення.



перший телевізійний кадр,  
еритроцити до початку гемолізу



останній телевізійний кадр,  
кінцева стадія гемолізу

Рисунок 6.16 – Зображення еритроцитів Avi uncompressed

Зміна мікроструктури зображень у процесі компресії відеоданих сигна-

льної і фонової складових вивчалася для фрагментів, наведених на рис. 6.16 із використанням форматів стиснення: MPEG, MPEG-2, MPEG-4, H.264, DivX, XviD (рис 6.17 і рис. 6.18.). Результати статистичного аналізу відеопотоків подані в табл. 6.2.

Таблиця 6.2

Зміни характеристик досліджуваних відеопотоків від форматів стиснення

	Avi	XviD	DivX	H.264	MPEG1	MPEG2	MPEG4
Дослідження просторового розподілу освітленості сигнальної складової							
Середнє значення	242,94	244,29	241,32	243,59	242,80	243,73	242,74
Дисперсія	14,25	13,18	19,15	18,35	15,84	20,81	20,70
Дослідження просторового розподілу освітленості фонової складової							
Середнє значення	247,84	244,10	244,10	247,62	246,87	247,57	247,34
Дисперсія	14,05	10,95	10,95	11,65	11,65	14,77	15,94
Розмір відеофрагмента (МБ)							
Highest quality	53,70	5,90	5,25	8,71	6,78	7,36	3,97
Normal quality	53,70	5,89	4,40	4,43	6,78	7,36	3,16
Lowest quality	53,70	1,56	3,09	1,51	5,53	6,55	2,79

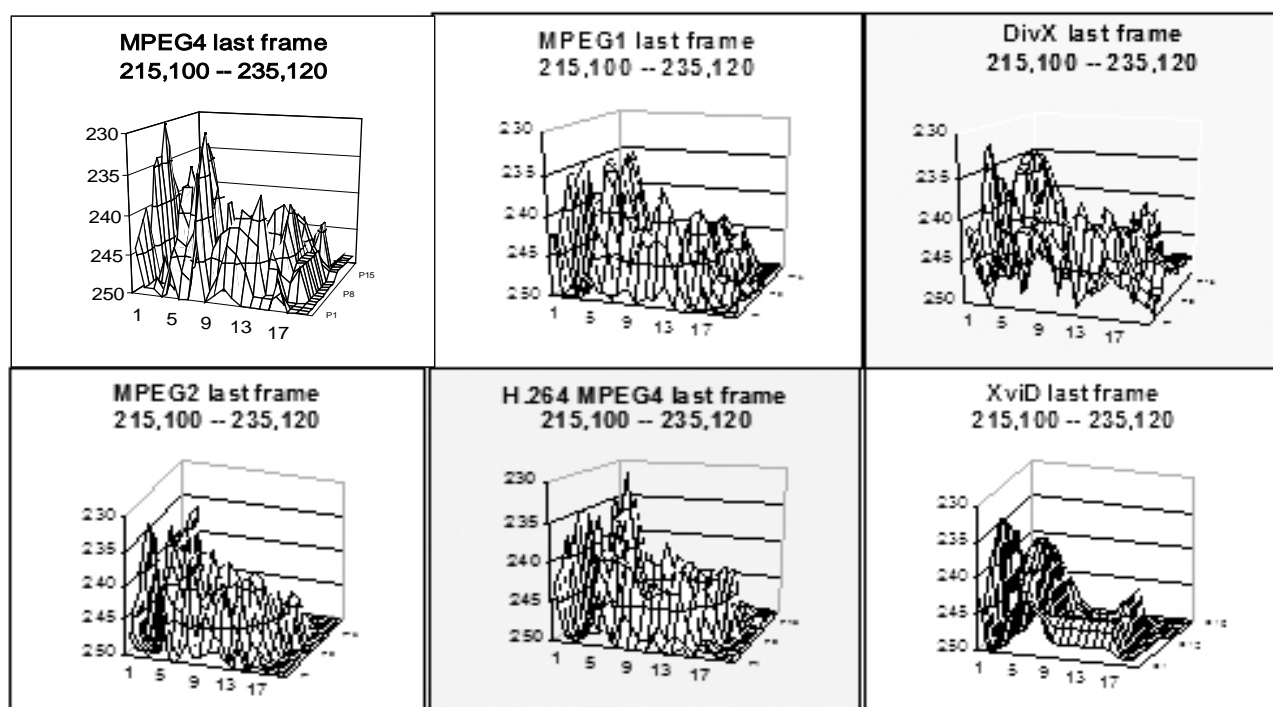


Рисунок 6.17 – Зміна мікроструктури досліджуваного об'єкта (еритроцита) в процесі компресії відеопотоку

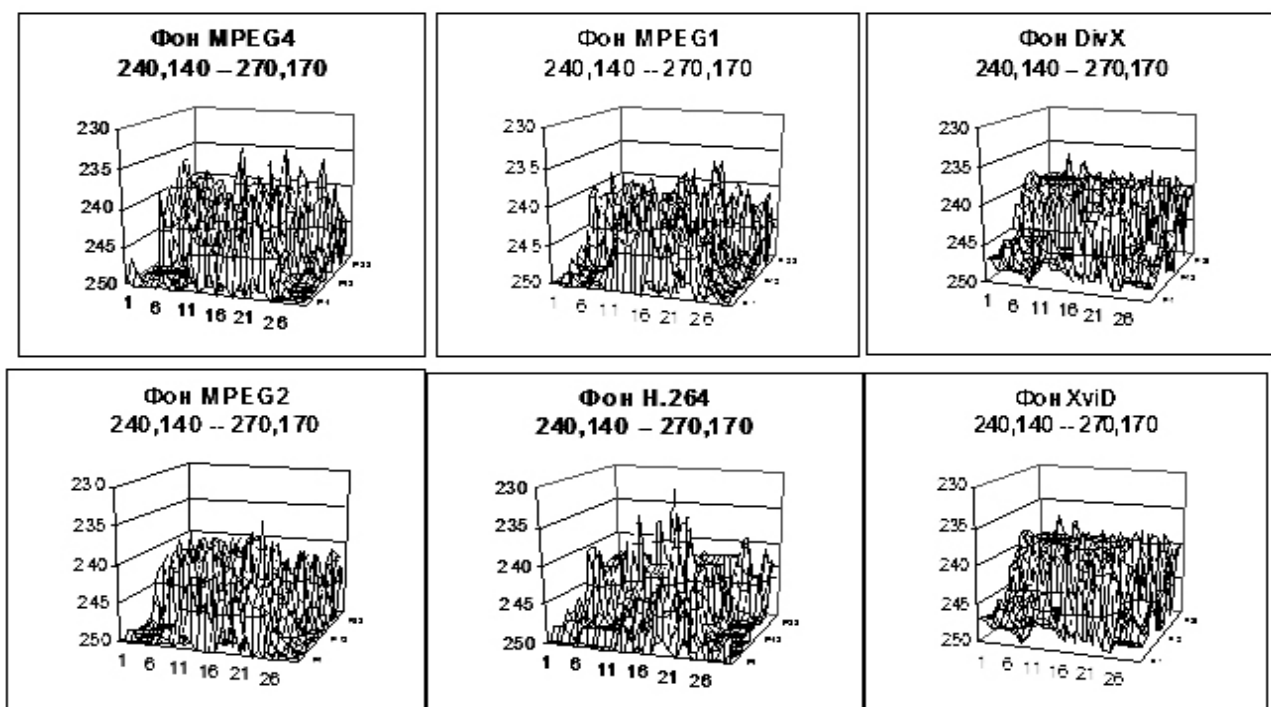


Рисунок 6.18 – Зміна мікроструктури фонового випромінювання в процесі компресії відеопотоку

Як показали проведені дослідження, використання форматів стиснення для компресії відеопотоків дозволяє в десятки разів зменшити їхній обсяг. Порівняльний аналіз зміни сигнальної і фонової складових у процесі компресії проводився за фрагментами кадрів з однаковими просторовими координатами (215,100) – (235,120) і (240,140) – (270,170) відповідно, що дає можливість здійснити статистичний аналіз зміни мікроструктури в кожному кадрі в однакових елементах розділення (розрізнення).

Аналіз рисунків 6.17 і 6.18 показує, що в процесі компресії істотно змінюються високочастотні складові, як сигнальна, так і фонова, залежно від вибору формату компресії. Статистичні характеристики (дисперсія і середнє значення освітленості), згідно з розрахунками (табл. 6.2), істотно не змінюються. Обчислені загальноприйняті параметри, такі, як пікове відношення сигнал/шум, контрастність зображень за фрагментом, так само не будуть значно змінюватися в компресованих і некомпресованих відеофрагментах. Однак спостерігаються досить істотні зміни зображень, викликані просторовим

перерозподілом високочастотної складової складних сигналів, що виявляються втратою мікроструктури зображень, і, як наслідок, аналіз морфології клітин на різних стадіях гемолізу ускладнюється. Використані алгоритми стиснення відеоданих кодують різну інформацію і скорочують просторово-часову надмірність відеопотоку шляхом усунення дрібних деталей там, де при перегляді сюжету це візуально не помітно. Наведені в таблиці 6.2 середні значення просторового розподілу освітленості для еритроцитів у процесі гемолізу характеризують низький рівень контрастності об'єктів. При спостереженні динаміки морфологічних змін нативних клітин, де немає можливості застосувати процес забарвлення клітин для підвищення контрасту зображення і величини сигнал/шум, рівень сигнальної складової може бути порівняним з амплітудою флуктуаційної (високочастотної) складової (у досліджуваному фрагменті сигнальна складова 4 градації сірого і рівень СКВ флуктуацій 4). За таких умов при використанні алгоритмів стиснення відеоданих випадкові флуктуації в кожному кадрі будуть зберігатися як різницева інформація.

Використання різних методів компресії при дослідженні малоконтрастних об'єктів спричиняє певні труднощі, пов'язані з нелінійністю алгоритмів стиснення і просторовим перерозподілом високочастотної складової сигналу, тому доцільно розглянути можливість застосування попереднього оброблення відеопотоків.

Як зауважувалося в п. 5.4, застосування процедур міжкадрового накопичення уможливорює компенсацію некорельованих змін високочастотної складової, як сигнальної, так і фонові.

Перед застосуванням компресії відеофрагмент розбивають на кадри і застосовують процедуру попиксельного накопичення з подальшим нормуванням, що дозволяє компенсувати слабкокорельовану високочастотну складову, зумовлену стохастичною природою оптичного випромінювання, і, як наслідок, скоротити надмірність інформації у відеофрагменті. Особливості мікроструктури еритроцитів, які можна вважати малорозмірними (3–5 елементів розрізнення фоточутливого приймача), будуть збережені шляхом накопичен-

ня сигнальної складової, яка має високий рівень міжкадрової кореляції у відеопотоці. Це істотно покращуватиме величину сигнал/шум у  $\sqrt{M}$  разів, де  $M$  – кількість кадрів.

При виборі параметрів процесу накопичення для відеопотоків необхідно враховувати задані імовірнісні характеристики виявлення складних сигналів для запобігання втраті інформації про мікроструктуру спостережуваних об'єктів.

Для збереження якості відеопотоків необхідно забезпечити високий рівень кореляції між вихідним і компресованим потоками, тобто досягти мінімальних змін статистичних параметрів, як фонових, так і сигнальних компонент. Для ефективного використання алгоритмів стиснення відеоданих, що характеризуються малою величиною відношення сигнал/шум (у досліджуваному фрагменті  $\phi = 2$ ) перед процедурою стиснення необхідно прийняти ймовірність появи помилки, наприклад  $f = 10^{-3}$  (проте для різних систем ця величина визначається складністю виконуваних завдань), обрати поріг виявлення  $U_{\text{пор}}$  (що дозволяє забезпечити такий рівень помилки) й обчислити ймовірність правильного виявлення сигналу. Якщо при таких параметрах ймовірність правильного виявлення сигналу  $d \geq 0,7$ , то можна проводити процедуру компресії. Якщо ця величина  $d \leq 0,7$ , необхідно провести процедуру міжкадрового накопичення відеопотоку.

Розглянемо вплив алгоритмів стиснення на ефективність застосування методу міжкадрового накопичення на прикладі імітаційного моделювання. Імітаційне моделювання зображень відбувалося при таких вихідних даних:

1. Досліджуваний кадр являв собою матрицю, розміром 1000x1000 елементів розрізнення.

2. Динамічний діапазон розрізнення монітора становив 256 градацій сірого (0 – рівень чорного, 255 – рівень білого).

3. Матриця вихідного зображення формувалася як адитивна суміш детермінованого корисного сигналу і випадкової перешкоди високої інтенсивності  $U_{ij}^0 = U_{ij}^c + U_{ij}^n$ .

4. Корисний сигнал  $U_{ij}^c$  моделювався як область у вигляді об'єкта розміром  $100 \times 100$  елементів розрізнення з детермінованою амплітудою  $U_{ij}^c = 25$ .

5. Випадкова перешкода  $U_{ij}^n$  являла собою шум, який підпорядковується розподілу Пуассона по полю кадру із середнім значенням  $U_{ij}^n = 75$ .

6. Обробленню піддавалася серія зі 100 кадрів. При цьому процедура накопичення проводилася шляхом підсумовування  $M = 5; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60; 65; 70; 75; 80; 85; 90; 95; 100$  кадрів серії і подальшого нормування матриці зображень на кількість кадрів.

7. Використовувалися різні коефіцієнти стиснення  $\chi = 25$  50 і 75.

8. Процедура накопичення проводилася як для вихідних нестиснених кадрів (що формально відповідає параметру стиснення  $\chi = 0$ ), так і для кадрів, які пройшли через алгоритм стиснення і відновлення зображення.

Для оцінювання сигнальної компоненти, як в окремому кадрі, так і при накопиченні, у нашій роботі використовується відношення сигнал/шум. Результати наведені на рис. 6.19.

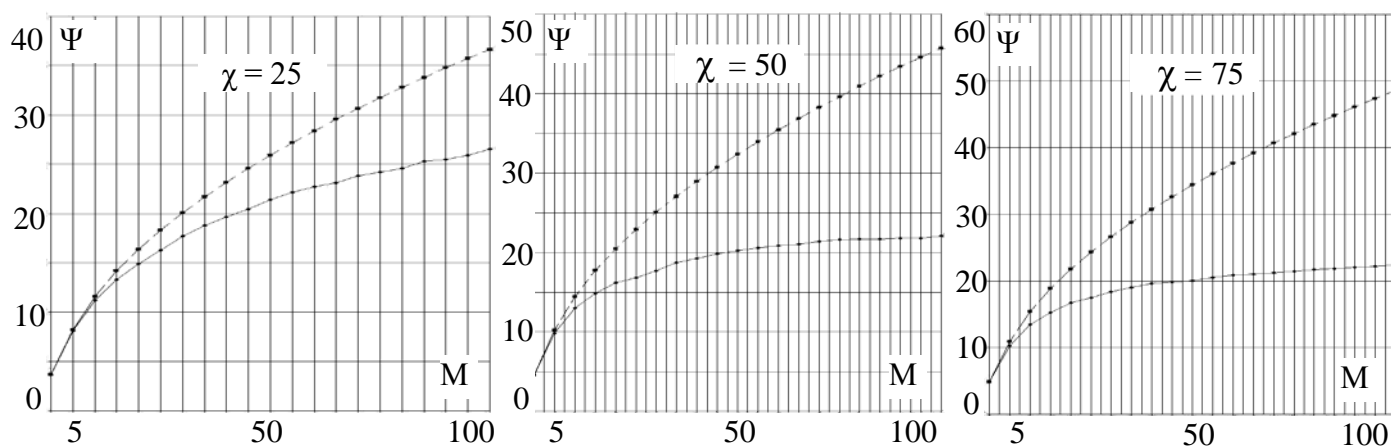


Рисунок 6.19 – Залежність величини відношення сигнал/шум від кількості накопичених кадрів для різних параметрів стиснення (суцільні лінії) порівняно з безкореляційною залежністю (пунктирні лінії)

Результати проведених модельних експериментів показали.

1. При накопиченні вихідних (нестиснених) кадрів спостерігається збі-

льшення відношення сигнал/шум, що добре узгоджується з теоретичною безкореляційною залежністю від  $M$ .

2. При накопиченні серії кадрів, що пройшли процедуру стиснення-відновлення, збільшення відношення сигнал/шум відбувається повільніше порівняно з безкореляційною залежністю з  $M$ . Це може пояснюватися появою кореляції між кадрами при проходженні через алгоритм стиснення.

3. Уповільнення збільшення відношення сигнал/шум при накопиченні кадрів стає більш істотним зі збільшення параметра стиснення, що, імовірно, вказує на збільшення ступеня кореляції між кадрами.

4. У цілому ефективність методу накопичення при застосуванні алгоритму стиснення залежить від кількості кадрів у серії, параметра стиснення  $i$ , як наслідок, середнього відношення сигнал/шум в одному кадрі. При накопиченні серії, що складається з великої кількості кадрів, ефективніше використовувати менші значення параметра стиснення. При необхідності використовувати великі параметри стиснення виникає обмеження на кількість кадрів у серії, оскільки подальше збільшення кількості кадрів дає незначний вигравш відношення сигнал/шум. Отримані дані засвідчують суттєвий вплив кореляційних ефектів на метод накопичення кадрів при використанні процедури стиснення-відновлення.

Матеріали підрозділу 6.4 опубліковані в [206], [207], [214], [222], [223], в яких автор запропонував методику вивчення стохастичної поведінки сигналів в оптико-електронних системах із метою визначення статистичних характеристик сигналів і перешкод. Матеріали підрозділу повністю висвітлюються в роботі [199].

Матеріали підрозділу впроваджені у вигляді методики визначення характеристик випадкових сигналів у телекомунікаційних системах передавання відеоданих при використанні методів компресії за допомогою методів математичної статистики і лабораторних досліджень (Акт впровадження наукової роботи автора в навчальний процес Української інженерно-педагогічної академії Міністерства освіти і науки України (додаток А)).

## 6.5. Висновки

У розділі в межах визначеної науково-технічної проблеми підвищення ефективності оптико-електронних систем за рахунок розвитку математичних моделей і стохастико-детермінованих методів приймання й оброблення сигналів виконане поставлене в роботі завдання – розроблені методи й алгоритми фільтрації шумових складових корисного сигналу на основі стохастико-детермінованого оброблення сигналів; вивчені можливості створених (оптимізованих) алгоритмів у практичному використанні.

Результати врахування ефектів взаємодії оптичного випромінювання з елементами системи і спільного використання хвильового й корпускулярного опису сигналів уможливають формулювання таких висновків:

1. Ефективність оптико-електронних систем під час виявлення, розрізнення й визначення характеристик малорозмірних, малоконтрасних об'єктів може бути збільшена в десятки разів завдяки використанню комплексного підходу, який включає елементи корпускулярної і хвильової теорії при описі процесу взаємодії випромінювання з елементами системи при формуванні вихідних сигналів, а також урахуванню статистичних характеристик приймальних сигналів [150], [197], [208], [209], [212], [217], [218], [221].

2. Розроблено метод виявлення рухомих об'єктів, що поєднує кореляційний, різницевий, пороговий методи, а також оптимізацію міжкадрового оброблення послідовності аналізованих кадрів. За допомогою цього методу можна оцінити статистичні характеристики фонові компоненти, обчислити ймовірності виявлення і кореляційний інтеграл, а також оцінити динамічні зміни, викликані рухом малоконтрасних об'єктів.

Розроблений метод дозволяє знизити вплив шумової компоненти при використанні міжкадрового і внутрішньокадрового оброблення сигналів і збільшити енергетичні характеристики сигнальної компоненти пропорційно кількості аналізованих елементів (розрізнення).

Експериментальні дослідження методу виявлення рухомих об'єктів, що

ґрунтуються на аналізі енергетичних і просторово-часових характеристик модельних і натурних об'єктів із використанням оптико-електронної системи виявлення «Карат», засвідчили, що оптимальне використання енергії просторового розподілу сигнальної складової і часу реєстрації дозволяє збільшити ефективність оптико-електронної системи за критерієм величини відношення сигнал/шум у 5–10 разів залежно від умов спостереження.

3. Розроблений метод розрізнення близько розташованих об'єктів, центри дифракційних зображень яких розміщені на відстані меншій, ніж релеєвська межа, і мають різні інтенсивності. Основу методу становить аналіз просторово-часового та просторово-амплітудного розподілу сигналів із використанням різницевих методів.

Експериментальні дослідження методу розрізнення близько розташованих об'єктів, створеного на основі запропонованих стохастико-детермінованих методів оброблення сигналів, здійснені на модельних і натурних об'єктах із використанням оптико-електронної системи, що входить до складу акустооптичних аналізаторів спектра, показали збільшення спектрального (розрізнення систем на 30%). [141], [147], [152], [213], [217].

4. Експериментальні дослідження впливу методів компресії даних на мікроструктуру зображень засвідчили, що в процесі застосування розглянутих алгоритмів стиснення спостерігається просторовий перерозподіл високочастотної складової. При виборі алгоритму кодування необхідно враховувати основні характеристики вихідного некомпресованого потоку. При кодуванні потоків зі складною мікроструктурою, що характеризуються величиною відношення сигнал/шум менше за 5, необхідно попередньо застосовувати метод попіксельного міжкадрового накопичення. Компенсація некорельованої високочастотної складової у вихідному потоці дозволить підвищити ефективність використання форматів стиснення за рахунок скорочення надлишкової інформації без зміни мікроструктури вихідних зображень [199], [206], [207], [222], [223].

У результаті виконаних теоретичних і експериментальних досліджень вихідних сигналів оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діа-

пазоном сформульовано *нове наукове положення*:

Удосконалено метод збільшення ефективності оптико-електронних систем, який відрізняється від відомих тим, що вибір параметрів внутрішньокадрового і міжкадрового накопичення враховує ефекти взаємодії оптичного випромінювання з елементами системи.

*Практичне значення* отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Запропоновані методи збільшення ефективності оптико-електронних систем різного призначення, засновані на поєднанні хвильового і корпускулярного опису сигналів, можуть бути використані при аналізі малоконтрастних, малорозмірних об'єктів.

2. Використання методу виявлення мало контрастних рухомих об'єктів дозволить:

- виявляти і супроводжувати малоконтрастні об'єкти при здійсненні контролю космічного простору з використанням астрономічних систем спостереження в оптичному діапазоні, наприклад, вивчати метеорні потоки; астероїди, які зближуються із Землею;

- визначати зображення рухомих об'єктів у відеосюжетах, отриманих системами відеоспостереження.

3. Використання методу розрізнення близько розташованих об'єктів уможливить:

- отримання інформації про віддалені об'єкти з використанням астрономічних систем, наприклад, зображення супутників поблизу зірок; взаємодіючих галактик;

- удосконалення акустооптичних аналізаторів спектра при реєстрації сигналів із близькими частотними характеристиками;

- одержання додаткової інформації при діагностиці різних захворювань із використанням медико-біологічних систем візуалізації і цифрових рентгєнівських систем.

4. Використання методу оцінювання мікроструктури об'єктів в оптико-електронних системах дозволить зберігати достовірну інформацію про малоконтрастні, малорозмірні об'єкти при застосуванні алгоритмів стиснення відеоінформації для передавання зображень у телекомунікаційних мережах.

## ВИСНОВКИ

Головним результатом дисертаційної роботи є розв'язання науково-технічної проблеми, яке полягає в підвищенні ефективності оптико-електронних систем під час реєстрації сигналів різних енергетичних і просторово-часових властивостей завдяки розвиткові математичних моделей й стохастико-детермінованих методів приймання й оброблення сигналів, що ґрунтуються на сумісному використанні корпускулярного, хвильового і статистичного опису сигналів в оптико-електронних системах. Ефект від використання запропонованих нових моделей і теоретичних підходів до опису вхідних й оброблення вихідних сигналів полягає у посиленні проникної здатності систем в десятки разів, забезпеченні розширення динамічного діапазону систем, а також можливості забезпечення збільшення ефективності оптико-електронних систем за критеріями: роздільна здатність, імовірнісні характеристики виявлення, величина відношення сигнал/шум.

Результати експериментальних і теоретичних досліджень дозволили сформулювати такі наукові і практичні висновки:

1. Необхідність розвитку стохастико-детермінованої теорії оброблення сигналів в оптико-електронних системах зумовлена наявним неоднозначним описом як вхідних, так і вихідних сигналів. Проблемні питання пов'язані зі спостереженням, реєстрацією й обчисленням параметрів малорозмірних і малоконтрастних об'єктів, сигнали від яких характеризуються значеннями енергії нижчими за поріг чутливості і реєструються на межі динамічного діапазону систем. Урахування різних фізико-математичних і статистичних особливостей сигналів при їхній взаємодії з елементами системи дозволить удосконалити оптико-електронні системи телевізійного типу, а також виявити тенденції розвитку й окреслити можливі шляхи підвищення ефективності та проникної здатності цих систем.

2. Удосконалені математичні моделі взаємодії оптичного випроміню-

вання з основними елементами оптико-електронної системи: оптичною ланкою і фотоприймачем, а також із середовищем поширення. Особливістю моделей є подання оптичного випромінювання як потоку фотонів, який характеризується умовно пуассонівською статистикою зі зміненою дисперсією. Застосування розроблених моделей дозволяє підвищити імовірнісні показники якості оптико-електронних систем за рахунок повного використання інформації про зміни стохастичних характеристик сигналів при проходженні оптико-електронного тракту й усунути існування суперечностей між теоретично передбаченим статистичним поведінням сигнальної і фонові складових з експериментальними результатами під час реєстрації сигналів, що характеризуються величиною відношення сигнал/шум  $\varphi \leq 5$ .

3. Розроблений підхід до оцінювання ефективності оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном за критерієм величини відношення сигнал/шум. Підхід ураховує вплив послаблення оптичного випромінювання елементами оптичної ланки як детермінований параметр. Застосування розробленого підходу уможливило визначення залежності зміни величини відношення сигнал/шум від коефіцієнта поглинання оптичної ланки як  $1/\sqrt{k}$  ( $k$  – коефіцієнт послаблення).

4. Створена математична модель взаємодії оптичного випромінювання з оптичною ланкою оптико-електронної системи з обмеженим динамічним діапазоном при формуванні просторово-часового розподілення оптичного випромінювання в площині фотоприймача. Модель ураховує стохастичний характер основних характеристик оптичних ланок, таких, як коефіцієнти поглинання, відбиття і заломлення, і ґрунтується на корпускулярному описі вхідних потоків, а також використанні стійких законів розподілу з характеристичним показником  $0 < \alpha < 2$ . Ця модель, зокрема, пояснює ефекти появи помилкових відкликів у площині фотоприймача оптико-електронних систем.

5. Експериментально отримані розподіли вихідних сигналів оптико-

електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном при використанні різних коефіцієнтів ослаблення оптичної ланки. Вивчене асимптотичне поведіння хвостів розподілів експериментальних даних (амплітуд вихідних сигналів) і визначена їхня належність областям притягання стійких законів розподілу з характеристичним показником  $0 < \alpha < 2$ . Це дозволило встановити залежність між коефіцієнтом ослаблення оптичної ланки і граничним розподілом вихідних сигналів.

6. Уперше отримані вирази для розрахунку імовірнісних характеристик виявлення з урахуванням енергетичних характеристик сигналів і перешкод, а також коефіцієнтів ослаблення оптичної ланки для систем, які мають обмежений динамічний діапазон. Для обчислення ефективності систем за критерієм умовних імовірностей виявлення враховані узагальнені граничні теореми з характеристичним показником  $0 < \alpha < 2$  для кожної оптичної ланки й використовуюваного коефіцієнта ослаблення. Це дало змогу оптимізувати алгоритми виявлення малорозмірних, малоконтрастних об'єктів.

7. На основі результатів обчислення характеристик виявлення встановлено, що при малих коефіцієнтах ослаблення оптичної ланки значення імовірності хибної тривоги при виборі порогового значення до  $n_0 = 3\sigma$  для різних граничних законів розподілу збігаються. При виборі порога  $n_0 = 3\sigma$  умовна імовірність хибної тривоги при прийнятті гауссової моделі вихідного сигналу досягає  $F=10^{-3}$ , при прийнятті моделі вихідного сигналу на основі  $\alpha$ -стійких законів умовна імовірність хибної тривоги при  $\alpha = 2$ ;  $F=10^{-1}$  при  $\alpha = 1$ ;  $F=10^{-1}$  при  $\alpha = 0,5$ . При збільшенні коефіцієнта ослаблення асимптотичне поведіння «хвоста» щільності імовірності змінюється, що приводить до істотного збільшення значення імовірності хибної тривоги. При виборі порога  $n_0 = 5\sigma$  умовна імовірність хибної тривоги при прийнятті гауссової моделі вихідного сигналу досягає  $F=10^{-7}$ , при прийнятті моделі вихідного

сигналу на основі  $\alpha$ -стійких законів умовна імовірність хибної тривоги  $F=10^{-3}$  при  $\alpha=2$ ;  $F=10^{-2}$  при  $\alpha=1$ ;  $F=10^{-1}$  при  $\alpha=0,5$ .

8. Розроблена модель вихідного сигналу оптико-електронних систем при реєстрації надслабких сигналів, що використовує корпускулярний опис і статистичну теорію потоків й урахує природу виникнення парнокорельованих сигналів. Модель дозволила синтезувати виявник сигналів, енергетичні характеристики яких порівнянні з внутрішнім шумом приймача.

9. Удосконалений метод виявлення сигналів на основі критерію узгодження просторових та енергетичних характеристик об'єктів із властивостями виявлення оптико-електронних систем. Критерій урахує розмір і контраст об'єктів, а також визначає взаємодію цих характеристик зображень із частотно-контрастною чутливістю систем. Метод дозволив підвищити ефективність систем за критеріями величини відношення сигнал/шум та імовірнісних характеристик виявлення в десятки разів. Експериментально встановлено можливість підвищення ефективності системи за критерієм величини відношення сигнал/шум у 20 разів, за критерієм умовної імовірності хибної тривоги в  $10^2$  разів при прийнятті гауссової моделі вихідних сигналів. При прийнятті моделі вихідного сигналу на основі  $\alpha$ -стійких законів ефективність системи за критерієм умовної імовірності хибної тривоги не змінюється, при загальному покращенні якості зображення у вислідному зображенні і збільшенні амплітуди сигнальної складової в рази.

10. На основі створених статистичних моделей вихідних сигналів оптимізовані параметри внутрішньокадрового і міжкадрового просторово-часового накопичення детермінованих і стохастичних сигналів при обробленні зображень. Ураховані статистична модель вихідних сигналів, енергія вхідних сигналів, оптимальний вибір часу накопичення сигналів у поодинокому кадрі і при їхньому подальшому накопиченні. Встановлено, що при прийнятті гауссової моделі вихідних сигналів ефективність оптико-

електронних систем телевізійного типу за критерієм величини сигнал/шум збільшується в  $\sqrt{M}$  ( $M$  – кількість кадрів).

11. Розроблені алгоритми виявлення малоконтрастних об'єктів з урахуванням комбінованого використання корпускулярного, хвильового і статистичного описів сигналів в оптико-електронних системах. Алгоритми синтезовані на основі поетапного міжкадрового і внутрішньокадрового оброблення й урахування енергетичних і просторово-часових властивостей сигналів, а також методів ослаблення. Застосування алгоритмів дозволяє підвищити ефективність виявлення сигналів за критерієм величини сигнал/шум у 5–10 разів.

12. Результати експериментальних досліджень доводять, що реалізація запропонованих методів та алгоритмів оброблення сигналів в оптико-електронних системах дозволить істотно розширити діапазон значень енергій вхідних сигналів. Запровадження результатів уможливило збільшення проникної здатності системи. На прикладі оптико-електронної системи, яка входить до складу радіотехнічної системи моніторингу радіопростору показано, що спектральний діапазон систем збільшився на 30 %; динамічний діапазон систем – на 40 %.

Таким чином, у дисертаційній роботі набула розвитку стохастико-детермінована теорія прийому та обробки сигналів в оптико-електронних системах, яка полягає в урахуванні додаткових статистичних властивостей сигналів при взаємодії оптичного випромінювання з оптичною ланкою, фотоприймачем і середовищем поширення. Стохастико-детерміновані властивості сигналів, такі, як енергетичні, просторово-часові, стохастичні, парнокорельовані, детерміновані, груповані, що підпорядковуються узагальненим граничним теоремам, істотно впливають на виявні властивості й ефективність оптико-електронних систем у цілому.

*Перспективні напрямки подальших досліджень:* теоретичні і практичні результати роботи можуть бути рекомендовані для використання на підпри-

емствах, які розробляють і використовують оптичну й оптико-електронну. Перспективними для подальших досліджень є напрями, пов'язані із розробленням алгоритмів виявлення сигналів у широкому діапазоні енергій з урахуванням статистичних особливостей вихідних сигналів. Це дозволить комплексно і системно розв'язати проблему підвищення ефективності оптико-електронних систем і збільшення їхнього динамічного діапазону.

Докторант висловлює щире подяку науковим консультантам – докторові технічних наук, професорові Шокалу Володимирові Михайловичу, докторові фізико-математичних наук *Должикову Володимирові Васильовичу* за допомогу в плануванні теоретичних та експериментальних досліджень, а також рекомендації щодо узагальнення й оформлення дисертаційної роботи.

Здобувач глибоко вдячний кандидатові технічних наук *Жиліну Євгенію Ігоровичу*, *Кацу Євгенію Миколайовичу*, *Лисовенку Сергієві Олександровичу*, *Панасенку Дмитрові Павловичу* за участь у проведенні математичного моделювання й експериментальних досліджень.

Дисертант сповнений подяки докторові технічних наук, професору *Казакову Євгенію Леонідовичу*, докторові технічних наук, професору *Купченку Леоніду Федоровичу*, докторові технічних наук, професору *Сухаревському Олегу Іллічу* за корисні рекомендації, конструктивну критику й зауваження, висловленні під час обговорення результатів наших наукових досліджень.

Автор щиро дякує кандидату технічних наук *Карнауху Валерієві Всеволодовичу*, кандидату технічних наук *Короткову В'ячеславу Валентиновичу*, кандидату технічних наук *Марченку Василю Васильовичу* за надану можливість і допомогу в запровадженні результатів дисертаційних досліджень.

Здобувач виражає подяку кандидатові філологічних наук, доцентові *Тележкіній Олесі Олександрівні* за допомогу в редагуванні рукопису дисертаційної роботи.

Щира і безмежна вдячність Заслуженому винахідникові України, доктору технічних наук, професору *Стрелкову Олександрові Івановичу* за особливу увагу до роботи й допомогу у визначенні проблеми і здійсненні досліджень, а також кандидату технічних наук, старшому науковому співробітникові *Литюзі Олександрові Петровичу* за постійну допомогу і підтримку на всіх етапах роботи.

## ПОСИЛАННЯ

- [1] В. В. Тарасов, И. П. Торшина, и Ю. Г. Якушенков, *Современные проблемы оптоэлектроники*. Москва, Россия: МИИГАиК, 2014.
- [2] В. А. Балоев, С. С. Мишанин, В. А. Овсянников, В. Л. Филипов, С. Е. Якубсон, и В. С. Яцык «Анализ путей повышения эффективности наземных оптико-электронных комплексов наблюдения», *Оптический журнал*, т. 79, № 3, с. 22-32, 2012.
- [3] В. С. Титов, и М. И. Труфанов, «Направления развития методов, алгоритмов и аппаратных средств повышения качества изображений оптико-электронных систем», *Изв. Вузов. Приборостроение*, т. 56, № 6 (140), с. 7-1, 2013.
- [4] Є. В. Прокопенко, «Розроблення удосконалених алгоритмів оптимального виявлення в оптико-електронних системах спостереження охорони кордону», *Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України*, вип. 1 (23), с. 24-27, 2014.
- [5] И. О. Крахмальный, « Адаптивный алгоритм выделения изображений в широкоугольных оптико-электронных системах обнаружения элементов космического мусора», на *Международ. научн.-техн. конф. INTERMATIC – 2014*, Москва, 2014, с. 48-51.
- [6] Т. А. Стрелкова, О. П. Сынчикова, Н. М. Шпакова, и В. А. Бондаренко, «Динамический анализ морфологических изменений эритроцитов в процессе гипертонического гемолиза», *Проблемы криобиологии*, № 2, с. 62-65, 2002.
- [7] Т. А. Strelkova, V. A. Timanyuk, E. A. Romodanova, and A. P. Lytyuga “Effects of coherent and incoherent optical radiation on pathologically functioning spermatozoa”, in *International Congress “Photodiagnosis and Photodynamic therapy” Official Journal of the European Platform for Photodynamic Medicine*, Helsinki, Finland, 2012, № 17, pp. 6.
- [8] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Обнаружение оптиче-

- ских сигналов от низкоорбитальных космических объектов астрономическими телевизионными системами в условиях сильных аддитивных и мультипликативных помех» на *3-м Международном радиоэлектронном форуме «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2008*, Харьков, 2008, т. 2, с. 160-161.
- [9] Т. А. Стрелкова, «Потенциальные возможности наблюдения биологических объектов оптико-электронными средствами», *Всеукр. межвед. н.-т. сб. Радиотехника*, № 112, с. 87 – 90, 1999.
- [10] Ю. А. Яновский, «Статистический анализ изображений в телемедицинских информационных сетях», на *14-му Міжнародному молодіжному форумі „Радіоелектроніка і молодь в ХХІ ст.“*, Харків, ХНУРЕ, 2010, с. 132.
- [11] В. И. Колинко, Е. Г. Коломийцев, и В. А. Сауткин, «Методика обоснования требований к характеристиками приемных телевизионных каналов оптических телескопов, предназначенных для астрономических наблюдений в различных фоновых условиях», *Научно-технический журнал «Контенант»*, т. 12, № 3, с. 14-20, 2013.
- [12] Ю. Г. Веселов, А. С. Островский, Н. И. Сельвесюк, и И. В. Красавин, «Оценка предельного разрешения цифровых оптико-электронных систем зондирования Земли с использованием теории линейных систем», *Известия ЮФУ. Технические науки*, т. 56, № 3 (140), с. 84-89, 2013.
- [13] В. М. Никитин, В. Н. Фомин, А. И. Николаев, и И. Л. Борисенков, *Адаптивная помехозащита оптико-электронных информационных систем*. Белгород, Россия: Изд-во БелГУ, 2008.
- [14] А. И. Стрелков, С. В. Москвитин, А. П. Лытюга, и Т.А. Стрелкова, *Оптическая локация. Теоретические основы приема и обработки оптических сигналов*. Харьков, Украина: Апостроф, 2010.
- [15] Е. С. Вентцель, и Л. А. Овчаров, *Теория случайных процессов и ее инженерные приложения*. Москва: Наука, 1988.
- [16] Е. С. Вентцель, и Л. А. Овчаров, *Теория случайных процессов и ее*

*инженерные приложения*. Москва: Высш. Шк., 2000.

- [17] И. Ньютон, *Оптика или трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света*, изд. 1721 г. Пер. с англ. с примечаниями С. И. Вавилова. издание 2. Москва: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954.
- [18] А. П. Пришивалко. *Отражение света от поглощающих сред (Экспериментальные данные коэффициента отражения)*. Минск: Изд-во АН БССР, 1963.
- [19] Б. Кросиньяни, П. Ди Порто, и М. Бертолотти, *Статистические свойства рассеянного света*. Москва: Наука, 1980.
- [20] О. М. Дуплищева, и И. И. Шпирка, *Результаты экспериментальных исследований М.И. Дуплищева закономерностей явлений излучения и распространения света в пространстве*. Д.: АРТ-ПРЕСС, 2008.
- [21] И. П. Торшина, *Компьютерное моделирование оптико-электронных систем первичной обработки информации*. Москва, Россия: Университетская книга, Логос, 2009.
- [22] Г. М. Мосягин, В. Б. Немтинов, и Е. Н. Лебедев, *Теория оптико-электронных систем*. Москва: Машиностроение, 1990.
- [23] В. И. Тихонов, *Оптимальный прием сигналов*. Москва: «Радио и связь», 1983.
- [24] А. В. Павлов, *Оптико-электронные приборы (основы теории и расчета)*. Москва: «Энергия», 1974.
- [25] А. Г. Шереметьев, *Статистическая теория лазерной связи*. Москва: «Связь», 1971.
- [26] Б. Р. Левин. *Теоретические основы статистической радиотехники*. Москва: «Радио и связь», 1989.
- [27] Н. С. Шестов, *Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех*. Москва: «Советское радио», 1967.
- [28] В. И. Рыков, и Д. И. Четвергов, *Методы и средства измерения световых параметров источников света*. Мордовский гос. ун-т. Са-

- ранск: МГУ, 1988.
- [29] В. И. Воробьев, *Оптическая локация для радиоинженеров*. Москва: Радио и связь, 1983.
- [30] В. А. Волохатюк, В. М. Кочетов, и Р. Р. Красовский. *Вопросы оптической локации*. Москва: «Советское радио», 1971.
- [31] Р. Гальярди, и Ш. Карп, *Оптическая связь*. Москва: Связь, 1978.
- [32] В. И. Федосеев, *Прием пространственно-временных сигналов в оптико-электронных системах (пуассоновская модель)*. Москва, Россия: Университетская книга, 2011.
- [33] А. А. Курикша, *Квантовая оптика и оптическая локация (статистическая теория)*. Москва: Советское радио, 1973.
- [34] И. А. Большаков, и В. С. Ракошиц. *Прикладная теория случайных потоков*. Москва: Сов. радио, 1978, 248 с.
- [35] В. Феллер, *Введение в теорию вероятности и ее приложения*. Москва: Мир, т. 2, 1967, с 765.
- [36] Д. Кокс, и П. Льюис, *Стохастический анализ последовательностей событий*. Москва: Мир, 1969.
- [37] Н. И. Калитеевский, *Волновая оптика*. Москва: Высшая школа, 1978.
- [38] А. П. Лытюга, «Алгоритмы обнаружения оптических сигналов от низкоорбитальных космических объектов в дневное время», *Системы обработки інформації*, вип. 4(22), с. 41-46, 2010.
- [39] М. Борн, и Э. Вольф, *Основы оптики*. Москва: Наука, 1973.
- [40] В. К. Стафеев, К. К. Боярский, и Г. Л. Башнина, *Основы оптики*. СПб.: Питер, 2006.
- [41] Т. О. Стрѣлкова, О. І. Стрелков, та О. П. Литюга, «Спосіб вимірювання і контролю функціонального та фізіологічного стану людини» *Патент на корисну модель № 55351. Заявка № u201007004 від 07.06.2010. Видано 24.12.2010.*
- [42] Л. Ф. Купченко, *Акустооптические эффекты при сильном взаимодействии. Теория и эксперимент (Метод непрерывных дробей при*

- решении акустооптических задач*). Харьков, Украина: ЭДЭНА, 2009.
- [43] А. И. Стрелков, Е. И. Жилин, Т. А. Стрелкова, А. П. Лытюга, и Т. В. Бутрым, «Особенности математического описания процессов ослабления оптического излучения», *Радиотехника: Всеукр. Межвед. науч.-техн. сб.*, вып. 168, с. 97-102, 2012.
- [44] Т. Б. Борукаев, *Методы статистической обработки изображений и полей*. Новосибирск: НЭТИ, 1985.
- [45] Г. Г. Абезгауз, А. П. Тронь, Ю. Н. Копенкин, и И. А. Коровина, *Справочник по вероятностным расчётам*. Москва: Воен. издат. Мин. обороны СССР, 1966.
- [46] Б. Р. Левин, *Справочник по надёжности* в 3-х томах. Москва: Мир, т. 1, 1969, 339 с.
- [47] Т. А. Стрелкова, Ю. И. Созонов, и Ю. А. Яновский, «Исследование статистики пространственно-временных сигналов в оптико-электронных системах», *Радиотехника: Всеукр. Межвед. науч.-техн. сб.*, вып. 170, с. 185-188, 2012.
- [48] Ю. В. Аграфонов, А. Г. Балахчи, Т. В. Бирюлина и др. «Взаимодействие излучения с веществом: Фундаментальные проблемы физики и технологии», *Взаимодействие излучений и полей с веществом. Материалы II Байкальской школы по фундаментальной физике*. Иркутск: СиЛаП, т. 1, с. 17-40, 1999. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://bsfp.media-security.ru/science/1.htm>
- [49] *Исследование физико-химических, механических и оптических свойств материалов*, Ин-т прикладной физики, 1967, с. 45-49.
- [50] О. В. Копишинський, «Вплив складу лужно-боратного скла на ефективність оптичного запису», дис. канд. фіз.-мат. наук: 01.04.05 / Київський національний ун-т ім. Тараса Шевченка, Київ, 2004.
- [51] «Оптические и спектральные свойства стекол», тезисы докладов IV Всесоюзного симпозиума, Латвийский государственный университет им. П. Стучки. Рига. 1977. – 175 с.

- [52] Л. И. Демкина, *Физико-химические основы производства оптического стекла*. Л.: ЛТИ, 1976.
- [53] В. А. Шарагов, *Химическое взаимодействие поверхности стекла с газами*, Бельц. гос. пед. ин-т им. А. Руссо. Кишинев: Штиинца, 1988.
- [54] М. М. Шульц, и О. В. Мазурин, *Современные представления о строении стекол и их свойств*. Л.: Наука, Ленинградское отделение, 1988.
- [55] А. П. Казанцев, Г. И. Сурдутович, и В. П. Яковлев, *Механическое действие света на атомы*. Москва: Наука, 1991.
- [56] Б. И. Степанов, *Введение в современную оптику: Квантовая теория взаимодействия света и вещества*. Минск: Навука і тэхніка, 1990.
- [57] А. К. Пржевуский, *Оптическое материаловедение: Моделирование оптических материалов и процессов*. СПб., Россия: СПбГУ ИТМО, 2008.
- [58] Дж. М. Беннет, Л. Маттсон, *Шероховатость поверхности и рассеяние*. Вашингтон: Оптическое общество Америки, 1993.
- [59] С. В. Немиллов, *Оптическое материаловедение: Оптические стекла*. СПб. Россия: СПбГУ ИТМО, 2011.
- [60] А. П. Лытюга, «Математическая модель сигналов в телевизионных системах при наблюдении низкоорбитальных космических объектов в дневное время», *Зб. наук. праць Харківського університету Повітряних Сил*, вип. 4(22), с. 41-46, 2009.
- [61] F. Yang, Y. M. Lu, L. Sbaiz, and M. Vetterli, “Bits From Photons. Oversampled Image Acquisition Using Binary Poisson Statistics”, *IEEE Transactions on image processing*, vol. 21, no. 4, pp. 1421–1436, 2012.
- [62] Gabriel Bedard, “Analysis of light fluctuations from photon counting statistics”, *Journal of the Optical Society of America*, vol. 57, no. 10, 1967, pp. 1201-1203.  
doi: 10.1364/JOSA.57.001201.
- [63] Е. Г. Лебедько, *Теоретические основы преобразования информации в оптико-электронных системах*. СПб., Россия: СПбГУ ИТМО, 2012.
- [64] А. И. Стрелков, И. В. Сухаревский, И. С. Олейник, С. В. Москвитин, и

- В. Н. Шмаров, «Использование ортогонального базиса для построения математической схемы лазерного вертиканта», *зб. наук. праць Харківського університету*, № 6, с. 113-117, 1996.
- [65] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Перспективы развития оптико-электронных систем специального назначения с использованием методов стохастико-детерминированной обработки оптических сигналов», на *Международ. науч.-практ. конф. Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем*, Москва, 2013, с. 50–53.
- [66] Т. А. Стрелкова, и В. А. Сауткин, «Стохастический подход к оценке качества оптического стекла», на *науч.-практ. конф. Технологии обработки оптических элементов и нанесения вакуумных покрытий*, Минск, 2013, с. 85-86.
- [67] Т. А. Стрелкова, и В. А. Сауткин, «Стохастический подход к оценке качества оптического стекла. Проблемные вопросы» на *Международ. историко-научном симпозиуме «История оптики и современность»*, Санкт-Петербург, 2013, с. 58-59.
- [68] В. И. Кляцкин, *Статистическое описание динамических систем с флуктуирующими параметрами*. Москва: «Наука», 1975..
- [69] В. И. Татарский, *Распространение волн в турбулентной атмосфере*. Москва: «Наука», 1967.
- [70] М. Е. Грачева, А. С. Гурвич, и М. А. Каллистратова, «Измерение дисперсии «сильных» флуктуаций интенсивности лазерного излучения в атмосфере», *Изв. Вузов, Радиофизика*, вып. 13, с. 56, 1970.
- [71] В. И. Федосеев, и М. П. Колосов, *Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов*. Москва, Россия: Логос, 2007.
- [72] В. И. Парфенов, В. С. Кириллов, «Обнаружение оптических сигналов при приеме потока фотоэлектронов с неизвестной формой плотности», *Компьютерная оптика*, том 36, № 4, с. 618-622, 2012.

- [73] Д. Н. Клышко, «Неклассический свет», *Успехи физических наук*, т. 166, № 6, с. 613-638, 1996.
- [74] Е. Р. Милютин, и А. Ю. Гумбинас, *Статистическая теория атмосферного канала оптических информационных систем*. Москва: Радио и связь, 2002.
- [75] И. И. Гихман, и А. В. Скороход, *Введение в теорию случайных процессов*. Москва: Наука, 1977.
- [76] Ю. В. Прохоров, и Ю. А. Розанов, *Теория вероятностей*. Москва: Наука, 1973.
- [77] Г. Л. Воронков, *Ослабители оптического излучения*. Л.: «Машиностроение», 1980.
- [78] Л. Г. Бебчук, Ю. В. Богачев, Н. П. Заказнов и др. *Прикладная оптика*. М.: Машиностроение, 1988.
- [79] В. В. Бирюков, В. В. Румянцев, и Г. В. Борисов, *Оптический контроль околоземного космического пространства в Крымской обсерватории: текущее состояние и перспективы развития* [Электронный ресурс]. Доступно:  
<http://fvn.astronomer.ru/report/0000018/CrAO/index2.htm>
- [80] А. В. Прокофьев, *Метрология оптико-электронного приборостроения*. СПб: НИУ ИТМО, 2012.
- [81] Б. В. Гнеденко, «Области притяжения нормального закона», *Доклады Академии наук СССР*, том LXXI, № 3, с. 425 – 428, 1950.
- [82] Б. В. Гнеденко, и А. Н. Колмогоров *Предельные распределения для сумм независимых случайных величин*. М.: ГИТТЛ, 1949.
- [83] K. S. Pedersen , R. Duits, and M. Nielsen, “On  $\alpha$  Kernels, Levy Processes, and Natural Image Statistics”, *Scale Space and PDE Methods in Computer Vision*. SpringerVerlag, pp. 468 – 479, 2005.
- [84] D. J. Field, “Relations between the statistics of natural images and the response properties of cortical cells”, *J. Optic. Soc. of Am. A*, vol. 4, issue 12, pp. 2379-2394, 1987.

- [85] D. L. Ruderman, and W. Bialek, "Statistics of natural images: Scaling in the woods", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 73 (6), pp. 814-817, 1994.
- [86] М. Ю. Романовский, «Функциональные блуждания Леви», *Труды института общей физики им. А.М. Прохорова*, т. 65, с. 20-28, 2009.
- [87] М. Ю. Романовский, «Аналитические представления негауссовых случайных блужданий», *Актуальные проблемы статистической физики (Малаховский сборник)*, т. 63, с. 56-81, 2007.
- [88] П. В. Видов, и М. Ю. Романовский «Аналитические представления негауссовых законов случайных блужданий», *Актуальные проблемы статистической физики (Малаховский сборник)*, т. 63. – с. 3-19, 2007.
- [89] Ф. Барду, Ж.-Ф. Бушко, А. Аспе, и К. Коэн-Таннуджи, *Статистика Леви и лазерное охлаждение. Как редкие события останавливают атомы*. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006.
- [90] Ю. Г. Рудой, «Случайные блуждания и аномальная диффузия Леви-Хинчина в физической химии полимеров», *Наука – фундамент решения технологических проблем развития России*, № 2, с. 74-101. 2007.
- [91] P. Barthelemy, and J. Bertolotti, and D. S. Weirisma, "Levy flight for light", *Nature*, vol. 453, pp. 495-498, 2008.
- [92] S. Chandrasekhar, «Stochastic Problems in Physics and Astronomy», *Reviews of Modern Physics*, vol. 15, no 1, pp. 1-89, 1943.
- [93] М. М. Морозова, и В. Н. Пырлик, «Устойчивое распределение и его модификации и ценообразование производных финансовых активов», *Вестник НГУ. Серия: Социально-экономические науки. Статистические измерения и экономический анализ*, вып. 1, с. 97-112, 2009.
- [94] А. П. Никитин, О. Д. Чернавская, и Д. С. Чернавский, «Парето-распределение в системах, находящихся в гауссовом шумовом поле», *Сборник трудов ИОФАН*, т. 65 «Физические модели сложных систем с мотивацией», с.107-123, 2009.
- [95] А. М. Башаров, «О стохастическом обосновании описания кинетики наночастиц дифференциальными уравнениями с дробными произ-

- водными», *Наносистемы: физика, химия, математика*, № 3(6), с. 47-63, 2012.
- [96] И. А. Багрова, «Моделирование устойчивых случайных векторов», автореф. дис. канд. физ.-мат. наук., Тверской гос. ун-т., Тверь, 2012.
- [97] Л. В. Осипов, «О вероятностях больших уклонений сумм независимых случайных величин», *Теория вероятности и ее применение*, № 2, с. 320-341.
- [98] Л. В. Розовский, «Вероятности больших уклонений сумм независимых случайных величин с общей функцией распределения из области притяжения нормального закона», *Теория вероятности и ее применение*, № 4, с. 686-705.
- [99] Ю. Г. Рудой, «Случайные блуждания и аномальная диффузия Леви-Хинчина в физической химии полимеров», *Наука – фундамент решения технологических проблем развития России*, № 2, с. 74-101, 2007.
- [100] В. М. Золотарев, *Устойчивые законы и их применение*. Москва: «Знание», 1984.
- [101] П. Леви, *Стохастические процессы и броуновское движение*. Москва: Наука, 1972.
- [102] И. А. Ибрагимов, и Ю. В. Линник. *Независимые и стационарно связанные величины*. Москва: Наука, 1965.
- [103] В. М. Золотарев. *Одномерные устойчивые распределения*. Москва: Наука, 1983.
- [104] В. М. Золотарев, В. В. Учайкин, и В. В. Саенко, «Супердиффузия и устойчивые законы», *ЖЭТФ*, т. 115, вып. 4, с. 1411-1425, 1999.
- [105] Дж. Гудмен, *Статистическая оптика*. Москва: Мир, 1988.
- [106] М. А. Лифшиц, *Устойчивые распределения, случайные величины и процессы*. СПб., 2007.
- [107] J. Habasaki, I. Okada, Y. Hivatari, «Fraction excitation and Levy flight dynamics in alkali silicate glasses» *Phys. Rev.*, vol. 55, no 10, pp. 6309-6315, 1997.

- [108] В. В. Учайкин, и Р. Т. Сибатов, «Одномерное фрактальное блуждание с конечной скоростью свободного движения», *Письма в ЖТФ*, т. 30, вып. 8, с. 27-33, 2004.
- [109] В. В. Учайкин, и Д. А. Коробко, «К теории многократного рассеяния в среде фрактального типа», *Письма в ЖТФ*, т. 25, вып. 1, с. 34-40, 1999.
- [110] В. Л. Колядин, «Распределения с бесконечной дисперсией и ограниченность классической статистики», *Радиотехника*, № 2, с. 4-11, 2002.
- [111] В. В. Учайкин, «Автомодельная аномальная диффузия и устойчивые законы», *Успехи физических наук*, т. 173, № 8, с. 847-876, 2003.
- [112] Р. Т. Сибатов, и В. В. Учайкин, «Дробно-дифференциальная кинетика переноса заряда в неупорядоченных полупроводниках», *Физика и техника полупроводников*, т. 41, вып. 3, с. 346-35, 2007.
- [113] А. В. Лаппа, Е. В. Бахвалов, и А. С. Аникина, «Метод характеристических функций в оценивании математического ожидания случайных величин с бесконечной дисперсией», *Известия Челябинского научного центра*, вып. 2, с. 1-6, 2004.
- [114] В. И. Денисов, и В. С. Тимофеев. «Устойчивые распределения и оценивание параметров регрессионных зависимостей», *Известия Томского политехнического университета*, т. 318, № 2, с. 10-15, 2011.
- [115] А. Л. Корженевский, и Л. С. Камзина, «Аномальная диффузия света в сегнетоэлектриках с размытым фазовым переходом», *Физика твердого тела*, т. 40, № 8, с. 1537-1541, 1998.
- [116] N. Kumar, U. Harbola, and K. Lindenberg, «Memory-induced anomalous dynamics: emergence of diffusion, subdiffusion, and superdiffusion from a single random walk model» [Электронный ресурс]. Доступно: <http://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.82.021101>. –2.10.2010 у.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.82.021101>
- [117] Р. Глаубер, *Оптическая когерентности и статистика фотонов*. Москва: Мир, 1966.

- [118] Д. Рюэль, *Случайность и хаос*. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.
- [119] J. E. Harvey, N. Choi, A. Krywonos, G. Peterson, and M. Bruner. “Image degradation due to scattering effects in two-mirror telescopes” [Электронный ресурс]. Доступно: <http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/article.aspx?articleid=1096366>. 2.07.2010 г.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/1.3454382>
- [120] K. J. Engel, R. Steadman, and C. Herrmann, “Pulse Temporal Splitting in Photon Counting X-Ray Detectors», *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 59, no. 4, pp. 1480-1490, 2012.
- [121] A. Takao, M. Yasuda, and K. Sawada, “Noise Suppression Effect in an Avalanche Multiplication Photodiode Operating in a Charge Accumulation Mode”, *IEEE Transactions on electron devices*, vol. 42, no. 10, pp. 1769-1774, 1995.
- [122] D. H. Johnson. Statistical Signal Processing [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.ece.rice.edu/~dhj/courses/elec531/notes.pdf>
- [123] P. Seitz, *Single-Photon Imaging*, A.J.P. Theuwissen, Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [124] F. Z. Baouche, F. Hobar, and Y. Hervé, “Level Modeling in Optoelectronic Systems; Transmission Line Application”, *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, vol. 6, iss. 1, pp. 392-404, 2013.
- [125] M. Imai, “Statistical Properties of Optical Fiber Speckles”, *Bulletin of the Faculty of Engineering, Hokkaido University*, no. 130, pp. 89-10, 1986.
- [126] B. Wetzal, K. J. Blow, S. K. Turitsyn, G. Millot, L. Larger and J. M. Dudley “Random walks and random numbers from supercontinuum generation”, *OSA Optics Express*, vol. 20, no. 10, pp. 11143-11152, 2012. doi: 10.1364/OE.20.011143.
- [127] R. Metzler, and J. Klafter “The random walk's guide to anomalous diffusion: a fractional dynamics approach” [Электронный ресурс]. Доступно:

<http://www.tau.ac.il/~klafter1/258.pdf>.

- [128] F. Šanda, and S. Mukamel «Anomalous continuous-time random-walk spectral diffusion in coherent third-order optical response” *Phys. Rev. E*, vol.73, iss. 1, pp. 1-14, 2006. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.73.011103>
- [129] M. Sabathil Opto-electronic and quantum transport properties of semiconductor nanostructures / // Selected Topics of Semiconductor Physics and Technology / G. Abstreiter, M.-C. Amann, M. Stutzmann, P. Vogl, eds. – München : Verein zur Förderung des Walter Schottky Instituts der Technischen Universität München, 2005. – Vol. 67.
- [130] Robert D. Nowak, “A Statistical Multiscale Framework for Poisson Inverse Problems”, *IEEE Transactions On Information Theory*, vol. 46, no 5, pp. 1811-1825, 2000.
- [131] C. Noguez, and S. E. Ulloa “First-principles calculations of optical properties: Application to silicon clusters” *Physical Review B*, vol. 56, no. 15, 1997. [Электронный ресурс] Доступно: <http://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.56.9719>  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.56.9719>
- [132] A. B. Davis, A. Marshak, and K. P. Pfeilsticker “Anomalous/Lévy Photon Diffusion Theory: Toward a New Parameterization of Shortwave Transport in Cloudy Columns”, *Ninth ARM Science Team Meeting Proceedings, San Antonio, Texas*, pp. 1-13, 22-26 Mar. 1999.
- [133] A. B. Davis, D. M. Suszcynsky, and A. Marshak,. “Shortwave Transport in the Cloudy Atmosphere by Anomalous/Lévy Diffusion: New Diagnostics Using FORTÉ Lightning Data”, *Tenth ARM Science Team Meeting Proceedings, San Antonio, Texas*, pp. 1-18, 13-17 Mar., 2000.
- [134] W. Flores-Fuentes, M. Rivas-Lopez, O. Sergiyenko , F. Gonzalez-Navarro J. Rivera-Castillo, and D. Hernandez-Balbuena, “Digital Signal Processing on Optoelectronic for SHM”, in *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, 2013, vol I WCECS 2013,

23-25 October, 2013, San Francisco, USA // ISBN: 978-988-19252-3-7  
ISSN: 2078-0958 (Print); ISSN: 2078-0966 (Online).

- [135] В. Г. Колобродов, та М. І. Лихоліт, *Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження*: Київ, Україна: НТУУ «КПІ», 2007.
- [136] А. И. Стрелков, Т. А. Стрелкова, и А. П. Лытюга, «Стохастико-детерминированный подход к обработке оптических сигналов в оптико-электронных системах», *Научно-технический журнал «Контекст»*, г. Красногорск, т. 12, №1, 2013.
- [137] Т. А. Стрелкова, «Использование устойчивых законов распределения при оценке эффективности обработки сигналов в оптико-электронных системах», *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, № 2/9 (74), с. 4–9, 2015.
- [138] Т. А. Strelkova, «Studies on the Optical Fluxes Attenuation Process in Optical-electronic Systems», *Semiconductor physics, quantum electronics & optoelectronics (SPQEO)*, no. 4, pp. 421–424, 2014.
- [139] А. И. Стрелков, Е. И. Жилин, А. П. Лытюга, Т. А. Стрелкова, и Т. В. Бутрым, «Обнаружение ослабленных оптических сигналов с учетом корпускулярного характера их взаимодействия с веществом», *Системи управління, навігації та зв'язку : зб. наук. пр.*, вип. 3(23), с. 108–111, 2012.
- [140] Т. А. Стрелкова, «Статистические свойства выходных сигналов оптико-телевизионных систем с ограниченным динамическим диапазоном», *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, № 2/9 (68), с. 38–44, 2014.
- [141] А. И. Стрелков, Е. И. Жилин, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Угловое разрешение близкорасположенных изображений космических объектов в астрономических оптико-электронных систем» *Радиотехника: Всеукр. Межвед. наук.-техн. сб.*, вып. 143, с. 58–64, 2005.
- [142] О. І. Стрелков, В. І. Барсов, Т. О. Стрелкова, Є. І. Жилін, та В. В. Марченко, «Підвищення частотної точності акустооптичних засобів спектрального і радіочастотного аналізу (експериментальні до-

- слідження)», *Системи озброєння і військова техніка*, № 4 (8). – С. 20 – 25, 2006.
- [143] А. И. Стрелков, Т. А. Стрелкова, С. Е. Кальной, и В. В. Карнаух, «О работе акустооптического датчика при больших амплитудах звука», *Системи обробки інформації : зб. наук. пр.*, вип.2 (51), с. 173 – 179, 2006.
- [144] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Алгоритмы обнаружения сигналов в оптико-электронных системах контроля космического пространства», *Радиотехника: Всеукр. Межвед. наук.-техн. сб.*, вып. 132, с. 351–357, 2003.
- [145] Т. А. Стрелкова, Е. И. Жилин, и С. И. Калмыков, «Применение простейшего фильтра парнокоррелированного потока импульсов фотоотчетов для повышения точности измерения концентрации специальных биологических примесей», *Системи обробки інформації : зб. наук. пр.*, № 6(22), с. 160–163, 2002
- [146] С. И. Калмыков, А. И. Стрелков, А. М. Стадник, и Т. А. Стрелкова, «Оценка интенсивности сверхслабого излучения при хемилюминесцентном анализе», *Радиотехника : Всеукр. Межвед. наук.-техн. сб. Харьковский национальный университет радиоэлектроники*, вып. 125, с. 66–72, 2002.
- [147] А. И. Стрелков, Т. А. Стрелкова, Е. И. Жилин, и В. В. Марченко, «Пространственное разрешение оптических сигналов акустооптического преобразователя при анализе спектров радиосигналов на близких частотах», *Системи обробки інформації : зб. наук. пр., Харківський університет Повітряних Сил*, № 5 (45), с. 144–151, 2005.
- [148] В. И. Барсов, Т. А. Стрелкова, Е. И. Жилин, и А. С. Калмыков, «Анализ электромагнитной обстановки на техногенных объектах сложной пространственной структуры», *Системи обробки інформації : зб. наук. пр., Харківський університет Повітряних Сил*, № 8 (57), с. 93- 95, 2006.
- [149] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и В. В. Коротков, «Алгоритмы обна-

- ружения сигналов в акустооптических анализаторах спектра», *Радиотехника : Всеукр. Межвед. наук.-техн. сб., Харьковский национальный университет радиоэлектроники*, Вып. 131, с. 37–43, 2003.
- [150] А. И. Стрелков, В. И. Барсов, Т. А. Стрелкова, и Е. Н. Кац, «Оценка эффективности метода накопления серии короткоэкспозиционных слабоконтрастных телевизионных кадров», *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил : зб. наук. пр.*, Вип. 1(13), с. 44-47, 2007.
- [151] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Алгоритмы обнаружения сигналов в оптико-электронных системах контроля космического пространства», *Радиотехника : Всеукр. Межвед. наук.-техн. сб., Харьковский национальный университет радиоэлектроники*, Вып. 132, с. 7–13, 2003.
- [152] А. И. Стрелков, Т. А. Стрелкова, и Д. П. Панасенко, «Анализ метода разрешения изображений близко расположенных объектов, не равноценных по яркости, при наличии помех», *Системи управління, навігації та зв'язку : зб. наук. пр., Центральний науково-дослідний інститут навігації та управління*, Вип. 4(8), с. 27-31, 2008.
- [153] А. И. Стрелков, С. Е. Кальной, Е. И. Жилин, Т. А. Стрелкова, и В. В. Карнаух, «Применение метода дискретного накопления сигналов для повышения динамического диапазона акустооптического анализатора спектра радиосигналов», *Системи управління, навігації та зв'язку : зб. наук. пр., Центральний науково-дослідний інститут навігації та управління*, Вип. 2 (14), с. 58–66, 2010.
- [154] О. І. Стрелков, Т. О. Стрелкова та ін., «Розробка принципів побудови виявителя пачок коротких оптичних сигналів блоку “Ч-1”», *Харківський національний університет радіоелектроніки*, Харків, № ДР 0104U0902072, 2003.
- [155] О. І. Стрелков, Т. О. Стрелкова та ін., «Розробка методів збільшення динамічного діапазону та роздільної здатності акустооптич-

- них аналізаторів спектра (АОАС) та рекомендацій щодо їх реалізації», Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, № ДР 0105U007073, 2008.
- [156] О. І. Стрелков, Т. О. Стрелкова та ін., «Методи підвищення динамічного діапазону блоку Ч1 та розробка пропозицій з їх реалізації», Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, № ДР 0105U0060789, 2010.
- [157] Е. И. Кузмина, Н. С. Подгусков, С. В. Ермолин, и С. В. Мошкова, «Использование хемилюминисцентного анализа мочи и сыворотки крови в ранней диагностике злокачественных и воспалительных заболеваний органов мочеполовой системы», *Люминесцентный анализ в медицине и биологии и его аппаратное обеспечение*, Рига, 1988.
- [158] Г. Е. Добрецов, «Флуоресцентные зонды в биофизике мембран, медицине и фармакологии», *Люминесцентный анализ в медико-биологических исследованиях*, 1986.
- [159] С. И. Калмыков, «Высокоточная оценка биологического заражения в местах дислокации воинских формирований», Системы обработки інформації, Вып. 5(15), с. 155-158, 2001.
- [160] Т. А. Стрелкова, А. М. Стадник, и С. И. Калмыков, «Квазиоптимальное обнаружение парнокоррелированных сигналов в сильных пуассоновских шумах», *Системы обработки інформації : зб. наук. пр. НАНУ, ПАНМ, Харківський військовий університет*, № 3 (19), с. 184–192, 2002.
- [161] А. М. Косевич, *Физическая механика реальных кристаллов*. Киев, Украина: Наукова думка, 1981.
- [162] І. Г. Прокопенко, *Статистична обробка сигналів*. Київ, України: НАУ, 2011.
- [163] В. И. Никитенок, и С. С. Ветохин, «Быстрые непараметрические алгоритмы обнаружения слабых оптических сигналов», *Вестник томского государственного университета*, № 1(22), с. 104-113, 2013.

- [164] Ю. И. Белоусов, и В. Т. Фисенко, «Особенности алгоритмов цифровой обработки изображений в оптико-электронных системах нового поколения», *Изв. Вузов. Приборостроение*. т. 52, № 8, с. 7-12, 2008.
- [165] В. И. Парфенов, и В. С. Кирилов, «Анализ характеристик обнаружения слабых оптических сигналов с предусилением», *Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Физика. Математика*, № 2, с. 66-72, 2012.
- [166] Ю. И. Белоусов, и Д. В. Иванов, «Учет характеристик флуктуаций фонового излучения пригоризонтной области моря в алгоритмах обработки сигналов инфракрасных приборов», *Изв. Вузов. Приборостроение*, т. 52, № 8, с. 43-49, 2008.
- [167] О. В. Галактионова, и Ю. С. Хохлов, «Модель телетрафика, объединяющая устойчивое движение Леви и дробное броуновское движение», *Вестник Тверского гос. унив. Серия: Прикладная математика*, № 4(21), с. 163-167, 2006.
- [168] В. Н. Бондарев, Г. Трестер, и В. С. Чернега, *Цифровая обработка сигналов: методы и средства*, Севастополь, 1999.
- [169] Р. Гонсалес, и Р. Вудс, *Цифровая обработка изображений*. Москва, Россия: Техносфера, 2005.
- [170] Б. И. Давыдов, «Порог обнаружения ИСЗ на дневном небе», *Космические исследования*, т. 28, № 5, с. 797-798, 1990.
- [171] Э. Мак-Картни, *Оптика атмосферы. Рассеяние света молекулами и частицами*, пер. с англ. под ред. К.С. Шифрина. Москва, Россия: «Мир», 1979.
- [172] М. Эклз, Э. Сим К. Триттон, *Детекторы слабого излучения в астрономии* : пер. с англ. Москва, Россия: «Мир», 1986.
- [173] Б. В. Анисимов, *Распознавание и цифровая обработка изображений*. СПб., Россия: Диасофт, 2003.
- [174] А. И. Писаревский, и др. *Системы технического зрения (принципиальные основы, аппаратное и математическое обеспечение)*. Ленинград, Россия: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988.

- [175] Р. М. Юсупов, и Р. И. Полонников, *Телемедицина. Новые информационные технологии на пороге XXI века*. СПб. Россия: 1998.
- [176] Д. Григсби, и Д. Х. Сандерс, «Телемедицина: уровень развития и перспективы», *Международный журнал медицинской практики*, № 3, с. 52-56, 1999.
- [177] В. М. Казаков, В. Г. Климовицкий, А. В. Владзимирский, и Ю. Є. Лях, «Стан і перспективи розвитку телемедицини в Україні», *Український журнал телемедицини та медичної телематики*, т. 1, № 1, с. 7-12, 2003.
- [178] И. В. Емелин, «О стандартах электронного обмена медицинскими документами», *Компьютерные технологии в медицине*, № 1, с. 44-48, 1996.
- [179] Д. Ватолин, *Алгоритмы сжатия изображений*. Москва, Россия: Бинном, 2006.
- [180] Д. Ирвин и Д. Харль, *Передача данных в сетях: инженерный подход*. СПб., Россия: БХВ-Петербург, 2003.
- [181] В. М. Артюшенко, О. И. Шелухин, и М. Ю. Афонин, *Цифровое сжатие видеоинформации и звука*. Москва, Россия: Дашков и Ко, 2003.
- [182] А. Б. Сергиенко, *Цифровая обработка сигналов*. СПб. Россия: Питер, 2003.
- [183] Э. Айфичер, и Б. Джервис, *Цифровая обработка сигналов. Практический подход*. Москва, Россия: "Вильямс", 2004.
- [184] Р. Е. Быков, Р. Фрайер, К. В. Иванов, А. А. Манцетов, *Цифровое преобразование изображений*. Москва, Россия: Горячая линия - Телеком, 2003.
- [185] А. Л. Андреев, и Т. П. Лбова, «Разработка структуры комплексной модели оптико-электронной системы наблюдения за точечными объектами», *Научно технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики*, № 5(63), с. 10-15, 2009.

- [186] Д. Ватолин, А. Ратушняк, М. Смирнов, и В. Юркин, *Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео*. Москва, Россия: «Диалог-МИФИ», 2003.
- [187] В. Д. Смирнов, И. В. Кнороз, и С. Е. Герсанова, «Чувствительность оптико-электронных приборов при малом контрасте объектов к окружающему фону», *Известия ВУЗов. Приборостроение*, т. 52, № 5, с. 47-49, 2009.
- [188] Э. Оппенгейм, *Применение цифровой обработки сигналов*. Москва, СССР: Мир, 1980.
- [189] В. А. Сойфер, *Методы компьютерной обработки изображений*. Москва, Россия Физматлит, 2001.
- [190] С. Д. Егорова, и В. А. Колесник, *Оптико-электронное цифровое преобразование изображений*. Москва, Россия: Радио и связь, 1991.
- [191] А. В. Дворкович, В. П. Дворкович, Ю. Б. и Зубарев, *Цифровая обработка телевизионных и компьютерных изображений*. Москва, Россия: 1997.
- [192] I. A. Cunningham, and R. Shaw, «Signal-to-noise optimization of medical imaging systems», *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 19, pp. 621-632, 1999.
- [193] Д. Форсайт, и Ж. Понс, *Компьютерное зрение. Современный подход*. Москва, Россия: Издательский дом "Вильямс", 2004.
- [194] В. В. Березин, и А. К. Цыбулин, «Обнаружение и оценивание координат изображений точечных объектов в задачах астронавигации и адаптивной оптики», *Вестник ТОГУ*, № 1(8), с. 11-20, 2008.
- [195] К. С. Васюта, и С. А. Щербинин, «Скрытая передача цифровой информации путем вариации параметров случайных процессов с устойчивыми распределениями», *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*, вип. 1(34), с. 108-111, 2013.
- [196] А. Оппенгейм, и Р. Шафер *Цифровая обработка сигналов*. Москва, Россия: Техносфера, 2006.
- [197] А. И. Стрелков, Т. А. Стрелкова, и С. А. Лисовенко, «Анализ возмож-

- ности обнаружительной способности оптико-электронных систем», *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба : зб. наук. пр.*, Вип. 3 (15), с.48–52, 2007.
- [198] Strelkov, Ye. Zhilin, A. Lytyuga, and S. Lisovenko, “Signal Detection in Technical Vision Systems”, *Telecom. and Radio Engineering*, no. 66. pp. 283–293, 2007.
- [199] T. Strelkova, «Influence of Video Stream Compression on Image Microstructure in Medical Systems», *Biomedical Engineering*, vol. 47, pp. 307–311, 2014.
- [200] А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Оценка возможностей наблюдения низкоорбитальных космических объектов оптико-электронными средствами в дневное время», на *7-й Международ. конф. Теория и техника передачи, приема и обработки информации*, Харьков, 2001, с. 82-83.
- [201] А. П. Лытюга, «Обработка астрономических телевизионных изображений для обнаружения космических объектов в дневное время», на *2-й Международ. науч.-техн. конф. Проблемы информатики и моделирования*, Харьков, 28 - 30 нояб., 2002, с. 27.
- [202] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, Ю. С. Бурмистров, В. А. Сауткин, и В. И. Коленков, «Расширение потенциальных возможностей астрономических телевизионных систем», на *Международ. науч. конф. Теория и техника передачи, приема и обработки информации*, Харьков – Туапсе, 2003, с. 209-210.
- [203] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, Ю. С. Бурмистров, В. А. Сауткин, и В. И. Коленков, «Последетекторная обработка сигналов в астрономических телевизионных системах», на *10-й Юбилейной междунар. науч. конф. Теория и техника передачи, приема и обработки информации*, Харьков – Туапсе, ХНУРЭ, 2004, с. 249-250.
- [204] T. Strelkova, V. Kartashov , A. Lytyuga, and A. Strelkov, «Theoretical methods of images processing in optoelectronic systems», in *Developing and Ap-*

- plying Optoelectronics and Machine Vision*. Chapter 6, 2016, pp. 181-206.  
<http://www.igi-global.com/book/developing-applying-optoelectronics-machine-vision/147652>
- [205] Т. А. Стрелкова, В. А. Тиманюк, Э. А. Ромоданова, А. И. Стрелков, и А. П. Лытюга, «Цифровой комплекс микроскопии для исследования гемолиза», на *Всеукр. научн.-практ. конф. с междунар. участием Современные проблемы судебно-токсикологической науки и практики*, Харьков, 2009, с. 26-27.
- [206] Т. А. Стрелкова, А. П. Лытюга, и А. Ю. Ваганов, «Исследование влияния методов компрессии на качество видеопочков в системах технического зрения», на *Международ. научн.-практ. конф. Качество технологий - качество жизни*, Харьков, 2011, с. 21-22.
- [207] А. И. Стрелков, С. Е. Кальной, Т. А. Стрелкова, и Е. А. Соломко, «Влияние алгоритма сжатия wavelet на эффективность метода накопления кадров слабоконтрастных крупноразмерных изображений», *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба : зб. наук. пр.*, вип. 1 (19), с. 119-122, 2009.
- [208] А. И. Стрелков, и С. А. Лисовенко, «Экспериментальное исследование возможности повышения качества обнаружения сигналов при обработке слабоконтрастных ТВ-кадров», *Системи озброєння і військова техніка*, вип. 2(10), с. 8-10, 2007.
- [209] О. І. Стрелков, Т. О. Стрелкова, та С. О. Лісовенко, «Експериментальне дослідження можливості підвищення якості виявлення сигналів в оптико-електронних при обробці слабоконтрастних ТВ-кадрів», *Системи озброєння і військова техніка*, № 2(10), с. 8-10, 2007.
- [210] А. И. Стрелков, Т. А. Стрелкова, Е. И. Жилин, и Т. В. Бутрым, «Анализ временных ограничения по непрерывному накоплению оптических сигналов в телевизионных оптико-электронных системах», *Системи озброєння і військова техніка*, № 3(27), с. 8-10, 2011.
- [211] А. И. Стрелков, Т. А. Стрелкова, Е. И. Жилин, А. П. Лытюга, и В. В.

- Карнаух, «Анализ влияния времени накопления оптических сигналов на динамический диапазон акустооптического анализатора спектра радиосигналов», *Системы обробки інформації: зб. наук. пр., Харківський університет Повітряних Сил*, вип. 4 (78), с. 2-5, 2009.
- [212] А. И. Стрелков, Е. Н. Кац, и Т. А. Стрелкова, «Имитационное моделирование алгоритма обнаружения изображения, быстродвигающихся объектов известной формы в ТВ кадрах в условиях слабой освещенности», *Системы обробки інформації : зб. наук. пр., Харківський університет Повітряних Сил*, вип. 6 (73), с.110–113, 2008.
- [213] А. И. Стрелков, Д. П. Панасенко, и Т. А. Стрелкова, «Имитационное моделирование метода разрешения изображений близкорасположенных объектов не равноценных по яркости», *Системы обробки інформації : зб. наук. пр., Харківський університет Повітряних Сил*, вип. 6(73), с. 114-118, 2008.
- [214] С. А. Климов, «Потенциальный предел и показатели качества сверхрелеевого разрешения сигналов», *Цифровая обработка сигналов*, Вып. 4, с. 2–8, 2013.
- [215] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Энергетическое обнаружение оптических сигналов в телевизионных системах», *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба : зб. наук. пр.*, вип. 1(23), с. 68-71, 2010.
- [216] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Состояние и перспективы развития оптико-электронных приборов специального назначения», на *2-м Международном Радиоэлектронном Форуме «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2005)*, Харьков, 9-23 сент. 2005, Том 2, с. 469-470.
- [217] С. А. Лисовенко, А. И. Стрелков, А. С. Калмыков, и Т. А. Стрелкова, «Сравнительный анализ методов ослабления аддитивных шумов в оптико-электронных системах», на *VIII Міжнар. наук.-практ. конф. "Людина і космос". Ракетно-космічна техніка*, Дніпропет-

- ровськ, 13-14 квіт. 2006, с.135.
- [218] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, Е. И. Жилин, и Т. А. Стрелкова, «Корреляционная обработка сигналов в астрономических телевизионных оптико-электронных системах», на *Международной конф., “Расширение сотрудничества в наземных астрономических исследованиях государств юго-восточной Европы. Изучение объектов околоземного пространства и малых тел солнечной системы”*, Николаев, 2006, с. 100–102.
- [219] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Особенности обнаружения оптических сигналов от космических объектов в астрономических телевизионных системах в сумеречное и дневное время», на *Міжнар. наук. конф., „Сучасні проблеми астрономії”*, Одеса, 12-18 серп., 2007, с. 34.
- [220] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Имитационное моделирование обнаружения низкоорбитальных космических объектов в сумеречных и дневных условиях астрономическими телевизионными системами», на *Седьмая Украинская конференция по космическим исследованиям НЦУИКС*, Евпатория, 3-8 сент., 2007, с. 203.
- [221] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, Е. И. Жилин, и Т. А. Стрелкова, «Возможности обнаружения объектов оптико-электронными системами в условиях сильных аддитивных и мультипликативных помех», in *VI International Conference on Optoelectronic Information Technologies “Photonics-ODS 2008”*, Vinnytsia, VNTU, 30 Sept. – 2 Oct., 2008, pp. 22.
- [222] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, Ю. А. Яновский, и Т. А. Стрелкова, «Исследование качества изображений при передаче в телемедицинских информационных сетях», на *8-ї Міжнар. міждисциплінарної наук.-практ. конф. Сучасні проблеми науки та освіти, Українська Асоціація „Жінки в науці та освіті”*, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Алушта 30 квіт. -10 трав., 2009, с. 97-98.

- [223] Т. А. Стрелкова, и И. А. Пашенко, «Стандарты для передачи радиологических изображений в телемедицинских сетях», на *II-ой Междунар. науч.-практ. конф., «Качество технологий – качество жизни»*, Судак 15-19 сент. 2010, с. 99-100.
- [224] Т. А. Стрелкова, и А. С. Калмыков, «Оптико-электронная система для изучения собственного оптического излучения живых систем», на *II-ой Междунар. науч.-практ. конф. «Качество технологий – качество жизни»*, Судак 15-19 сент. 2010, с. 113.
- [225] Л. Ф. Купченко, А. С. Рыбьяк, «Динамическая спектральная фильтрация оптического излучения в оптоэлектронных системах», *Электромагнитные волны и электронные системы*. М.: Радиотехника, т.16, вып. 4, с. 32 -43 2011.
- [226] Л. Ф. Купченко, А. С. Рыбьяк, В. В. Проклов, и С.Н. Антонов, «Обнаружение объектов по спектральным признакам в оптико-электронных системах с использованием принципов динамической фильтрации», *Прикладная радиоэлектроника*, т. 10, №1, с. 22 – 26, 2011.
- [227] В. К. Баклицкий, «Корреляционно-экстремальный алгоритм распознавания образов», *Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника*, том 29, №1, с.68-72, 1989.
- [228] В. К. Баклицкий, А. М. Бочкарев, и М. П. Мусьяков, *Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации*. Москва, СССР: Радио и связь, 1986.
- [229] П. А. Бакулев, и В. М. Степин, *Методы и устройства селекции движущихся целей*. Москва, СССР: Радио и связь, 1986.
- [230] П. А. Бакут, Г. С. Колмогоров, и И. Э. Ворновицкий, «Сегментация изображений: Методы выделения границ областей», *Зарубежная радиоэлектроника*, № 10, с. 25 – 47, 1987.
- [231] П. А. Бакут, Г. С. Колмогоров и И. Э. Ворновицкий, «Сегментация изображений: Методы пороговой обработки», *Зарубежная радиоэлектроника*, № 10, с. 6-24, 1987.

- [232] D. W. Carlson, B. V. Kumar, R. R. Mitchell, and M. Hoffelder, «Composite correlation filters for SAR image recognition», *Proc. of SPIE. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery III*, vol. 2757, pp. 338-349, Jun 1996.
- [233] J.-Y. Dufour, and V. Martin, “Active/passive cooperative image segmentation for automatic target recognition”, *Proc. of SPIE. Applications of Digital Image Processing XVII*, vol. 2298, pp. 552-560, Sep 1994.
- [234] A. D. Lanterman, M. L. Coope, and M. I. Mille, “Efficient estimation of thermodynamic state incorporating Bayesian model order selection”, *Proc. Of SPIE. Automatic Target Recognition IX*, vol. 3718, pp.2-12, Aug. 1999.
- [235] В. А. Кочкин, «Автоматическое выделение динамических объектов на фоне подстилающей поверхности», *Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана*, № 12, с. 128-136, 2014. DOI: 10.7463/0815.9328000
- [236] К. А. Бохан, «Эвристический алгоритм обнаружения и оценки параметров изображений динамических объектов», *Рязан. гос. радиотехн. акад. Рязань*, № Д08886, 2001.
- [237] Э. А. Корнилов, И.Г. Прокопенко, и В.М. Чуприн, *Устойчивые алгоритмы в автоматизированных системах обработки информации*. Киев, СССР: Техника, 1989.
- [238] К. А. Бохан, «Методы обнаружения и выделения движущихся объектов на изображениях» на *36-й научно-технической конференции*, Рязань, РГРТА, 2000, с. 34.
- [239] В.А. Alpatov, P. V. Babayan, O. E. Balashov, and A. I. Stepashkin, *Automatic objects detection and tracking method*. M: Radiotechnic, 2008.
- [240] I.S. Gruzman, and V.S. Kirichuk, *Digital image processing in information systems*. Novosibirsk: Publishing House of the NSTU, 2002.
- [241] V. S. Muraviev, “Air objects image spatial detection and coordinate measuring algorithm RGRТУ Herald”, *Ryazan. Herald*, 2009. 2 (28). S. 17-20
- [242] Г. П. Филатов, и С. А. Поляков, «О проблемах и методах нахождения малоразмерных объектов на изображениях», *Фундаментальные*

*исследования*, № 8, с. 318-322, 2013.

- [243] V. A. Kochkin, «Automatic detection of dynamic objects in the survey and exploration of optoelectronic systems». M.: BMSTU reporter. Ser. «Tool engineering», a special edition of "modern problems of optotehnic", 2011, pp. 101-113.
- [244] V. S. Kirichuk, V. P. Kosykh, and T. Kurmanbek, "Algorithms of small dimension moving objects detection in a sequence of images", *Avtometriya*, №1, pp. 14-22, 2009.
- [245] И. В. Гальчук, А. Г. Костевич, М. И. Курячий, «Пространственно-временные ранговые алгоритмы выделения малоразмерных объектов на сложном фоне», *Известия ВУЗов. Приборостроение*, т. 53, с. 22-26, 2010.
- [246] В. Е. Саваневич, «Определение координат статистически зависимых объектов на дискретном изображении», *Радиотехника*, № 1, с. 4-8, 1999.
- [247] Е. В. Зайчева, «Сравнение различных аппроксимаций кружка рассеяния безаберрационного объектива», *Известия ВУЗов*, т. 53, № 9, с. 47- 52, 2010.
- [248] В. В. Марченко, «Методи підвищення частотної точності акустооптичного аналізатора спектра радіосигналів», автореф. дис. канд. техн. наук, ХНУРЕ, Харків, 2008.
- [249] О. В. Васильченко, С. А. Климов, и В. М. Косяков, «Оценка эффективности алгоритмов сверхразрешения групповых объектов по дальности методом полунатурного моделирования», *Журнал радиоэлектроники*, № 6, электронный журнал, ISSN 1684-1719, 2012.

Міністерство освіти  
і науки України

УКРАЇНЬКА ІНЖЕНЕРНО-  
ПЕДАГОГІЧНА АКАДЕМІЯ

вул. Університетська, 16,  
м. Харків, 61003, Україна



Тел.: (057)731 28 62; факс: (057)731 32 36  
E-mail: [rektor@uipa.edu.ua](mailto:rektor@uipa.edu.ua)  
<http://uipa.edu.ua>  
Код ЄДРПОУ 02071228

Ministry of Education  
And Science of Ukraine

UKRAINIAN ENGINEERING  
PEDAGOGICS ACADEMY

Universytets'ka str. 16,  
Kharkiv, 61003. Ukraine

Від 11.03.2015 № 106-04-30/1

На від

### Довідка

про впровадження результатів наукової роботи та дисертаційних досліджень здобувача наукового ступеня доктора технічних наук  
Стрількової Тетяні Олександрівни  
у навчальний процес Української інженерно-педагогічної академії

За період роботи на кафедрі РКС на посаді доцента Стрількова Тетяна Олександрівна впровадила при викладанні лекційного матеріалу та проведенні практичних та лабораторних робіт у курсі «Цифрова обробка сигналів та зображень» та «Комп'ютерна електроніка» при підготовки магістрів та спеціалістів зі спеціальностей «Професійна освіта. Електроніка» та «Професійна освіта. Телекомунікації та зв'язок» наступні результати наукових досліджень у вигляді:

- методу статистичної обробки сигналів з детермінованими параметрами та зі ймовірнісними параметрами;
- методики дослідження енергетичних та просторово-часових параметрів сигналів за допомогою методів математичної статистики;
- методики визначення статистичних характеристик випадкових сигналів в телекомунікаційних системах передачі відеоданих при застосуванні методів компресії;
- методики знаходження оптимальних та квазіоптимальних алгоритмів обробки сигналів та зображень;
- методики розрахунку та узгодження динамічного діапазону фоточутливих елементів системи з параметрами сигналів;
- методики визначення потенційних можливостей оптико-електронних, телевізійних та телекомунікаційних систем, що використовуються у різноманітних умовах.

З урахуванням постійного динамічного оновлення наукоємного, інноваційного виробництва та системи технічної освіти, новітні теоретичні, практичні методи та методики, що запропоновані Стрільковою Т.О. дозволили підсилити, як міждисциплінарний зв'язок з загальноосвітніми дисциплінами, так і зв'язок дисциплін, що викладались, зі сучасними технологіями виробництва.

Впровадження результатів дисертаційних досліджень Стрількової Тетяни Олександрівни в навчальному процесі Української інженерно-педагогічної академії дозволило підвищити якість підготовки професійних педагогічних кадрів у галузях інженерної педагогіки та технічних наук України по спеціалізаціям «Комп'ютерні системи та мережі» та «Телекомунікаційні системи та мережі, системи мобільного, супутникового зв'язку та радіотехніки».

Проректор з наукової роботи



М.І.Лазарев

ЗАТВЕРДЖУЮ

Голова правління ПАТ «СКБ РТП»  
доктор технічних наук УТА  
лауреат Державної премії України  
в галузі науки і техніки

М. М. Гришко  
«\_\_\_\_\_» 2014 р.



## А К Т

про впровадження результатів науково-прикладних досліджень здобувача наукового ступеня доктора технічних наук Стрілкової Тетяні Олександрівни

Комісія у складі:

**Гришко Микола Мефодійович** - голова правління ПАТ «СКБ РТП», доктор технічних наук УТА, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, голова комісії.

**Коротков Вячеслав Валентинович.** — головний інженер ПАТ «СКБ РТП», кандидат технічних наук, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, заст. голови комісії.

**Марченко Василь Васильович** — заст. голови правління ПАТ «СКБ РТП», кандидат технічних наук, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, член комісії.

**Карнаух Валерій Всеволодович** — нач. НДВ-3 ПАТ «СКБ РТП», кандидат технічних наук, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, член комісії.

## Розглянула:

1. Звіти з науково-дослідних робіт:

- НДР № 24/01-27: «Розробка принципів побудови виявителя пачок коротких оптичних сигналів блоку "Ч-1"». Номер держ. реєстрації ДР 0104U0902072, дата початку/закінчення робіт: 01.06.2002р./ 28.02.2005 р.

- НДР № 05-22 від 15.04.2005 р.: «Розробка методів підвищення роздільної здатності, збільшення динамічного діапазону акустооптичного аналізатора спектра». Номер держ. реєстрації ДР 0105U007073, дата початку/закінчення робіт: 15.04.2005 р./30.11.2008 р.

- НДР № 09-20 від 01.03.2009 р: «Методи підвищення динамічного діапазону блоку Ч1 та розробка пропозицій з їх реалізації». Номер держ. реєстрації ДР 0109U008535, дата початку/закінчення робіт: 01.03.2009 р./30.06.2010 р.

2. Звіти з дослідно-конструкторських та науково-дослідних робіт:

- № 14/02-27 від 25.12. 2003 р.

- № 07/02-20 від 05.09. 2003 р.

- № 09/02-22 від 14.10.2003 р.

- № 05-04 від 01.01.2004 рр.
- 13209 від 13.01.2006 р.
- № 2-11/128 від 02.11.2011 р.

3. Результати дисертаційної роботи Стрількової Т.О. на тему: «Розвиток теорії стохастико-детермінованої обробки сигналів та її застосування при розробці принципів побудови оптико-електронних систем», яку подано на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

4. Публікації Стрількової Т.О. за темою дисертаційних досліджень.

**Склала дійсний акт** в тім, що при розробці перспективних акустооптичних засобів аналізу радіочастотного аналізатора спектра радіосигналів були використані наступні результати дисертаційних досліджень Стрількової Тетяни Олександрівни:

1. Математичні моделі взаємодії оптичного випромінювання з елементами оптико-електронної системи, яка входить до складу акустооптичних аналізаторів спектру радіосигналі, враховують стохастико-детермінований характер оптичних сигналів та завад різноманітних просторово-часових та енергетичних параметрів при прийомі складних оптичних сигналів.

2. Систематизація теоретичних методів опису та аналізу оптичних сигналів в системах на основі запропонованих моделей, які є більш адаптованими до умов експлуатації системи та характеристик сигналів, дозволила:




- врахувати вплив різноманітних факторів на процес формування вихідних сигналів та їх статистичні властивості;
- розрахувати параметри системи при реєстрації сигналів, що знаходяться на межі динамічного та спектрального діапазонів, та характеризуються величиною співвідношення сигнал/шум менш 5;
- забезпечити виявлення сигналів с фіксованими характеристиками виявлення та величиною сигнал/шум у збільшеному частотному та динамічному діапазонах.

3. Методи та алгоритми фільтрації завадових складових вихідних сигналів, що розроблені на основі стохастико-детермінованої обробки оптичних сигналів дозволили:

- Збільшити спектральній діапазон системи на 30%
- Збільшити динамічний діапазон системи на 40%
- Виявляти радіосигнали со складної внутріімпульсної структурою
- Зменшити витрати на 20%.

Заст. голови комісії

Члени комісії

  
Коротков В.В.  
  
Марченко В.В.  
  
Карнаух В.В.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- [1] А. И. Стрелков, С. В. Москвитин, А. П. Лытюга, и Т.А. Стрелкова, *Оптическая локация. Теоретические основы приема и обработки оптических сигналов*. Харьков, Украина: Апостроф, 2010.
- [2] T. Strelkova, V. Kartashov, A. Lytyuga, and A. Strelkov, Theoretical methods of images processing in optoelectronic systems, in *Developing and Applying Optoelectronics and Machine Vision*. Chapter 6, 2016, pp. 181-206. <http://www.igi-global.com/book/developing-applying-optoelectronics-machine-vision/147652>
- [3] А. И. Стрелков, Е. И. Жилин, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Исследование возможности применения метода детерминированного ослабления сигнала в астрономических оптико-электронных системах», *Системи обробки інформації : зб. наук. пр. НАНУ, ПАНМ, Харківський військовий університет*. Харків, № 3(13), с. 160–163, 2001.
- [4] С. И. Калмыков, А. И. Стрелков, А. М. Стадник, и Т. А. Стрелкова, «Оценка интенсивности сверхслабого излучения при хемилюминесцентном анализе», *Радиотехника : Всеукр. Межвед. наук.-техн. сб. Харьковский национальный университет радиоэлектроники*, Вып. 125, с. 66–72, 2002.
- [5] Т. А. Стрелкова, А. М. Стадник, и С. И. Калмыков, «Квазиоптимальное обнаружение парнокоррелированных сигналов в сильных пуассоновских шумах», *Системи обробки інформації : зб. наук. пр. НАНУ, ПАНМ, Харківський військовий університет*, № 3 (19), с. 184–192, 2002.
- [6] Т. А. Стрелкова, Е. И. Жилин, и С. И. Калмыков, «Применение простейшего фильтра парнокоррелированного потока импульсов фотоотсчетов для повышения точности измерения концентрации специальных биологических примесей», *Системи обробки інформації : зб. наук. пр. НАНУ*,

- ПАНМ, Харківський військовий університет, № 6(22), с. 351–356, 2002.*
- [7] А. И. Стрелков, Т. А. Стрелкова, Е. И. Жилин, и В. В. Марченко, «Пространственное разрешение оптических сигналов акустооптического преобразователя при анализе спектров радиосигналов на близких частотах», *Системи обробки інформації : зб. наук. пр., Харківський університет Повітряних Сил, № 5 (45), с. 144–151, 2005.*
- [8] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Алгоритмы обнаружения сигналов в оптико-электронных системах контроля космического пространства», *Радиотехника : Всеукр. Межвед. наук.-техн. сб., Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Вып. 132, с. 7–13, 2003.*
- [9] В. И. Барсов, Т. А. Стрелкова, Е. И. Жилин, и А. С. Калмыков, «Анализ электромагнитной обстановки на техногенных объектах сложной пространственной структуры», *Системи обробки інформації : зб. наук. пр., Харківський університет Повітряних Сил, № 8 (57), с. 93- 95, 2006.*
- [10] А. И. Стрелков, Е. И. Жилин, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Угловое разрешение близкорасположенных изображений космических объектов в астрономических оптико-электронных систем», *Радиотехника : Всеукр. Межвед. наук.-техн. сб., Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Вып. 143, с. 58 – 64, 2005.*
- [11] А. И. Стрелков, Т. А. Стрелкова, С. Е. Кальной, и В. В. Карнаух, «О работе акустооптического датчика при больших амплитудах звука», *Системи обробки інформації : зб. наук. пр., Харківський університет Повітряних Сил, Вип.2 (51), с.173 – 179, 2006.*
- [12] О. І. Стрелков, В. І. Барсов, Т. О. Стрелкова, Є. І. Жилин, та В. В. Марченко, «Підвищення частотної точності акустооптичних засобів спектрального і радіочастотного аналізу (експериментальні дослідження)», *Системи озброєння і військова техніка, № 4 (8), с. 20 – 25, 2006.*
- [13] А. И. Стрелков, В. И. Барсов, Т. А. Стрелкова, и Е. Н. Кац, «Оценка эффе-

- ктивности метода накопления серии короткоэкспозиционных слабоконтрастных телевизионных кадров», *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил* : зб. наук. пр., Вип. 1(13), с. 44 – 47, 2007.
- [14] О. І. Стрелков, Т. О. Стрелкова, та С. О. Лісовенко, «Експериментальне дослідження можливості підвищення якості виявлення сигналів в оптико-електронних при обробці слабоконтрастних ТВ-кадрів», *Системи озброєння і військова техніка*, № 2(10), с. 8 – 10, 2007.
- [15] А. И. Стрелков, Т. А. Стрелкова, и С. А. Лисовенко, «Анализ возможности обнаружительной способности оптико-электронных систем», *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба* : зб. наук. пр., Вип. 3 (15), с. 48 – 52, 2007.
- [16] А. И. Стрелков, Е. Н. Кац, и Т. А. Стрелкова, «Имитационное моделирование алгоритма обнаружения изображения, быстродвигающихся объектов известной формы в ТВ кадрах в условиях слабой освещенности», *Системи обробки інформації* : зб. наук. пр., *Харківський університет Повітряних Сил*, вип. 6 (73), с. 110 – 113, 2008.
- [17] А. И. Стрелков, Д. П. Панасенко, и Т. А. Стрелкова, «Имитационное моделирование метода разрешения изображений близкорасположенных объектов не равноценных по яркости», *Системи обробки інформації* : зб. наук. пр., *Харківський університет Повітряних Сил*, вип. 6(73), с. 114 – 118, 2008.
- [18] А. И. Стрелков, Т. А. Стрелкова, и Д. П. Панасенко, «Анализ метода разрешения изображений близко расположенных объектов, не равноценных по яркости, при наличии помех», *Системи управління, навігації та зв'язку* : зб. наук. пр., *Центральний науково-дослідний інститут навігації та управління*, вип. 4(8), с. 27 – 31, 2008.
- [19] А. И. Стрелков, С. Е. Кальной, Т. А. Стрелкова, и Е. А. Соломко, «Влияние алгоритма сжатия wavelet на эффективность метода накопления кадров слабоконтрастных крупноразмерных изображений», *Збірник*

- наукових праць Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба : зб. наук. пр.*, вип. 1 (19), с. 119 – 122, 2009.
- [20] А. И. Стрелков, Т. А. Стрелкова, Е. И. Жилин, А. П. Лытюга, и В. В. Карнаух, «Анализ влияния времени накопления оптических сигналов на динамический диапазон акустооптического анализатора спектра радиосигналов», *Системи обробки інформації : зб. наук. пр., Харківський університет Повітряних Сил*, вип. 4 (78), с. 2 – 5, 2009.
- [21] А. И. Стрелков, С. Е. Кальной, Е. И. Жилин, Т. А. Стрелкова, и В. В. Карнаух, «Применение метода дискретного накопления сигналов для повышения динамического диапазона акустооптического анализатора спектра радиосигналов», *Системи управління, навігації та зв'язку: зб. наук. пр., Центральний науково-дослідний інститут навігації та управління*, Вип. 2 (14), с. 58 – 66, 2010.
- [22] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Энергетическое обнаружение оптических сигналов в телевизионных системах», *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба : зб. наук. пр.*, вип. 1(23), с. 68 – 71, 2010.
- [23] А. И. Стрелков, Т. А. Стрелкова, Е. И. Жилин, и Т. В. Бутрым, «Анализ временных ограничения по непрерывному накоплению оптических сигналов в телевизионных оптико-электронных системах», *Системи озброєння і військова техніка*, № 3(27), с. 8 – 10, 2011.
- [24] А. И. Стрелков, Е. И. Жилин Т. А., Стрелкова, А. П. Лытюга, и Т. В. Бутрым, «Особенности математического описания процессов ослабления оптического излучения», *Радиотехника : Всеукр. Межвед. наук.-техн. сб., Харьковский национальный университет радиоэлектроники*, Вып. 168, с. 97 – 102, 2012.
- [25] А. И. Стрелков, Е. И. Жилин, А. П. Лытюга, Т. А. Стрелкова, и Т. В. Бутрым, «Обнаружение ослабленных оптических сигналов с учетом корпускулярного характера их взаимодействия с веществом», *Системи уп-*

- равління, навігації та зв'язку : зб. наук. пр., Центральний науково-дослідний інститут навігації та управління, Вип. 3(23), с. 108 – 111, 2012.
- [26] Т. А. Стрелкова, Ю. И. Созонов, и Ю. А. Яновский, «Исследование статистики пространственно-временных сигналов в оптико-электронных системах», *Радиотехника : Всеукр. Межвед. наук.-техн. сб., Харьковский национальный университет радиоэлектроники*, Вып. 170, с. 185 – 188, 2012.
- [27] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Стохастико-детерминированный подход к обработке оптических сигналов в оптико-электронных системах», *Научно-технический журнал "Контенант"*, Том 12, № 1, с. 83 – 88, 2013.
- [28] Т. Strelkova, «Influence of Video Stream Compression on Image Microstructure in Medical Systems», *Biomedical Engineering*, vol. 47, pp. 307 – 311, 2014.
- [29] Т. А. Стрелкова, «Статистические свойства выходных сигналов оптико-телевизионных систем с ограниченным динамическим діапазоном», *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, № 2/9 (68), с. 38 – 44, 2014.
- [30] Т. А. Strelkova, «Studies on the Optical Fluxes Attenuation Process in Optical-electronic Systems», *Semiconductor physics, quantum electronics & optoelectronics (SPQEO)*, no. 4. pp. 421 – 424, 2014.
- [31] Т. А. Стрелкова, «Использование устойчивых законов распределения при оценке эффективности обработки сигналов в оптико-электронных системах», *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, № 2/9 (74), с. 4 – 9, 2015.
- [32] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Состояние и перспективы развития оптико-электронных приборов специального назначения», на 2-м Международном Радиоэлектронном Форуме «Прикладная

- радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2005), Харьков, 9-23 сент. 2005, Том 2, с. 469 – 470.*
- [33] С. А. Лисовенко, А. И. Стрелков, А. С. Калмыков, и Т. А. Стрелкова, «Сравнительный анализ методов ослабления аддитивных шумов в оптико-электронных системах», на *VIII Міжнар. наук.-практ. конф. "Людина і космос". Ракетно-космічна техніка*, Дніпропетровськ, 13-14 квіт. 2006, с.135.
- [34] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, Е. И. Жилин, и Т. А. Стрелкова, «Корреляционная обработка сигналов в астрономических телевизионных оптико-электронных системах», на *Международной конф., "Расширение сотрудничества в наземных астрономических исследованиях государств юго-восточной Европы. Изучение объектов околоземного пространства и малых тел солнечной системы"*, Николаев, 2006, с. 100 – 102.
- [35] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Особенности обнаружения оптических сигналов от космических объектов в астрономических телевизионных системах в сумеречное и дневное время», на *Міжнар. наук. конф., „Сучасні проблеми астрономії”*, Одеса, 12-18 серп., 2007, с. 34.
- [36] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Имитационное моделирование обнаружения низкоорбитальных космических объектов в сумеречных и дневных условиях астрономическими телевизионными системами», на *Седьмая Украинская конференция по космическим исследованиям НЦУИКС*, Евпатория, 3-8 сент., 2007, с. 203.
- [37] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Обнаружение оптических сигналов от низкоорбитальных космических объектов астрономическими телевизионными системами в условиях сильных аддитивных и мультипликативных помех», на *3-м Международном радиоэлектронном форуме. «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2008*, Том I. «Современные и перспективные

- системы радиолокации, радиоастрономии и спутниковой навигации», Харьков, 22-24 окт., 2008. с. 160 – 161.
- [38] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, Е. И. Жилин, и Т. А. Стрелкова, «Возможности обнаружения объектов оптико-электронными системами в условиях сильных аддитивных и мультипликативных помех», in *VI International Conference on Optoelectronic Information Technologies “Photonics-ODS 2008”*, Vinnytsia, VNTU, 30 Sept. – 2 Oct., 2008, pp. 22.
- [39] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, Ю. А. Яновский, и Т. А. Стрелкова, «Исследование качества изображений при передаче в телемедицинских информационных сетях», на *8-ї Міжнар. міждисциплінарної наук.-практ. конф. Сучасні проблеми науки та освіти, Українська Асоціація „Жінки в науці та освіті”*, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Алушта 30 квіт. -10 трав., 2009, с. 97 – 98.
- [40] Т. А. Стрелкова, и И. А. Пащенко, «Стандарты для передачи радиологических изображений в телемедицинских сетях», на *II-ой Международ. науч.-практ. конф., «Качество технологий – качество жизни»*, Судак 15-19 сент. 2010, с. 99 – 100.
- [41] Т. А. Стрелкова, и А. С. Калмыков, «Оптико-электронная система для изучения собственного оптического излучения живых систем», на *II-ой Международ. науч.-практ. конф. «Качество технологий – качество жизни»*, Судак 15-19 сент. 2010, с. 113.
- [42] Т. А. Strelkova, V. A. Timanyuk, E. A. Romodanova, and A. P. Lytyuga, «Effects of coherent and incoherent optical radiation on pathologically functioning spermatozoa», in *International Congress “Photodiagnosis and Photodynamic therapy” Official Journal of the European Platform for Photodynamic Medicine*, Helsinki, Finland , 24 – 29 Aug. 2012, № 17, P. S 6.
- [43] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга., и Т. А. Стрелкова, «Перспективы развития оптико-электронных систем специального назначения с использованием методов стохастико-детерминированной обработки оптических

- сигналов», на *Междунар. науч.-практ. конф., «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем»*, Москва, 28-30 март., 2013, с. 50 – 53.
- [44] Т. А. Стрелкова, и В. А. Сауткин, «Стохастический подход к оценке качества оптического стекла», на *науч.-практ. конф. «Технологии обработки оптических элементов и нанесения вакуумных покрытий»*, Минск, 26-27 сент., 2013. с. 85 – 86.
- [45] Т. А. Стрелкова, В. А. Сауткин, «Стохастический подход к оценке качества оптического стекла. Проблемные вопросы», на *Междунар. историко-научном симпозиуме «История оптики и современность»*, Санкт-Петербург, 28-30 окт., 2013, с. 58 – 59.