

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**МИКИТЕНКО ВОЛОДИМИР ІВАНОВИЧ**

УДК 621.384.3

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ОПТИКО-  
ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ З КОМПЛЕКСУВАННЯМ  
ЗОБРАЖЕНЬ**

Спеціальність 05.11.07 – оптичні прилади та системи

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ - 2020

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі оптичних та оптико-електронних приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор  
**Колобродов Валентин Георгійович**,  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
завідувач кафедри оптичних та оптико-електронних приладів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Яценко Ірина В'ячеславівна**,  
Черкаський державний технологічний університет,  
професор кафедри електротехнічних систем

доктор технічних наук, професор  
**Маслов Володимир Петрович**,  
Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова  
НАН України,  
завідувач відділу фізико-технологічних основ  
сенсорного матеріалознавства

доктор технічних наук, доцент  
**Стрілкова Тетяна Олександрівна**,  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
професор кафедри мікроелектроніки, електронних  
приладів та пристроїв

Захист дисертації відбудеться «03» березня 2020 р. о 14<sup>30</sup> на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.18 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр.-т. Перемоги, 37, корп. №1, ауд.293.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розіслано «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Н. І. Бурау

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Порівняно з радіолокаційними системами оптико-електронні системи спостереження (ОЕСС) забезпечують суттєво більшу точність визначення параметрів об'єктів, завадостійкість, скритність при менших габаритах. Тому дистанційні спостереження в оптичному діапазоні спектру набули величезної популярності в світі. Галузі використання ОЕСС охоплюють великий діапазон життєдіяльності людини – від сільського господарства і медицини до військових і космічних спостережень. При цьому споживчий ринок вимагає постійного підвищення ефективності функціонування апаратури. Зазвичай до складу переносних або бортових ОЕСС входять кілька спектральних каналів видимого та інфрачервоного (ІЧ) діапазону спектру. Завдяки поєднанню (комплексуванню) інформації різних каналів можна значно покращувати якість інформації про стан фоно-цільової обстановки (ФЦО). Методи комплексування спектральних та панхроматичного зображень найбільш широко використовуються при дистанційному зондуванні Землі з космосу. Останніми роками унікальні і дорогі технічні рішення, які були характерними для космічних ОЕСС, почали адаптуватись для інших галузей техніки – насамперед – авіаційних і наземних спостережень в військових задачах і для екологічного моніторингу. Цей процес розширюється і потребує вирішення багатьох наукових і технологічних проблем. При цьому на тлі підвищення вимог до технічних характеристик апаратури першочерговими стали питання економічної ефективності технічних рішень, обґрунтованості фінансових витрат на проектування, виготовлення та експлуатацію апаратури.

Практика сьогодення і аналіз найближчих перспектив розвитку галузі показали, що для забезпечення достатньої ефективності функціонування ОЕСС в більшості випадків достатньо мати два інформаційні канали – телевізійний (ТВ) і тепловізійний (ТПВ). Іноді доцільно замінити ТВ канал на суто оптичний пристрій, або забезпечити можливість роботи ТВ каналу за умов низького рівня освітлення, або розділити робочий видимий діапазон спектру на кілька піддіапазонів. Також в залежності від поточної задачі спостереження часто в ОЕСС передбачають можливість зміни поля зору. Споживачем інформації, яка формується ОЕСС, є людина-оператор, що потребує першочергового врахування і фактично впливає на всю ідеологію побудови інформаційної системи. В будь-якому випадку обов'язковою передумовою створення ефективної в споживчому і в технічному плані ОЕСС є узгодження інформаційних каналів між собою, із джерелами та споживачем інформації з врахуванням поточної задачі спостереження. Таке узгодження проводиться на апаратному та програмному рівнях. Отже підвищення ефективності функціонування ОЕСС передбачає об'єднання зусиль фахівців різних галузей – розробників основних блоків ТВ і ТПВ каналів, спеціалістів з обробки зображень, психофізіологів. Наявність кількох інформаційних каналів і людини-спостерігача в процесі спостережень потребують адекватного механізму визначення загальної ефективності функціонування ОЕСС. Для ТВ і ТПВ каналів, візуального сприйняття зображень розроблені десятки оцінок ефективності. Також існують багато методів оцінки якості комплексування зображень, але вони, на відміну від означених вище, не враховують в повній мірі фізичні процеси перетворення інформації при дистанційних спостереженнях. Як споживчі оцінки ефективності ОЕСС доцільно використовувати ймовірності виявлення та

розпізнавання об'єктів. Для дистанційних спостережень характеристикою ефективності можуть бути відстані виявлення та розпізнавання при заданих ймовірностях; для прицільних систем основною характеристикою є точність.

В світі існують декілька провідних розробників та виробників ІЧ приймачів випромінювання та ТПВ систем: Raytheon Commercial Infrared, Raytek (Fluke Corp.), Flir Systems Inc. (США), NEC Avio Infrared Technologies Co. (Японія), IRISYS (Великобританія), Sofradir Group (Франція). Вони орієнтовані на створення здебільшого універсальних технічних рішень і тільки невеликої кількості спеціалізованих, наприклад, для медицини, мікроелектроніки, будівництва. Ґрунтовно опрацьовано теорію проектування ОЕСС різних спектральних діапазонів (Hudson R., Hadni F., Jamieson J., Lloyd J., Holst G.C., Мирошников М.М., Якушенков Ю.Г., Порфирьев Л.Ф., Колобродов В.Г., Лихоліт М.І. та ін.). Багато років плідно працює вітчизняна наукова школа розрахунків ТПВ апаратури, започаткована професором Колобродовим В.Г. Також великий обсяг досліджень виконано в галузі комплексування зображень (image fusion) в ОЕСС та психофізіології зорового сприйняття. Здійснюються спроби підвищення ефективності функціонування ОЕСС за рахунок застосування єдиного підходу до проектування всіх ланок інформаційного комплексу моніторингу оточуючого середовища при виконанні конкретних завдань, які достатньо просто формалізуються (наприклад, в автоматизованих комплексах керування автомобілем - компанія BMW Group, Німеччина).

Однак, надзвичайно широке коло питань, які потребують вирішення при створенні багатоканальних ОЕСС з комплексуванням інформації, обумовлює помітну неузгодженість в мотивації і підходах до їх вирішення фахівцями різних галузей. Досі немає єдиної технології проектування ОЕСС, яка б дозволяла наскрізно аналізувати та синтезувати всю інформаційну систему, формувати технічні вимоги до окремих блоків спектральних каналів і алгоритмів комплексування зображень в них виходячи з контексту виконуваної спостерігачем поточної задачі і виду ФЦО. Невирішеною залишаються низка проблем, пов'язаних із підвищенням ефективності ОЕСС шляхом формування в полі зору оператора зображення, зміст якого найкращим чином забезпечує вирішення поточної задачі спостереження.

Виходячи з викладеного, можна констатувати, що дослідження, які спрямовані на підвищення ефективності функціонування ОЕСС з комплексуванням зображень, вирішують актуальну проблему, яка має наукове та практичне значення.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота є результатом науково-дослідних робіт, які виконано в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за участю автора як відповідального виконавця згідно з:

- тематикою державних науково-дослідних робіт: «Теоретичне обґрунтування та дослідження оптико-електронних систем спостереження» (ДР № 0105U000928); «Розробка методів обробки сигналів інфрачервоних датчиків для покращення виявлення цілей оптико-електронними системами спостереження» (ДР №0110U002422); «Розробка комплексу багатоспектрального моніторингу навколишнього середовища для запобігання аваріям, надзвичайним ситуаціям і ліквідації їх наслідків» (ДР №0112U001489); «Теоретичне обґрунтування принципів створення багатоканальних оптико-електронних систем» (ДР №0103U000294); «Методи підвищення якості зображень в матричних іконічних оптико-електронних системах» (ДР

№0106U002188); «Розробка теоретичних основ проектування тепловізорів різного призначення» (ДР №0100U002035); «Розробка концепції побудови сучасних оптико-електронних систем наведення» (ДР №0102U000582); «Покращення функціонально-тактичних характеристик наземних оптико-електронних систем спостереження і наведення» (ДР №0108U000502);

- тематикою госпдоговірних робіт: «Критерії якості зображення в космічних сканерах високого розділення» (ДР №0107U009732); «Розробка методик розрахунку просторового і енергетичного розділення ІЧ камери космічного базування з мікроболометричною матрицею» (ДР №0113U007673); «Аванпроект зі створення сканера надвисокої роздільної здатності. Складова частина: розробка матеріалів у частині когерентного цифрового оптико-електронного процесора (ЦОЕП) для обробки космічних знімків»; «Розробка алгоритмів обробки сигналів ІЧ датчика та виявлення цілей» (шифр «Селена-Ц»); «Тепловізійні системи спостереження» (ДР №0114U006375).

**Мета та задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є вирішення наукової проблеми підвищення ефективності оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням зображень шляхом створення на єдиних методологічних засадах наукових основ і прикладних методів аналізу, проектування та узгодження інформаційних каналів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні задачі:

1. На основі порівняльного аналізу сучасного стану ОЕСС з комплексуванням зображень обґрунтувати науковий підхід до вирішення проблеми підвищення ефективності їх функціонування.

2. Розвинути теорію та методи описання процесів перетворення видимого та інфрачервоного випромінювання від ФЦО до ОЕСС з подальшим сприйняттям комплексованого зображення спостерігачем для його інтерпретації.

3. Дослідити методи оцінки ефективності функціонування інформаційної системи «ФЦО - ОЕСС - оператор» та оцінки якості комплексування зображень. Запропонувати метод оцінювання ефективності ОЕСС з комплексуванням зображень.

4. Розробити методи узгодження спектральних каналів ОЕСС для забезпечення максимальних ймовірностей виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єктів виходячи із запропонованого механізму оцінювання ефективності системи «ФЦО - ОЕСС - оператор».

5. Розробити адаптивний метод комплексування зображень в багатоканальних ОЕСС, який забезпечує найбільшу ефективність виконання поточної задачі спостереження за наявного стану ФЦО.

6. Удосконалити методи експериментального вимірювання основних характеристик спектральних каналів ОЕСС.

7. Експериментально дослідити дієвість запропонованих технічних рішень на макеті двоканальної ОЕСС з послідовним та паралельним способами комплексування зображень.

*Об'єктом дослідження* є процес формування, перетворення та інтерпретації інформації при спостереженнях в видимому та інфрачервоному діапазонах спектру за допомогою ОЕСС.

*Предметом дослідження* є методи підвищення ефективності функціонування ОЕСС.

**Методи дослідження** базуються на системному підході та включають теоретичну і експериментальну складові. В теоретичних дослідженнях використано математичні основи теорій лінійних систем і оптично-електронних приладів, методи статистичного аналізу і обробки експериментальних даних. Експериментальні дослідження виконувались з допомогою ТВ та ТПВ обладнання, а також комп'ютерної техніки в лабораторних і польових умовах. При комп'ютерному моделюванні використовувалися розрахункові пакети MathCad і Matlab.

**Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Запропоновано та науково обґрунтовано новий методологічний підхід до підвищення ефективності функціонування ОЕСС з комплексуванням зображень, який включає методи конструктивного узгодження характеристик основних блоків ОЕСС та механізм адаптивного вибору найкращого методу злиття зображень спектральних каналів для забезпечення найбільш якісного виконання поточної задачі спостереження оператором.

2. Уточнено математичну модель опису формування й перетворення інформації в телевізійному та тепловізійному каналах ОЕСС шляхом врахування впливу кутів нахилу візирної вісі на просторове та енергетичне розділення, що дозволяє більш точно виконувати задачі аналізу та оптимізації ОЕСС дистанційного зондування.

3. Вперше розроблено метод оцінки ефективності функціонування ОЕСС з комплексуванням інформації, який поєднує узагальнені споживчі характеристики ОЕСС - ймовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта - з показником візуальної якості комплексованого зображення.

4. Вперше запропоновано метод узгодження параметрів оптичних систем спектральних каналів двоканальних ОЕСС з використанням показника успішності виконання завдання, який забезпечує найбільшу ймовірність виконання поточної задачі спостереження.

5. Вперше розроблено єдиний механізм оцінювання якості зображень для вибору головного спектрального каналу й найбільш ефективного методу злиття зображень, який полягає у двоступеневому визначенні показника успішності виконання завдання перед і після комплексування зображень та дозволяє автоматично забезпечити максимальну ймовірність виявлення, розпізнавання, ідентифікації об'єктів в ОЕСС з комплексуванням зображень.

6. Запропоновано новий метод формування поля змінної яскравості дифузними випромінювачами, в якому шляхом усунення впливу він'єтуючої діафрагми на ефективну площу відбиваючої поверхні оптично-спряжених інтегруючих сфер розширено функціональність за рахунок одночасного вимірювання зонної характеристики та функції передачі сигналу ОЕСС.

**Практичне значення отриманих результатів.**

Отримані в дисертаційній роботі результати є науковою основою для створення високоефективних багатоканальних ОЕСС. Практичне значення результатів роботи полягає в наступному:

1. Розроблено технологію проектування багатоканальних ОЕСС, яка передбачає узгодження основних блоків інформаційних каналів між собою з врахуванням особливостей ФЦО та зорового сприйняття кінцевого зображення людиною-оператором.

2. Запропоновано методи габаритного та енергетичного розрахунку й узгодження параметрів вхідних оптичних блоків багатоспектральних ОЕСС на основі більш точних моделей перетворень сигналів в інформаційній системі, які дозволяють визначити основні характеристики об'єктів й приймачів випромінювання для отримання заданої ефективності спостереження.

3. Розроблено метод апостеріорного оцінювання якості злиття зображень в ОЕСС з ТВ та ТПВ каналами на базі показника успішності виконання завдання, який забезпечує найбільше значення ймовірності виявлення, розпізнавання й ідентифікації об'єкта в поточних умовах спостереження.

4. Запропоновано конструктивні рішення та розрахункові формули щодо комплексування візирного та прицільного каналів стрілецьких коліматорних та телескопічних прицілів в моноблочному виконанні, що значно підвищує надійність приладів і забезпечує граничну паралактичну похибку (0,7 – 4,8) мрад при використанні сферичних оптичних поверхонь.

5. Запропоновані засоби вимірювання енергетичних характеристик спектральних каналів ОЕСС (на які отримано патент на винахід №78609, МПК G01J1/10) забезпечують збільшений до 2,5 разів діапазон зміни поля яскравості та дозволяють створити вітчизняні вимірювальні лабораторії у цій високотехнологічній галузі.

6. Розроблено спосіб комплексування в двоканальних іконічних системах (отримано патент на корисну модель №82581, МПК G06T 5/50), що дозволяє збільшити ймовірність виявлення об'єктів до 12%.

Подані в дисертації результати відображені в публікаціях автора в повному обсязі, впроваджені і використовуються при проектуванні, теоретичному та експериментальному визначенні основних характеристик сучасних ОЕСС різного призначення. Результати роботи знайшли практичне використання та впровадження (підтверджено відповідними актами) в розробках ОЕСС різного призначення в КП СІБ «Арсенал», НДІ «Квант», ЦНДІ озброєння та військової техніки збройних сил України. Також результати досліджень викладаються в рамках лекцій та лабораторних робіт навчальних курсів «Космічні та авіаційні оптико-електронні прилади», «Проектування інфрачервоних сенсорів» при підготовці фахівців за спеціальностями 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційна робота є узагальненням результатів майже тридцятирічних досліджень автора. Всі результати дисертації, які виносяться на захист, отримані автором особисто. Основний зміст дисертаційної роботи та її результати відображено в опублікованих працях автора. В опублікованих у співавторстві наукових працях внесок автора є наступним: [1] – розроблено математичну модель двоканальної ОЕСС у складі ТВ та ТПВ каналів та досліджено ефективність різних способів комплексування інформації в ОЕСС; [2, 17] - проведено аналіз сучасного стану багатоканальних ОЕСС з комплексуванням інформації, виділено першочергові проблеми галузі та визначено можливі напрями їх вирішення; [3] – досліджено переваги й недоліки схемотехнічних рішень одержання авіакосмічних гіперспектральних зображень; [4, 11, 13] – запропоновано показник якості, проаналізовано типові оптичні схеми коліматорних прицілів, обґрунтовано перевагу

моноблочної конструкції та запропоновано принциповий підхід до конструктивного втілення; [5, 6, 8] – обґрунтовано шляхи підвищення точності моноблочних прицілів; [7] – теоретично й експериментально обґрунтовано метод отримання поля змінної яскравості в вимірювальному стенді; [9, 53] – розроблено метод синтезу та запропоновано варіанти конструкції моноблочного телескопічного прицілу на базі телескопічної лінзи; [10] – визначені параметри руху об'єкта в полі зору оператора при спостереженні з допомогою ОЕСС; [12] – запропоновано механізм врахування особливостей зорового сприйняття при визначенні ймовірності попадання в ціль; [14, 28, 50, 51, 53, 54] – запропоновано варіанти конструктивних рішень лабораторних стендів, обґрунтовано методи визначення та параметри елементної бази для вимірювання функції передачі сигналу, спектральної та зонних характеристик ОЕСС; [16, 36, 58] – запропоновано спрощену модель розрахунку формування оптичного випромінювання в видимому та ІЧ діапазонах для аналізу та синтезу ОЕСС з комплексуванням інформації; [18, 26, 45, 46] – визначено схемотехнічні тенденції в побудові перспективних ОЕСС космічного призначення, досліджено та обґрунтовано шляхи конструктивного вдосконалення бортових ОЕСС; [20, 21, 23] – виконано розрахункові та експериментальні дослідження точності суміщення ТВ і ТПВ матричних приймачів випромінювання при лабораторних та дистанційних спостереженнях; [22] – проведено теоретичне моделювання та експериментальне дослідження дистанційних спостережень в тумані та в умовах задимленості; [24] – виконано оцінку потенційної точності прицілювання в малогабаритних прицілах з голографічними оптичними елементами; [25, 63] – запропоновано метод підвищення точності реєстрації зображень перед їх комплексуванням із застосуванням алгоритмів неконтрольованого мікросканування; [27, 61] – запропоновано використання ТПВ каналу як допоміжного для діагностики порушень кровопостачання тканин біологічних об'єктів та розроблено лабораторний макет каналу; [29] – запропоновано спосіб модернізації авіаційного стрілецького прицілу за рахунок комплексування інформаційних каналів; [30, 38, 48] – розроблено стратегію комплексування інформації в двоканальних ОЕСС з використанням карти інформативності; [31] – запропоновано метод узгодження діаметрів вхідних зіниць ТВ і ТПВ каналів на основі показника успішності виконання задачі; [32] – запропоновано спосіб просторової фільтрації сигналу ФЦО з використанням попередньо визначеної дальності виявлення об'єкта; [33] – виготовлено макет двоканальної ОЕСС, з допомогою якої отримано серію зображень й проведено суб'єктивну експертизу їх якості; [34] – запропоновано метод визначення показника ТТР для багатоканальних ОЕСС з комплексуванням зображень; [35, 43] – досліджено мінімальну роздільну різницю температур тепловізора Thermal Eye TSC і відмінність між реальною пропускну здатністю ТПВ каналу з урахуванням зорового сприйняття і ефективною шумовою смугою стандартного еталонного фільтру; [37] – виконано порівняння формул для розрахунку мінімальної роздільної різниці температур для різних апроксимацій модуляційної передавальної функції зорової системи спостерігача; [39] – сформульовано задачу й вихідні дані попереднього фільтрування зображень в ОЕСС з комплексуванням; [40] – запропонована спрощена модель розрахунку енергетичного розділення ОЕСС космічного базування



видимого діапазону спектра; [41, 42] – проаналізовано вплив оптичного когерентного процесора на спектр зображень при їх обробці в ОЕСС з матричними приймачами випромінювання; [44] – проведено дослідження зміни модуляційної передавальної функції ОЕСС космічного базування в залежності від кута візування; [57] – запропоновано для підвищення просторового розділення в ТВ каналах ОЕСС використання методу неконтрольованого мікросканування для відновлення зображень, спотворених вібраціями.

Автор висловлює щирю вдячність науковому консультанту Колобродову В.Г. та всім тим, хто сприяв виконанню дисертаційної роботи і впровадженню її результатів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та окремі наукові результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на 27 наукових конференціях: Міжнародній науково-технічній конференції «Приладобудування: стан і перспективи» (м.Київ, 2002 - 2019 pp.), XXVII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми електроніки» (м.Київ, 2007 p.), Першій Всеукраїнській конференції «Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки» (Київ, 2008 p.), 11-th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science SPO 2010 (Kyiv, 2010), 10 Міжнародній науково-практичній конференції «Динаміката на сьвременната наука» (м.Софія, 2014 p.), III Українській науково-технічній конференції «Спеціальне приладобудування: стан і перспективи» (м.Київ, 2018 p.), науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування» (м.Київ, 2017, 2018 pp.), Twelfth International Conference on Correlation Optics (Chernivtzi, 2015), 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) (Kyiv, 2019).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 79 наукових праць, у тому числі 2 монографії, 40 статей у наукових фахових виданнях (з них 2 статті у виданнях іноземних держав, 26 статей у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 1 патент на винахід, 1 патент на корисну модель, 35 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 389 сторінок, з обсягом основного тексту 315 сторінок. Дисертація містить 85 рисунки, 27 таблиць, список використаних джерел з 272 найменувань на 30 сторінках і 2 додатки на 21 сторінці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* приводиться короткий аналітичний огляд сучасного стану проблеми підвищення ефективності функціонування ОЕСС, обґрунтовується актуальність теми дисертаційної роботи, формулюється її мета та основні задачі дослідження, відзначається новизна одержаних результатів, їх наукове і практичне значення. Характеризується зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наведено дані про публікації та апробацію результатів роботи.

У *першому розділі* приведено загальний огляд галузей використання ОЕСС, в яких є або можливе комплексування інформації в каналах. Означено коло задач, де послідовне або паралельне об'єднання інформації є доцільним. Розглянуті алгоритми комплексування інформації, отриманої з різних джерел – як оптичних/оптико-

електронних, так і неоптичних. В будь-якому випадку базовою функцією ОЕСС є відображення значимих (релевантних) ознак в зображенні в залежності від поточної задачі спостереження. Показано, що в роботах по дослідженню комплексування зображень (image fusion) в основному розглядається математичний аспект проблеми, а питання впливу технічних характеристик конкретних блоків ОЕСС на процес перетворення інформації винесено за рамки розгляду.

Проаналізовано основні чинники, які впливають на комплексування: поточна задача спостереження, ФЦО і умови роботи, формати подання інформації, що визначаються конкретними типами датчиків. Розглянуто послідовне комплексування в ОЕСС з одним інформаційним каналом та паралельне комплексування в багатоканальних ОЕСС. В першому випадку основною метою обробки інформації найчастіше є підвищення просторової роздільної здатності та зменшення впливу вібрацій на зображення в ОЕСС. В другому випадку задачі комплексування залежать насамперед від призначення ОЕСС. Для оглядових ОЕСС першочерговим є відображення результуючого зображення їх у найбільш сприятливій для зорового сприйняття формі, яка дозволяє з найбільшою ймовірністю виявити, розпізнати та ідентифікувати об'єкт. Для коліматорних та телескопічних прицілів стрілецької зброї, в яких суміщаються оптичний візирний і оптико-електронний прицільний канали, ефективність комплексування визначається насамперед габаритами системи і точністю прицілювання.

Розглянуто програмні й апаратні засоби об'єднання зображень. За рівнем комплексування розділяють пристрої комплексування на рівні пікселів (датчиків), на рівні релевантних ознак (узагальнених параметрів), на рівні прийняття рішень. Наразі найрозвиненішим є перший рівень комплексування. Основним недоліком існуючих засобів комплексування є те, що алгоритми об'єднання зображень і оцінки якості результату не враховують принципів формування поточної релевантної інформації, а також особливостей зорового сприйняття і контексту поточної задачі спостереження. Тому використання цих засобів призводить до погано прогнозованих результатів, які можуть навіть погіршити ефективність спостережень. В той же час в відомих моделях одноканальних ОЕСС перераховані фактори досить детально аналізуються і успішно враховуються. Така неузгодженість між моделями процесів фізичного перетворення і психофізіологічного аналізу візуальної інформації з одного боку і засобами комплексування з другого боку призвела до незначного практичного використання комплексування зображень в ОЕСС окрім систем космічного призначення. Тобто великий потенціал перспективної технології досі є нереалізованим.

Таким чином, виконані дослідження показали, що розвиток теорії оптико-електронних систем в напрямку включення методів комплексування зображень в моделі проектування і оптимізації ОЕСС, є актуальним і важлива науково-технічна проблема підвищення ефективності дистанційних спостережень в багатоканальних ОЕСС потребує свого вирішення. Ключовими питаннями в цьому мають стати створення математичної моделі системи «ФЦО – ОЕСС з комплексуванням – оператор», методів узгодження основних блоків ОЕСС, механізму адаптивного вибору найкращого способу злиття зображень в контексті поточної задачі спостереження, розрахункові й експериментальні засоби оцінювання ефективності роботи спектральних каналів й усієї ОЕСС.

**Другий розділ** присвячено уточненню математичної моделі перетворення інформації при спостереженнях з допомогою ОЕСС і створенню розрахункового інструментарію для проектування вхідних блоків спектральних каналів та ОЕСС з комплексуванням в цілому. Математична модель системи «ФЦО – ОЕСС – оператор» вважається лінійно-інваріантною в діапазоні зміни інформаційних сигналів.

Традиційно модель розділено на блоки (рис.1): ФЦО, траса розповсюдження випромінювання, ОЕСС, спостерігач. На виході системи формується рішення відповідно до поточної задачі спостереження. Обов'язковими складовими моделі є умови і поточна задача спостереження. З огляду на широкий спектральний діапазон роботи ОЕСС розглядаються як активні об'єкти (АО), що випромінюють самостійно, так і пасивні об'єкти (ПО), які відбивають зовнішнє випромінювання. Перші є характерними, перш за все, для ТПВ каналів спостереження, а другі – для ТВ каналів. Якщо розглядати формування сигналу в спектральних піддіапазонах інтегрально, то основні його характеристики залежать від просторового розподілу енергії в полі зору ОЕСС. В моделі досліджується частотна залежність глибини модуляції сигналу в оптичній та електричній формах в кожному інформаційному каналі.

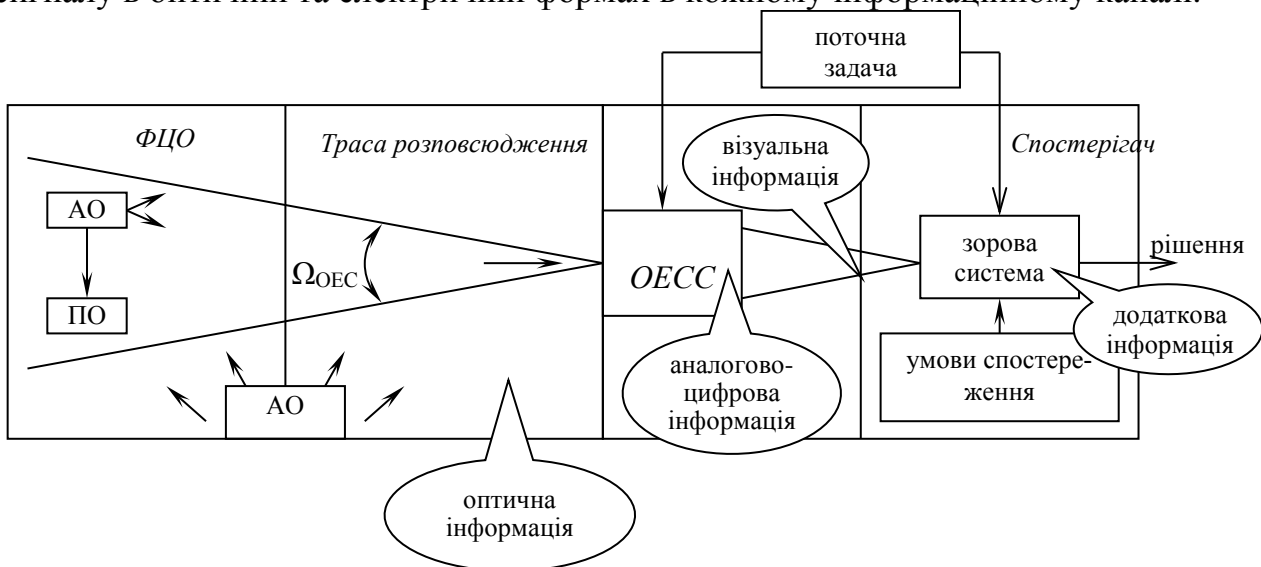


Рис. 1. Узагальнена структура моделі інформаційної системи

Відповідно кожен елемент інформаційної системи описується модуляційною передавальною функцією (МПФ) та енергетичними рівняннями випромінювання/перетворення сигналів. МПФ всієї інформаційної системи, згідно теорії лінійних систем, визначається добутком МПФ її окремих елементів

$$M_{sys}(v_x, v_y) = M_A(v_x, v_y) M_O(v_x, v_y) M_D(v_x, v_y) M_M(v_x, v_y) M_E(v_x, v_y), \quad (1)$$

де  $M_A$ ,  $M_O$ ,  $M_D$ ,  $M_M$ ,  $M_E$  – МПФ атмосфери, оптичної системи (ОС), ПВ, монітора, зорового апарату спостерігача відповідно.

Енергія корисної складової сигналу визначається радіаційними контрастами в ІЧ діапазоні спектру та різницею коефіцієнтів відбиття поверхонь об'єкта і фону в видимому діапазоні. Отже формула (1) є загальною для будь-якого інформаційного каналу, а відмінності у моделюванні викликані саме енергетичними коефіцієнтами. Для ТВ та ТПВ каналів було визначено діапазони вхідних сигналів. Окремо розглядались умови функціонування вдень та вночі. Денні спостереження досліджувались

в умовах прямого сонячного освітлення або за наявності хмар; в ІЧ діапазоні розглядалось випромінювання на довжині хвилі  $\lambda=11$  мкм. Результати обрахунків показують суттєву відмінність формування сигналів у спектральних каналах: в ТВ каналі за різних зовнішніх умов сильно змінюється освітленість вхідної зіниці об'єктива ОЕСС, але вхідний контраст залишається майже постійним; в ТПВ каналі під дією радіаційного нагріву може виникати реверс контрасту, що значно змінює ФЦО. Очевидно, що такі умови вимагають зміни алгоритму комплексування зображень. Також показано, що при дистанційному зондуванні в цікавих для практики випадках контрасти ТПВ зображень перевищують контрасти в видимому діапазоні спектру. Ситуація змінюється при стаціонарних спостереженнях в лабораторних умовах. Якщо об'єктом спостереження є біологічний об'єкт (частіше – людина), то формування інформативного оптичного сигналу зазвичай відбувається під дією певного запального процесу. Запальні процеси і посилення кровотоку викликають підвищення температури, а дегенеративно-дистрофічні процеси і зниження кровотоку призводять до локального зниження температури в ураженій області.

Проходження випромінювання через атмосферу, яка зазвичай є середовищем розповсюдження сигналу, супроводжується модуляційними викривленнями та енергетичними втратами. Зменшення модуляції сигналу описується МПФ атмосфери  $M_A$  і враховується в загальній МПФ (1) системи. Для визначення енергетичних втрат в ІЧ діапазоні запропоновано використовувати пошарову модель атмосфери, згідно якої двовірний просторовий розподіл потоку на вхідній зіниці об'єктива ОЕСС залежить від спектрального коефіцієнту пропускання  $i$ -го шару атмосфери, спектральної яскравості власного і розсіяного теплового випромінювання  $i$ -го шару атмосфери. Практика дистанційних спостережень з використанням ОЕСС показує, що поглинання та розсіяння випромінювання видимого спектрального діапазону є достатньо рівномірними на трасі спостереження. Тому в видимому спектральному діапазоні, а також в будь-якому діапазоні при лабораторних спостереженнях доцільно використовувати одношарову модель атмосфери.

Фокусуєча осесиметрична ОС формує на чутливій поверхні ПВ для осьової точки спектральну енергетичну освітленість  $E'_{0\lambda}(\lambda)$

$$E'_{0\lambda}(\lambda) = \frac{\pi \cdot \tau_A(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot L_{et}(\lambda)}{4k_{eff}^2 \left(1 - \frac{\beta'}{\beta_p}\right)^2}, \frac{Вт}{см^2 \cdot мкм}, \quad (2)$$

де  $L_{et}(\lambda)$  - енергетична яскравість об'єкта;  $\tau_o(\lambda)$  – спектральний коефіцієнт пропускання ОС;  $k_{eff}^2$  - ефективне діафрагмове число ОС;  $\frac{\beta'}{\beta_p}$  - відношення коефіцієнтів збільшення та збільшення в зіницях.

В рамках математичної моделі було досліджено вплив нахилу осі візування на енергетичне та просторове розділення ОЕСС на прикладі ТВ каналу авіаційної або космічної системи. Радіометричне розділення ОЕСС визначалось пороговою різницею коефіцієнтів відбиття поверхонь об'єкта і фону  $\Delta\rho_n = \rho_t - \rho_b$ . При діаметрі вхідної зіниці  $D_p$  і фокусній відстані об'єктиву  $f'_o$  для всього робочого спектрального діапазону маємо

$$\Delta\rho_n = \frac{4H_n}{\tau_A \tau_o E_0 t_i} \left( \frac{f_o'}{D_p} \right)^2, \quad (3)$$

де  $H_n$  – експозиція, що є еквівалентною середньому квадратичному значенню шуму;  $t_i$  – час інтегрування сигналу.

Аналіз формули (3) показує, що найбільш ефективним способом покращення радіометричного розділення ОЕСС є зменшення діафрагмового числа  $F = f_o' / D_p$ , так як воно входить в формулу в квадраті.

Просторове розділення визначається МПВ ПВ, яка при прямокутній формі пікселя ПВ розміром  $V_D \times W_D$  для довільних кутів візування має вигляд

$$M_{Dv}(v_x) = \frac{\sin\left(\pi \frac{V_D v_x}{\cos \theta_{vx}}\right)}{\pi \frac{V_D v_x}{\cos \theta_{vx}}} \cdot \frac{\sin\left(\pi \frac{W_D v_y}{\cos \theta_{vy}}\right)}{\pi \frac{W_D v_y}{\cos \theta_{vy}}}, \quad (4)$$

де  $\theta_{vx}$ ,  $\theta_{vy}$  – кути відхилення оптичної осі ОЕСС від надиру;  $v_x$ ,  $v_y$  – просторові частоти.

Площа проекції пікселя ПВ на похилій поверхні визначиться як

$$\delta V \times \delta W = \frac{h_f V_D}{f_o' \cos^2 \theta_{vx}} \frac{W_D h_f}{f_o' \cos \theta_{vx}}, \quad (5)$$

де  $h_f$  – висота ОЕСС над поверхнею.

На рис. 2, а) наведено графіки залежності розміру  $\delta V \times \delta W$  елемента розділення від кута візування  $\theta_{vx}$  при фокусній відстані ОС 850 мм та висоті  $h_f = 680$  км, а на рис. 2, б) – графіки одновимірної МПФ ОЕСС в надирі та при куті візування  $\theta_{vx} = 35^\circ$  за тих же умов.

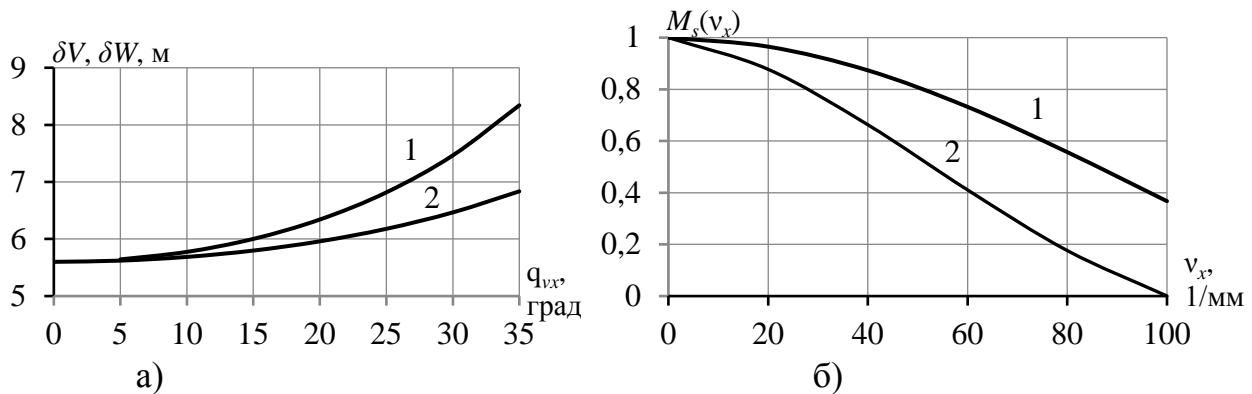


Рис. 2. Залежність розміру елемента розділення ОЕСС в площині об'єктів (а) та МПФ ОЕСС (б) при кутах візування: 1 –  $\theta_{vx} = 0^\circ$ ; 2 –  $\theta_{vx} = 35^\circ$

Видно, що на частоті Найквіста  $v_N = 1/2V_D = 71 \text{ мм}^{-1}$  контраст зображення наближено становить 61% в надирі, а при куті візування  $\theta_{vx} = 35^\circ$  – 29%, тобто якість зображення погіршується вдвічі.

Взаємозв'язок просторових та енергетичних параметрів ТПВ каналів якісно

описується мінімальною роздільною різницею температур (MPRT)  $MRTD(v_x, v_y)$ . Ця функція враховує всі основні характеристики ОЕСС, ймовірнісні характеристики зорового сприйняття, причому функціонування зорової системи визначається її МПФ  $M_E(v_x, v_y)$ . Традиційно майже 40 років поспіль для  $M_E(v_x, v_y)$  використовувалась апроксимація Дж.Ллойда. Було запропоновано для обрахунків  $MRTD(v_x, v_y)$  використовувати більш адекватну модель  $M_E$  Шульца. При заданій ймовірності зорового розпізнавання штриха тестової міри 90% отримано розрахункову формулу

$$MRTD_S(v_x) = 0,93 \cdot SNR_r \cdot NETD \frac{v_x \alpha_D^*}{M_S(v_x)} \times \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f \cdot t_o f_f t_E}}, \quad (6)$$

де  $SNR_r$  – суб'єктивно сприймане відношення сигнал/шум в зображенні міри Фуко на екрані;  $NETD$  – еквівалентна шуму різниця температур;  $\alpha_D^*$  – безрозмірна величина, що дорівнює кутовому розміру пікселя в мілірадіанах;  $\alpha_D \beta_D$  – кутові розміри пікселя ПБ;  $\Delta f$  – шумова смуга еталонного фільтру;  $t_o$  – час формування одного елемента розкладу зображення;  $f_f$  – частота кадрів;  $t_E$  – постійна часу зорової системи.

Графіки MPRT ТПВ каналу з передавальною камерою Thermal Eye TSC, побудовані на основі традиційної моделі Дж.Ллойда та на основі запропонованої моделі, наведено на рис. 3. Вони демонструють суттєву відмінність (в 2,6 рази) підрахункових значень, які збігаються між собою при  $\alpha_D^* = 0,71$ .

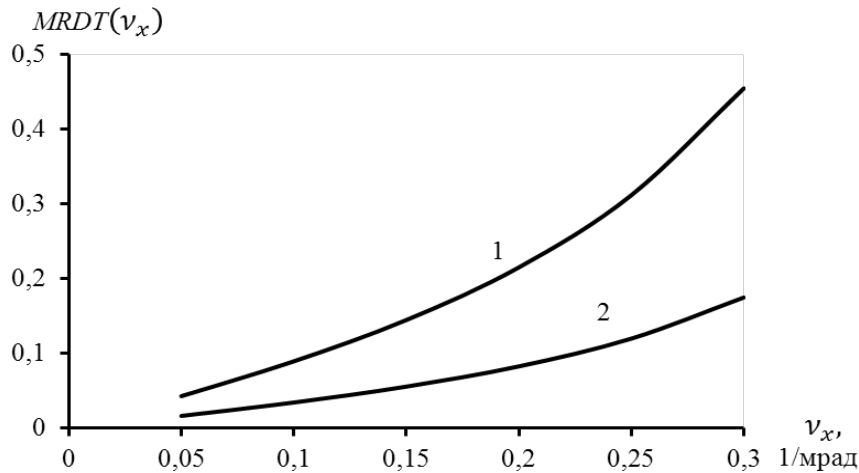


Рис. 3. MPRT ТПВ каналу з камерою Thermal Eye TSC для запропонованої моделі (1) та для традиційної моделі (2)

Обробка сигналу в приймачі випромінювання (ПВ), цифрових ланках електронного блоку, а також відображення інформації на екрані матричного монітора супроводжуються дискретизацією двовимірному сигналу. Візуальне дешифрування дискретного зображення за інших рівних умов є еквівалентним дешифруванню зображення без вибірки, але отриманого за допомогою ОЕСС, що має гірше кутове розділення, причому погіршення визначається відносною часткою псевдочастот у спектрі зображення точкового об'єкта.

Зорова діяльність оператора узагальнено описується в рамках кількох послідовних механізмів: пошуку, виявлення, розпізнавання, ідентифікації об'єкта. В моделі використовується зручна для обрахунків гіпотеза, що в зоровій системі здійснюється оптимальний прийом і подальший аналіз не всього зображення об'єкту спостереження, а окремих гармонійних складових просторового спектру цього зображення. При цьому зміст поточної задачі спостереження визначає величину відношення сигнал/шум, яку необхідно забезпечити в зображенні на екрані монітора. Модель враховує дискретизацію зображень і адитивні шуми, що розподілені за нормальним законом. Ймовірність правильного виявлення  $ij$ -ї гармоніки визначається як

$$P_d = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\eta_{ij}}^{\infty} \exp\left[-\frac{(\eta - \mu_{ij})^2}{2}\right] d\eta, \quad (7)$$

де  $\eta_{ij}$  - відношення сигнал/шум в сумарному корисному та шумовому сигналі;  $\mu_{ij}$  - відношення сигнал/шум  $ij$ -ї гармоніки

$$\mu_{ij} = \mu_{\max} \sqrt{\frac{2v_k t_E A_O}{A_n}} \left| L_t\left(\frac{i}{l_x}, \frac{j}{l_y}\right) \right| \cdot \left| M_s\left(\frac{i}{l_x}, \frac{j}{l_y}\right) \right|, \quad (8)$$

де  $\mu_{\max}$  - пікове відношення сигнал/шум;  $A_O = l_x l_y$  - площа зображення об'єкту на моніторі;  $L_t(v_x, v_y)$  - Фур'є-спектр яскравості зображення об'єкту без урахування лінійних спотворень, які вносить ОЕСС;  $A_n$  - площа кореляції адитивного шуму.

Уточнена математична модель дозволяє обчислювати сигнал в будь-якій точці ланцюга перетворень інформації як в ТВ, так і в ТПВ каналі. На основі моделі було запропоновано й досліджено критерії узгодження роздільної здатності об'єктива і ПВ, отримано формулу для розрахунку МПФ системи «об'єктив – ПВ» авіакосмічних ОЕСС при довільних кутах візування, отримано вдосконалене рівняння для розрахунку МРРТ ТПВ каналу, в основі якого лежить більш достовірна апроксимація МПФ зорової системи.

Нажаль комплексування не вписується в лінійну фізико-математичну модель. Об'єднання (злиття) зображень є нелінійним перетворенням, тому врахувати його безпосередньо в формулі (1) неможливо. Крім того, розроблення самих методів об'єднання зображень не входить до задач дисертації на відміну до задачі вибору найкращого методу комплексування для конкретного типу ФЦО і умов спостереження. Тому було запропоновано ввести в математичну модель опис процесу комплексування зображень через механізм оцінювання якості комплексування. Цьому питанню присвячено третій розділ.

**Третій розділ** присвячено розробці методу оцінювання ефективності функціонування ОЕСС з комплексуванням інформації.

Виконано дослідження методів оцінки ефективності функціонування інформаційної системи «ФЦО – ОЕСС – оператор» в цілому та її основних блоків, а також способів оцінювання якості комплексування зображень. Можна виділити три окремі групи методів оцінки ОЕСС з комплексуванням: визначення якості безпосередньо зображень (в тому числі – суб'єктивної якості), визначення ефективності роботи ТВ і ТПВ каналів ОЕСС, оцінка якості алгоритмів комплексування зображень. В деяких методах другої групи також враховуються основні особливості

зорового сприйняття людини. Враховуючи, що ці методи описуються в рамках найрозповсюдженіших математичних моделей ОЕСС, доцільно взяти їх за основу механізму оцінювання ефективності функціонування інформаційної системи «ФЦО – ОЕСС з комплексуванням – оператор».

З практичної точки зору доцільно розділити характеристики інформаційних каналів ОЕСС на просторові й енергетичні. Але просторова роздільна здатність ОЕСС в геометричній інтерпретації може використовуватись тільки для грубої попередньої оцінки можливостей системи. Для реальних розрахунків необхідним є врахування енергетичних характеристик. Були розглянуті основні енергетичні характеристики ТВ та ТПВ каналів: порогова величина спектральної освітленості  $NEI$ , еквівалентна шуму різниці температур  $NETD$ , мінімально виявлювана різниця температур МВРТ. Поєднанням просторових й енергетичних характеристик є мінімальна роздільна різниця температур МРРТ, яка є дуже інформативним параметром ТПВ каналів. На базі розробленої в другому розділі математичної моделі отримано формули для обчислення вказаних функцій.

Недоліком МРРТ є відсутність врахування передачі просторових частот ОЕСС нижче частоти перетину функції порогового контрасту (ФПК) ОЕСС з просторовим спектром вхідного зображення. Наразі на зміну стандартним розрахунковим моделям на основі МРРТ (1975NVL, FLIR92, NVTherm) прийшла більш досконала модель Night Vision Integrated Performance Model (NVIPM), що використовується армією США. В її основу покладено показник успішності виконання завдання (TTP – Targeting Task Performance metric), який в загальному випадку має вигляд

$$TTP = \left[ \int_{\nu_{x_{\min}}}^{\nu_{x_{\max}}} \int_{\nu_{y_{\min}}}^{\nu_{y_{\max}}} \frac{C_R(\nu_x, \nu_y) M_s(\nu_x, \nu_y)}{CTF_E(\nu_x, \nu_y)} d\nu_x d\nu_y \right]^{1/2}, \quad (9)$$

де  $\nu_x, \nu_y$  – горизонтальна та вертикальна просторові частоти в мрад<sup>-1</sup>;  $C_R(\nu_x, \nu_y)$  – просторово-частотний розподіл контрасту зображення об'єкту на екрані монітора;  $M_s(\nu_x, \nu_y)$  – МПФ інформаційної системи за виключенням зорової системи;  $CTF_E(\nu_x, \nu_y)$  – ФПК зорової системи. Межі інтегрування  $[\nu_{x_{\min}}, \nu_{x_{\max}}]$ ,  $[\nu_{y_{\min}}, \nu_{y_{\max}}]$  задані діапазоном частот, де ФПК не перевищує спектр сигналу.

Попередньо було розглянуто типові показники якості комплексування зображень – стандартне відхилення, інформаційний показник, оцінку анізотропії зображень, показник Петровіка тощо. Адекватність цих показників було досліджено на прикладі аналізу комплексованих різними методами (усереднення, головних компонент, піраміда Лапласа, контрастна піраміда, градієнтна піраміда, морфологічна піраміда, вейвлет-перетворення, інваріантне до зсувів вейвлет-перетворення) сутінкових зображень, отриманих двоканальною ОЕСС, та порівняно з результатами суб'єктивних експертиз. Згідно оцінок спостерігачів інваріантне до зсувів вейвлет перетворення, дискретне вейвлет перетворення та піраміда Лапласа дають зображення кращої якості в порівнянні з іншими методами. Оцінки якості результуючого комплексованого за допомогою об'єктивних показників наведено в табл. 1.



Оцінка якості результуючого зображення

Метод комплексування	Стандартне відхилення	Інформаційний показник	$Q_{AB/F}$	Анізотропія
Метод усереднення	16,3262	4,9695	0,4466	0,0041
Метод головних компонент	<b>33,4028</b>	<b>6,9161</b>	0,6639	0,0044
Піраміда Лапласа	24,7495	2,5621	0,7829	0,0150
Контрастна піраміда	27,0023	2,2142	0,2145	0,0140
Градiєнтна піраміда	18,6086	3,0349	0,7321	0,0112
Морфологічна піраміда	27,8245	3,6834	<b>0,7939</b>	<b>0,0234</b>
Піраміда ФВП	18,6043	3,0245	0,7322	0,0051
Вейвлет перетворення	21,6505	2,2105	0,7462	0,0154
Інваріантне до зсувів вейвлет перетворення	21,6919	2,3673	0,7442	0,0089

Помітною є розбіжність між оцінками якості комплексування різними показниками. Крім того, ці оцінки не враховують процесів, що відбуваються в інформаційній системі, тобто не можуть бути безпосередньо імплементовані в розрахункову математичну модель системи «ФЦО – ОЕСС з комплексуванням – оператор».

Було запропоновано для оцінювання візуальної якості комплексування застосувати показник  $TTP$ . В стандартній розрахунковій моделі NVIPM для визначення показника  $TTP$  автотранспорту, військової техніки тощо використовується стале значення функції  $C_R(v_x, v_y) = const$  (так звана DRI model). При однотипних об'єктах (наприклад, для друкованих літер) більш достовірні результати дає врахування просторового спектру об'єкта (SOM model). Ця особливість у вживанні показника  $TTP$  була використана в новому алгоритмі комплексування в ОЕСС, який докладно розглянуто в четвертому розділі та експериментально досліджено в шостому розділі. Суть алгоритму полягає в попередньому аналітичному обчисленні показника  $TTP$  з «білим» спектром зображення об'єкту ( $C_R(v_x, v_y) = const$ ) при виборі основного інформаційного каналу перед комплексуванням та в подальшому визначенні якості кінцевого комплексованого зображення по його реальному просторовому спектру чисельними методами.

Показник успішності виконання завдання  $TTP$  для ОЕСС з комплексуванням аналітично визначається по результуючому зображенню в залежності від методу злиття зображень. Для методів без багатомасштабного розкладу - по формулі (9), а для методів з перетворенням масштабу - на кожному рівні розкладу. В цьому випадку діапазон просторових частот, спільний для ТВ та ТПВ каналів ОЕСС, розбивається на піддіапазони (октави) відповідно до кількості рівнів розкладу зображень та розраховується значення показника в кожному піддіапазоні:

$$TTP = \sum_l (TTP_{1,l} \cdot R_{1,l} + TTP_{2,l} \cdot R_{2,l} + \dots + TTP_{k,l} \cdot R_{k,l}), \quad (10)$$

де  $TTP_{k,l}$  – показник успішності виконання завдання  $k$ -го зображення  $l$ -тої октави, який розраховується по реальному спектру комплексованого зображення;  $R_{k,l} = r_{k,l}^F \cdot \prod_k (1 - |r_{k,l}|)$  – коефіцієнт пропорційності;  $r_{k,l}$  – кореляція Пірсона між вхідними зображеннями;  $r_{k,l}^F$  – кореляція Пірсона між комплексованим та  $k$ -им вхідним зображенням.

Показник успішності виконання завдання  $TTP$  враховує характер передачі контрасту в середньочастотному діапазоні просторового спектру й відповідно дає можливість більш точно, ніж МРРТ розрахувати ймовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта. Крім того, запропонований метод апостеріорного оцінювання якості комплексованого зображення з використанням показника  $TTP$  дозволяє автоматизувати вибір найкращого методу злиття зображень в залежності від умов спостереження та типу ФЦО.

Розроблений метод оцінки наразі є найбільш узагальненим, оскільки дозволяє враховувати всі складові процесу утворення, перетворення і аналізу інформації. В тому числі дозволяє досить докладно проаналізувати процес комплексування. Але аналіз особливостей злиття зображень не є задачею дисертаційної роботи – важливим є можливість порівняння візуальної якості комплексованих різними способами зображень. Цю задачу на практиці доцільно вирішувати через визначення інтеграла (9) чисельним способом.

**Четвертий розділ** присвячено створенню методології узгодження параметрів блоків спектральних каналів ОЕСС між собою. Розроблені в попередніх розділах математична модель і метод об'єктивної оцінки характеристик блоків ОЕСС дозволяють оптимізувати конструктивні рішення ОЕСС для вузького класу задач. Очевидно, що найбільшої ефективності ОЕСС досягає, коли узгодженими між собою є як окремі спектральні канали, так і основні блоки в межах одного каналу. Процедура узгодження є універсальною з огляду на те, що задачами спостереження в будь-якому випадку є виявлення, розпізнавання та ідентифікація об'єктів певного класу.

Найсуттєвіший вплив на інформативність сигналу ОЕСС має вхідний блок, який складається з ОС і блоку ПВ. Оптимізація вхідного блоку одного спектрального каналу ґрунтується на знаходженні балансу енергетичних і просторових характеристик ОС і блоку ПВ при заданих умовах спостереження і типі об'єкту. При цьому не є принциповим, в якому спектральному діапазоні працює ОЕСС – зміниться тільки спосіб обрахунків енергетичної компоненти математичної моделі.

Обґрунтовано і досліджено новий метод узгодження основних параметрів вхідного блоку спектрального каналу. Він полягає у визначенні необхідних для досягнення заданого контрасту зображення величин діаметру вхідної зіниці  $D_p$ , фокусної відстані об'єктива  $f_o'$ , порогової освітленості ПВ  $E_n$  та розміру пікселя  $V_D$

$$D_p = 2f_o' \sqrt{\frac{E_n}{\tau_A \tau_o E_0 \Delta \rho_n}}, \quad \frac{D_p}{f_o'} \eta_{di} = 1,68 \frac{\lambda}{V_D}, \quad (11)$$

де  $E_0$  - інтегральна освітленість поверхні Землі;  $\tau_A$ ,  $\tau_o$  - коефіцієнти пропускання атмосфери та ОС;  $\Delta \rho_n$  - пороговий контраст коефіцієнта відбиття;  $\eta_{di}$  - параметр апроксимації МПФ об'єктива.

Вперше для узгодження характеристик ОС з блоком ПВ ТВ і ТПВ каналів було запропоновано використати показник  $TTP$ . Узгодження діаметрів вхідних зіниць двох каналів виконується шляхом максимізації показника успішності виконання завдання змінюючи радіус кружка  $E_r$  об'єктива відносно розміру пікселя МПВ. Запропонований метод дозволяє узгоджувати будь-які ТВ та ТПВ канали. Дієвість методу продемонстровано на прикладі узгодження параметрів коаксiального дзеркально-лінзового об'єктива двоканальної ОЕСС. Вхідними даними для розрахунків є кут поля зору (однаковий для ТВ та ТПВ каналу) –  $6^\circ$ ; приймач випромінювання

ТВ каналу – ПЗЗ матриця, розмір чутливого елементу  $5,5 \times 5,5$  мкм<sup>2</sup>, формат 1920×1080; МПВ ТПВ каналу – мікроболометрична матриця, розмір чутливого елементу  $35 \times 35$  мкм<sup>2</sup>, формат 384×288; збільшення системи – 8; ТПВ канал працює в діапазоні спектру (8-12) мкм. Також було прийнято, що діаметр входної зіниці ТПВ каналу не повинен перевищувати 100 мм. Показано, що величина  $TTP$  має найбільші значення: для ТПВ каналу – 10,47 і для ТВ каналу – 39,05 при співвідношенні діаметрів входних зіниць: ТПВ канал/ТВ канал 100 мм/29,3 мм. В цьому випадку діаметр кружка Ері є меншим за розміри пікселя для обох каналів.

В ОЕСС з прицільним каналом критерієм узгодження основних блоків є забезпечення заданої точності наведення лінії прицілювання. Для малогабаритних прицілів важливим є зменшення маси та розмірів приладу. Було розроблено методи узгодження оптичного каналу спостереження та оптико-електронного прицільного каналу в перспективних моноблочних коліматорних та телескопічних прицілах автоматичної і особистої стрілецької зброї. Розглянуто базовий варіант конструкції (рис. 4) моноблочного коліматорного прицілу і його модифікації.

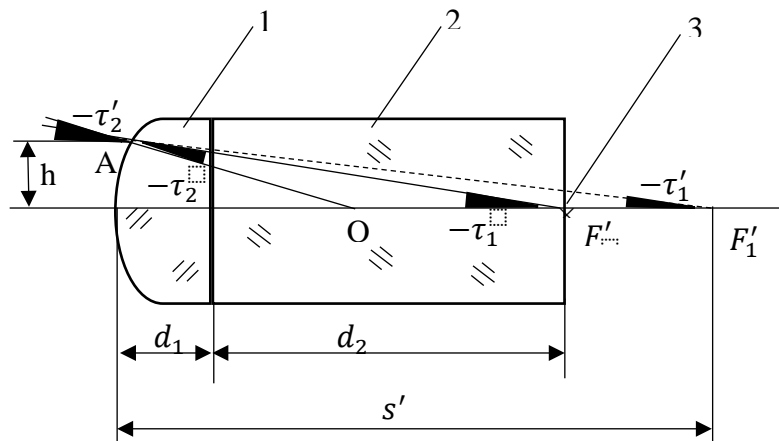


Рис. 4. Лінзовий моноблок: 1 – лінза, 2 – плоско-паралельна пластина, 3 – прицільна сітка

Показано, що введення сферичної поверхні склеювання між першим і другим елементами в 2,5 рази підвищує точність лінії прицілювання при рівних масогабаритних характеристиках прицілу. Запропоновані два варіанти моноблочних коліматорних прицілів з підвищеною точністю прицілювання. Приціл з двох оптичних деталей з різним показником заломлення, склеєних по площині, забезпечує лінійну апертуру вихідної зіниці прицілу 0,276, при неузгодженості оптичних вісей каналів 3 мрад. Моноблочний коліматорний приціл з двох оптичних деталей з різним показником заломлення, склеєних по сферичній поверхні, при такій же лінійній апертурі вихідної зіниці і масі забезпечує неузгодженість 1,25 мрад.

Будь-який телескопічний приціл містить дві функціональні частини - канал спостереження цілі і канал візування прицільної сітки. В моноблочній схемі для реалізації каналу спостереження цілі використовується телескопічна лінза. Створення каналу візування прицільної сітки для введення її колімованого зображення в поле зору має мінімально ускладнювати конструкцію і при цьому забезпечувати прийнятну точність. Розроблено розрахунковий метод створення телескопічного моноблочного прицілу на основі телескопічної лінзи (рис. 5). Він дозволяє узгоджувати діаметр, довжину моноблока та паралактичну похибку перехрестя візирної сітки не тільки для центрованих, але й для децентрованих оптичних схем.

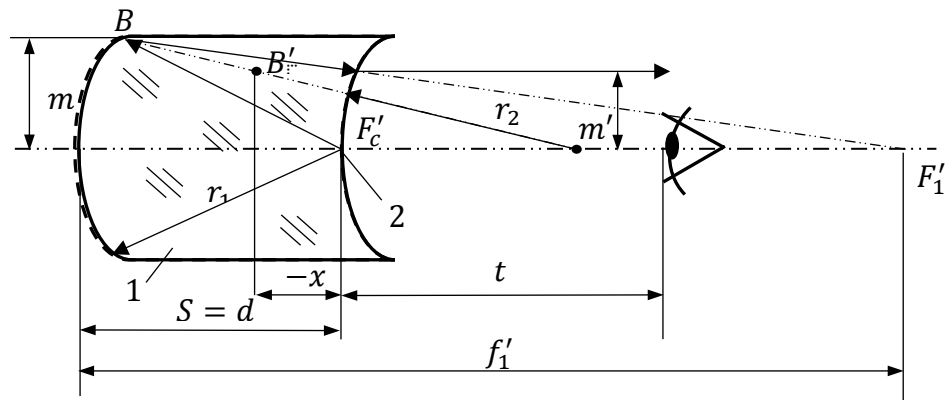


Рис. 5. Оптична схема моноблочного телескопічного прицілу: 1 – лінза, 2 – візирная сітка

Показано, що паралактична неузгодженість між лініями візування і спостереження залежить в основному від хроматизму в каналі прицільної сітки. Запропоновано схему децентрованого моноблока, в якому при неузгодженості 3 мрад збільшення може досягати 1,6 крат порівняно з 1,4 крат для вісесиметричної схеми.

**П'ятий розділ** присвячено розвитку засобів експериментального визначення основних характеристик інформаційних каналів ОЕСС, які є спільними для ТВ і ТПВ каналів, а саме функції передачі сигналу (ФПС), спектральної характеристики, відносної зонної характеристики. Зазначені характеристики (перші дві - у відносних одиницях) вимірюються попередньо на стадії метрологічної атестації каналів ОЕСС. Потім після переносу одиниці спектральної щільності енергетичної яскравості (СЩЕЯ) від еталону до метрологічних випромінюючих елементів вимірювальної установки виконується абсолютизація шкал відносної яскравості та визначаються основні параметри ОЕСС по виміряним раніше відносним характеристикам: інтегральна, зонна та абсолютна спектральна чутливість, динамічний діапазон.

Для вибору найбільш раціональної схеми вимірювального стенду було розглянуто наявну елементну базу і її метрологічні характеристики. Показано, що як джерело випромінювання, доцільно використовувати малогабаритні галогенні лампи потужністю (200 – 400) Вт з розміром тіла розжарення (2 - 5) мм і діаметром колби не більше (10 - 15) мм (для забезпечення необхідної відстані до розсіювача). Принципова схема стенду показана на рис. 7.

Обґрунтовано новий метод створення поля змінної яскравості при вимірюванні зонної характеристики та ФПС ОЕСС на базі оригінального дифузного випромінювача змінної яскравості (ДВЗЯ) з оптично пов'язаними інтегруючими сферами (технічне рішення захищено патентом на винахід №78609). Це дозволяє розміщувати ОЕСС безпосередньо у вихідній апертурі ДВЗЯ без застосування додаткової об'єднуючої оптики і забезпечує підвищення динамічного діапазону до 2,5 разів при високій однорідності поля яскравості. Основні переваги запропонованого рішення полягають в тому, що:

- одночасно опромінюються всі пікселі МПВ в усьому динамічному діапазоні вимірюваної яскравості. Тобто вимірювання ФПС і зонної характеристики проводяться одночасно при незмінній конфігурації стенду, що виключає необхідність екстраполяції результатів і істотно підвищує точність вимірювань;

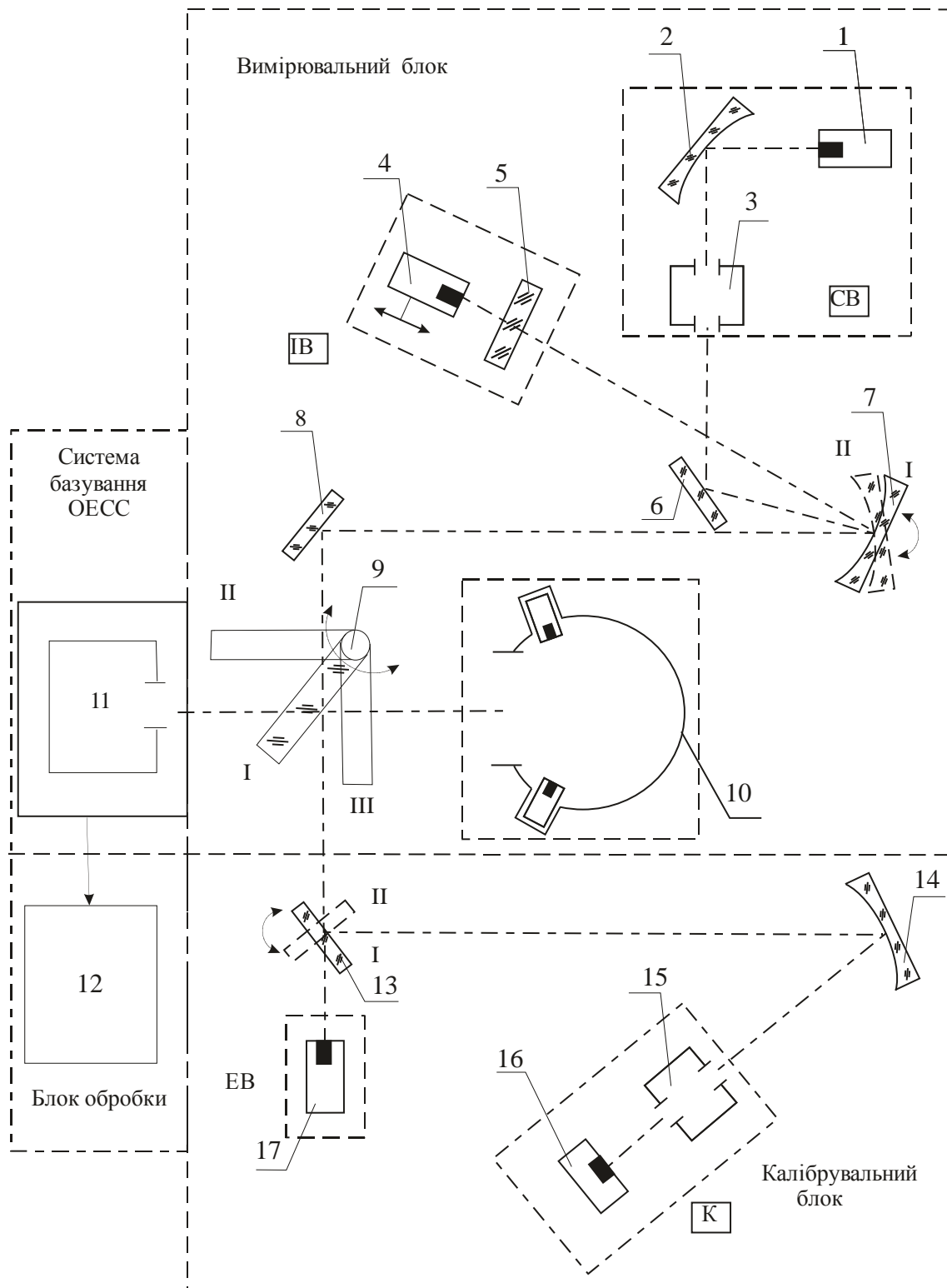


Рис. 7. Структурна схема вимірювального станду: 1, 4, 17 – джерела випромінювання; 2 – конденсор; 3, 15 – монохроматори; 5 – розсіююча площадка; 6, 8, 13 – плоскі дзеркала; 7 – об’єктив коліматора; 9 – комутуюче дзеркало; 10 – дифузний випромінювач; 11 – ОЕСС; 12 – блок обробки сигналу; 14 – фокусуючий об’єктив; 16 – ПВ; ЕВ – еталонний випромінювач; К – компаратор; ІВ – інтегральний випромінювач; СВ – спектральний випромінювач

– за рахунок використання великої кількості джерел випромінювання в первинних

сферах і значного числа калібрувальних діафрагм, розширюється діапазон відтворюваних яскравостей і підвищується точність їх стенду при незмінному спектральному складі випромінювання;

- винесення джерел випромінювання з вторинної інтегруючої сфери, яка безпосередньо формує вихідне поле яскравості, помітно покращує рівномірність розподілу яскравості в межах вихідної апертури;
- розміщення ОЕСС безпосередньо у вихідній апертурі випромінювача виключає необхідність використання додаткових об'єднуючих об'єктів;
- внаслідок того, що для калібрування випромінювача і перенесення одиниці яскравості можуть використовуватися яскравоміри, що встановлюються безпосередньо у вихідній апертурі стенду без необхідності точного позиціонування і застосування додаткової оптики істотно спрощується процедура і підвищується точність абсолютизації вимірювань.

Проведене макетування та експериментальні дослідження ДВЗЯ, підтвердили теоретичні та розрахункові положення і показали, що запропонований випромінювач забезпечує, зокрема, параметри представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Параметри експериментальної моделі ДВЗЯ

Назва параметра	Значення параметра
Діаметр первинної інтегруючої сфери, м	0,2
Кількість первинних сфер, шт	5
Кількість джерел випромінювання в одній первинній сфері, шт	7
Тип джерела випромінювання	КГМ 30-300
Діаметр вторинної інтегруючої сфери, м	1,0
Діаметр вихідної апертури, м	0,2
Спектральний діапазон (по рівню 0,1), мкм	0,35 - 2,2
Нерівномірність яскравості в вихідній апертурі, не більше, відн. од. $\cdot 10^{-2}$	0,1
Динамічний діапазон зміни яскравості не менше, відн. од.	$10^6$
Похибка установки яскравості менше, відн. од. $\cdot 10^{-2}$	0,1
Максимальна яскравість вихідної апертури не менше, Вт/ср $\cdot$ м <sup>2</sup>	850

Розроблено конструктивні принципи побудови вимірювальної установки та виконано оцінку похибок вимірювання енергетичних характеристик ОЕСС в цій установці.

**Шостий розділ** присвячено експериментальному дослідженню запропонованих методів послідовного та паралельного комплексування зображень в ОЕСС. Створено стратегію комплексування, яка враховує всі основні ланки інформаційного комплексу «ФЦО - ОЕСС - оператор» та умови його функціонування. Розглянуто питання підвищення швидкодії засобів обробки зображень в ОЕСС з комплексуванням.

Експериментальна перевірка дієвості розроблюваних методів та порівняння з існуючими аналогами виконувалась на лабораторному та польовому макетах двоканальної ОЕСС (рис. 8, 9), що має в своєму складі ТВ ( $\Delta\lambda=0,4-0,85$  мкм) та ТПВ

( $\Delta\lambda=8-14$  мкм) канали. В лабораторному макеті вхідне випромінювання ділиться на дві частини за допомогою спектроподільника. Обидві камери через ТВ тюнер підключено до комп'ютера. Технічні параметри ТПВ камери Thermal-eye: діаметр вхідної зіниці –  $D = 26$  мм; фокусна відстань лінзового об'єктива –  $f' = 16$  мм; розмір пікселя ПВ –  $v_D \times w_D = 30 \times 30$  мкм<sup>2</sup>; робочий спектральний діапазон –  $\Delta\lambda_2 = (7-14)$  мкм; формат МПВ –  $160 \times 120$ . Технічні параметри ТВ камери РІН 750А: діаметр вхідної зіниці –  $D = 22$  мм; фокусна відстань об'єктива –  $f' = 50$  мм; розмір пікселя МПВ –  $v_D \times w_D = 7 \times 7$  мкм<sup>2</sup>; робочий спектральний діапазон –  $\Delta\lambda_2 = (0,4-0,85)$  мкм.

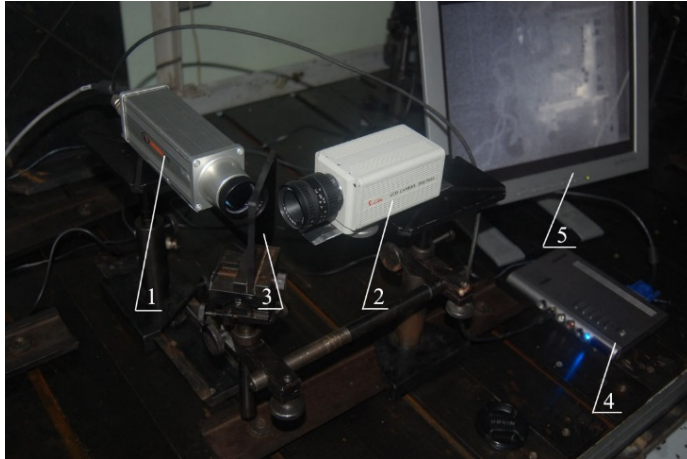


Рис. 8. Зовнішній вигляд лабораторного макету двоканальної ОЕСС: 1 – ТПВ камера; 2 – ТВ камера; 3 - спектроподільник; 4 – ТВ тюнер; 5 – монітор



Рис. 9. Зовнішній вигляд польового макету двоканальної ОЕСС

Для вимірювань в польових умовах (коли неузгодженість оптичних вісей спектральних каналів є несуттєвим) доцільно суміщувати канали за рахунок поділу оптичного випромінювання. Для досягнення автономності роботи в ТПВ каналі польового макету (рис.9) використовувалась камера FLIR 301, а в ТВ каналі – ТВ камера Sony HDR-CX560E. Мікроболометричний МПВ має  $320 \times 240$  пікселів з розміром  $35 \times 35$  мкм<sup>2</sup>. При цьому кутове поле зору камери становить  $30^\circ$ . Технічні параметри ТВ камери: діаметр вхідної зіниці –  $D = 37$  мм; фокусна відстань лінзового об'єктива –  $f' = 38$  мм; розмір пікселя ПВ –  $v_D \times w_D = 2 \times 2$  мкм<sup>2</sup>; робочий спектральний діапазон –  $\Delta\lambda_2 = (0,4-0,95)$  мкм; формат КМОН МПВ –  $2336 \times 1314$ . Для вимірювань в польових умовах макет було встановлено на переносний штатив.

Реєстрація зображень здійснювалась в лабораторному макеті через ТВ тюнер AVer Media AVerTV Volar GO, підключений до ноутбука, а в польовому макеті - безпосередньо у внутрішню пам'ять ТВ і ТПВ камер. Обробка зображень виконувалась на стаціонарному комп'ютері, а їх візуальний аналіз - на моніторі LG FL L1730s. Суб'єктивні експертизи проводились при середній яскравості екрана  $35$  кд/м<sup>2</sup>, освітленості робочого місця  $30-40$  лк, рівномірному задньому тлі монітора. Для обробки зображень використовувалось програмне середовище Matlab та пакет Image Tool Box.



Було досліджено послідовне комплексування зображень в ТВ каналі за наявності руху платформи та вібрацій. Запропоновано і підтверджено ефективність методу неконтрольованого мікросканування, який дозволяє не тільки відновити змазані зображення, але й підвищити просторове розділення в напрямку руху шляхом різницевої обробки кадрів (рис.10). Нажаль реалізувати таку обробку в ТПВ каналі не вдалось з огляду на низьку кадрову частоту мікроболометричних МПВ макетів.

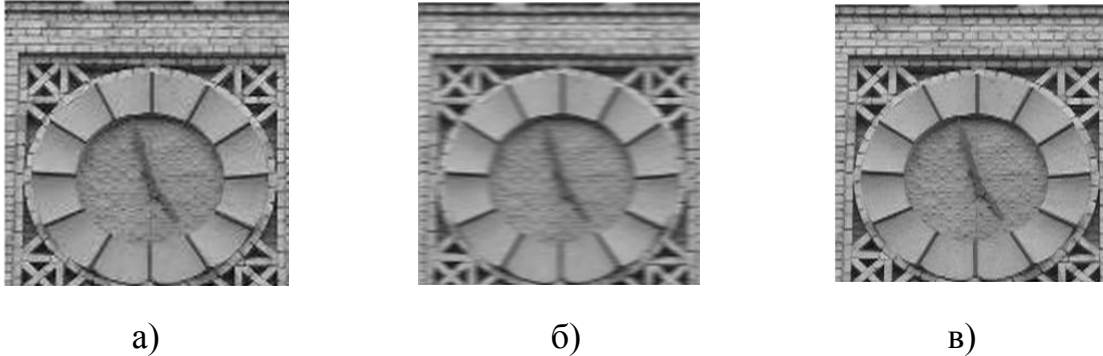
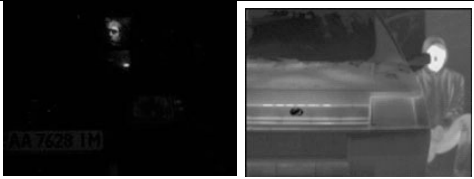

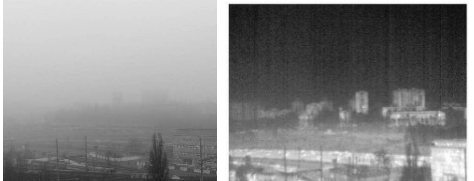
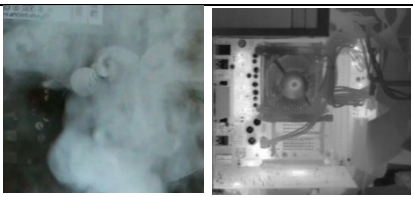


Рис. 10. Підвищення просторового розділення шляхом послідовного комплексування змещених кадрів: а) зображення з пониженою дискретизацією; б) зображення, зміщене на 7,5 пікселя в напрямку  $0^\circ$ ; в) відновлене зображення

Дослідження візуальної якості стандартних методів злиття зображень за різних умов спостережень (табл. 3) показали очікувану відсутність універсального методу комплексування, при якому забезпечується найвища оцінка суб'єктивної якості зображень.

Таблиця 3

Візуальна якість стандартних методів злиття зображень

№	Зареєстровані зображення (ТВ/ТПВ)	Умови спостереження	Найкращий метод злиття за суб'єктивною оцінкою
1.		Ніч, відстань 5 м	Піраміда Лапласа
2.		День, хмарна погода, відстань 50 м – 120 м	Метод головних компонент
3.		День, туман, відстань 200 м – 950 м	Інваріантне до зсуву вейвлет-перетворення
4.		Лабораторні умови, відстань 1 м	Метод головних компонент



Одним із способів вдосконалення методів комплексування ТВ та ТПВ зображень в ОЕСС, який дозволяє підвищити роздільну здатність обробленого зображення за менших затрат часу є використання карти інформативності. Розроблено новий спосіб комплексування в двоканальних ОЕСС, який полягає в наступному (рис. 11).

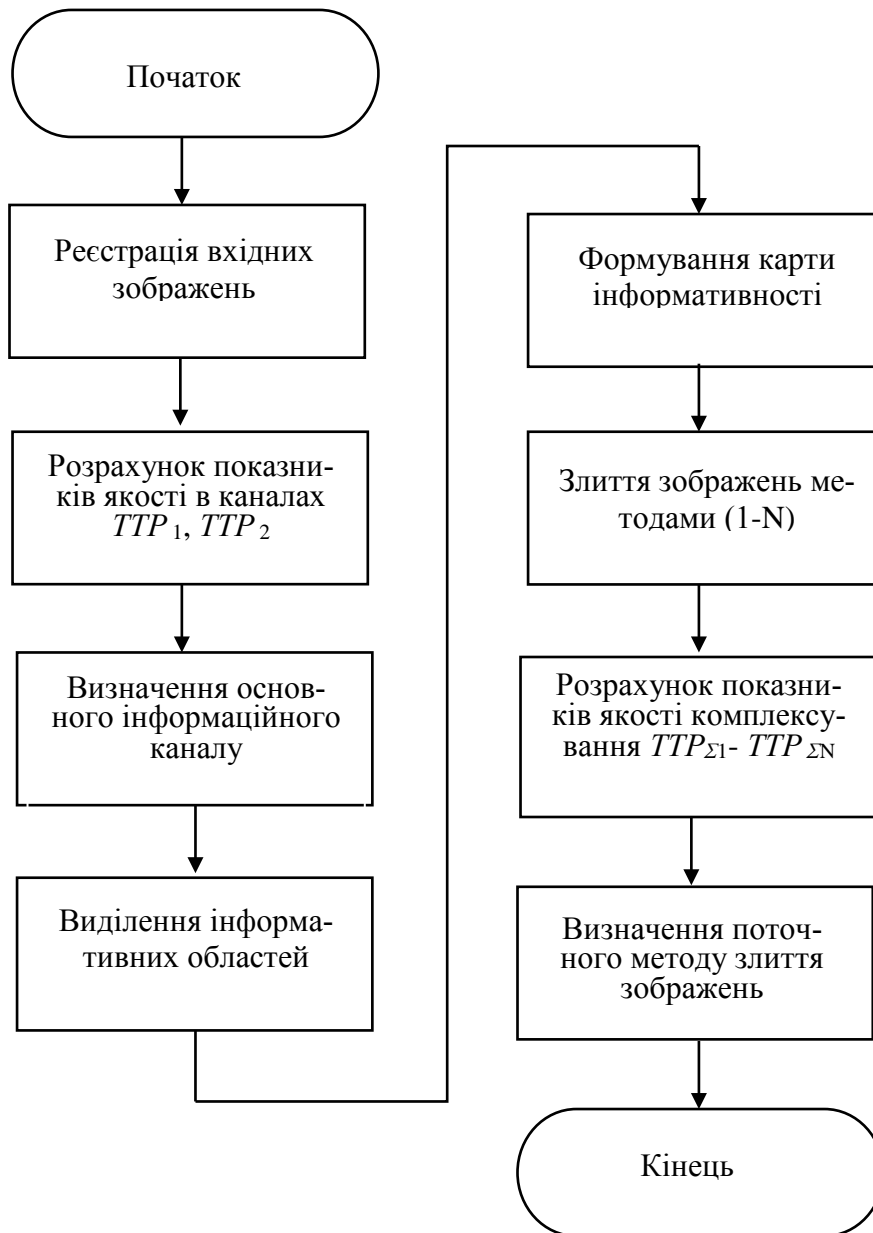


Рис. 11. Блок-схема способу комплексування в двоканальних ОЕСС

На рис. 12 показано відмінності в застосуванні показника якості  $TTP$  відповідно до блок-схеми 11. Для визначення основного інформаційного каналу показник  $TTP$  обраховується аналітично по формулі (9), причому контраст об'єкта не залежить від просторової частоти. При визначенні кращого методу комплексування показник  $TTP$  розраховується числовими методами по реальним просторовим спектрам зображень, які були злиті різними методами. Кращим вважається метод злиття, який забезпечує максимальне значення показника  $TTP$ .

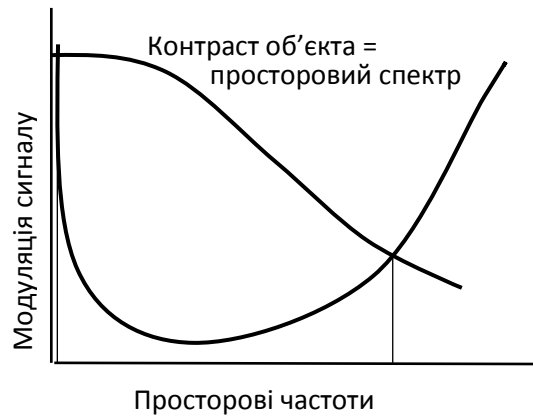
Розрахунок показників якості в  
каналах  $TTP_1, TTP_2$

$$TTP = \left[ C_R \int_{\nu_{xmin}}^{\nu_{xmax}} \int_{\nu_{ymmin}}^{\nu_{ymax}} \frac{M_s(\nu_x, \nu_y)}{CTF_E(\nu_x, \nu_y)} d\nu_x d\nu_y \right]^{1/2}$$

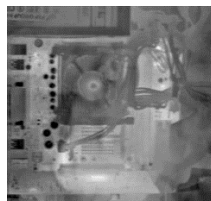


а) визначення основного інформаційного каналу

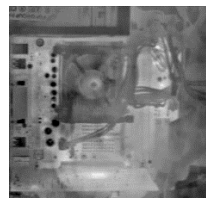
Розрахунок показників якості ком-  
плексування  $TTP_{\Sigma 1} - TTP_{\Sigma N}$



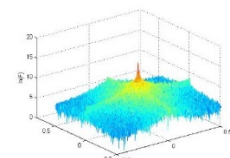
зображення №1



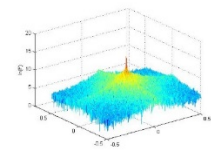
зображення №2



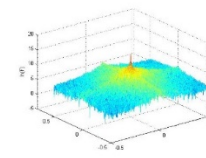
зображення № N



спектр №1



спектр №2



спектр № N

б) визначення кращого методу комплексування

Рис.12. Обчислення показника ТТР на різних етапах комплексування в дво-  
канальних ОЕСС

Процес обробки відбувається над окремими інформативними областями. Це дозволяє зменшити час обробки сигналу і зберегти інформацію на високих просторових частотах (просторову роздільну здатність), якщо основним є ТВ канал. Для прискорення обробки сигналу карта інформативності може формуватись по зображенню низької роздільної здатності, що є актуальним при поєднанні ТПВ і ТВ каналів, коли ТПВ канал є основним. Показано, що швидкість комплексування зображень з виділеними інформативними областями підвищується порівняно з безпосереднім комплексуванням зображень низької і високої роздільної здатності в середньому в 2 рази.

Комплексування стандартними і запропонованим методом для різних сюжетів в польових умовах (рис. 13, 14, таблиця 4) порівнювалось методом суб'єктивних експертиз.



а) зображення в ТВ каналі



б) зображення в ТПВ каналі

Рис. 13. Зареєстровані в польових умовах зображення



а) метод усереднення



б) метод головних компонент



в) піраміда Лапласа



г) контрастна піраміда



д) градієнтна піраміда



е) морфологічна піраміда



ж) вейвлет перетворення



з) інваріантне до зсувів вейвлет перетворення



і) запропонований метод

Рис. 14. Результати комплексування

Оцінка результатів комплексування по рис. 14

Метод комплексування	Стандартне відхилення	Інформаційний показник	$Q_{AB/F}$	Анізотропія	$TTP$	Суб'єктивна оцінка
1. Метод усереднення	39,6317	2,8185	0,3254	0,0023	25	3
2. Метод головних компонент	49,6429	3,3522	0,5839	0,0033	27	2
3. Піраміда Лапласа	54,5903	2,7926	0,5788	0,0068	30	4
4. Контрастна піраміда	51,7377	2,6041	0,3259	0,0057	28	4
5. Градієнтна піраміда	43,3421	2,6923	0,5414	0,0047	26	3
6. Морфологічна піраміда	57,5509	2,7186	0,5301	0,0089	27,5	4
7. Вейвлет перетворення	50,3732	2,6116	0,5392	0,0070	28	4
8. Інваріантне до зсувів вейвлет перетворення	50,7794	2,7281	0,5779	0,0066	30	4
9. Запропонований метод	57,4060	3,8997	0,6183	0,0052	31,5	5

Із обчислених величин показника  $TTP$  за методикою NVIPM можна визначити ймовірності виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта двоканальною ОЕСС для різних відстаней спостереження  $R$

$$P_{\kappa}(R) = \frac{\left(\frac{V_{\kappa}(R)}{V_{50}(3)}\right)^E}{1 + \left(\frac{V_{\kappa}(R)}{V_{50}(3)}\right)^E}, \quad (12)$$

де  $V_{\kappa} = \frac{\sqrt{A_0} TTP_{\kappa}}{R}$  - показник  $TTP$ , виміряний в загальній кількості роздільних пар ліній в габариті об'єкта  $\sqrt{A_0}$ ;  $V_{50}$  - число штрихів, що розділяються, необхідних для забезпечення 50 % ймовірності правильного рішення залежно від змісту задачі;  $E(R) = 1,51 + 0,24[V_{\kappa}(R)/(V_{50})]$  - емпірично визначена константа, що залежить від спектрального діапазону та відношення  $V_{\kappa}(R)/V_{50}$ .

Величина  $V_{50}$  визначається експериментально для кожного класу об'єктів. Приблизно вважається, що ця величина в 2,7 разів є більшою, ніж для по критерію Джонсона. Графіки функції (11) для наведених вище методів комплексування при  $V_{50} = 2,7$  для виявлення та  $V_{50} = 14,5$  для розпізнавання показані на рис. 15, 16 (но-

мери методів згідно з табл. 4). З рисунків видно, що комплексуювання дозволяє підвищити ефективність двоканальної ОЕСС порівняно з ефективністю окремих каналів.

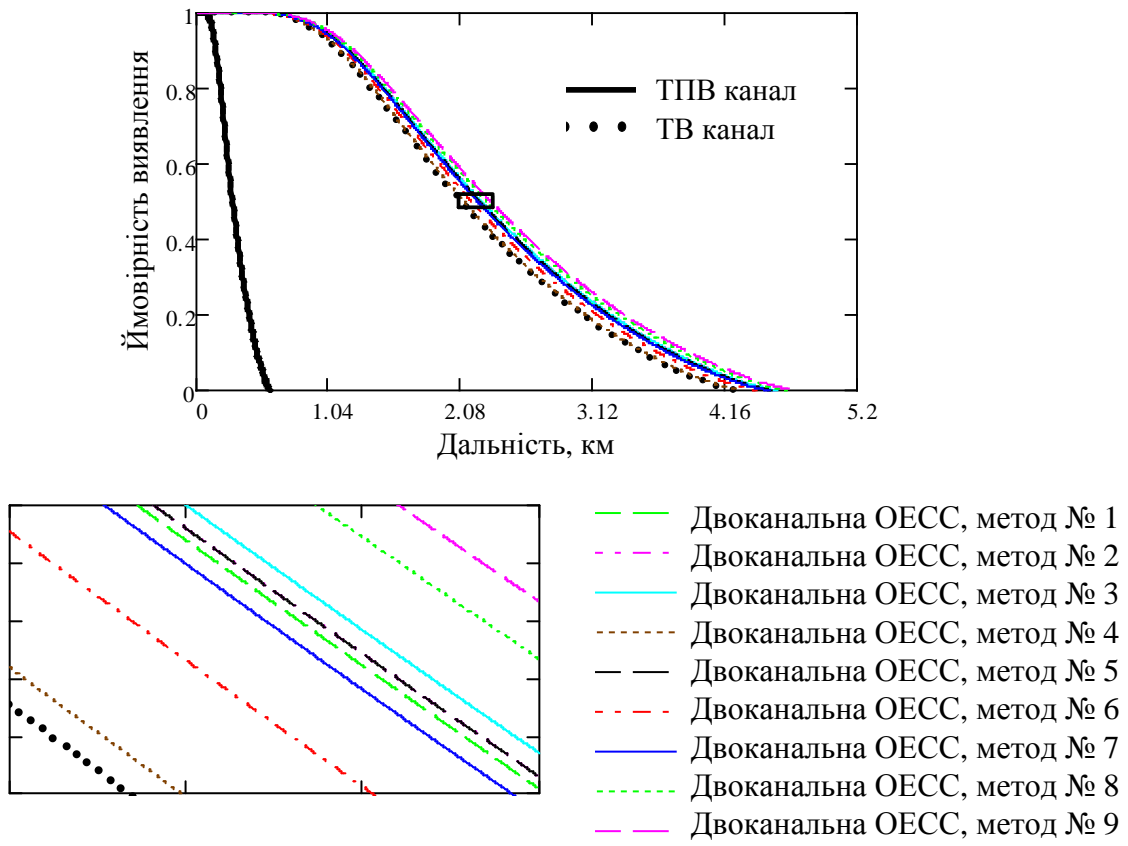


Рис. 15. Ймовірність виявлення об'єкта двоканальною ОЕСС за різних методів комплексуювання

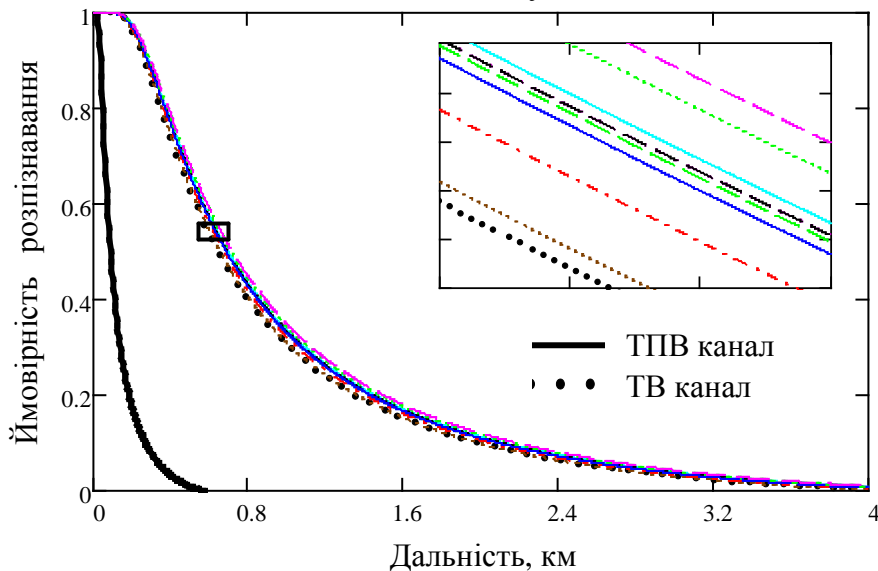


Рис. 16. Ймовірність розпізнавання об'єкта двоканальною ОЕСС за різних методів комплексуювання

Наведені числові дані та графіки дають уявлення про ефективність застосованих методів за конкретних умов спостереження. Очевидно, що зміна цих умов викличе також зміну оціночних результатів. Результати моделювань показують, що

комплексування даних ТВ та ТПВ каналів згідно з запропонованою методикою дозволяє підвищити максимальну дальність дії двоканальної ОЕСС до 12% при хороших погодних умовах спостереження.

Для підвищення швидкості обробки інформації в ОЕСС при визначенні показника *ТТР* було досліджено й підтверджено можливість застосування цифрового когерентно-оптичного процесора для отримання просторового спектру зображень. Отримано формули для розрахунку імпульсного відгуку і передавальної функції когерентно-оптичного процесора, які дозволяють аналізувати і оптимізувати основні його характеристики.

Експериментальні дослідження макетів двоканальної ОЕСС з комплексуванням підтвердили розроблені в дисертації теоретичні положення й висновки.

У додатках наводяться акти впровадження результатів дисертаційної роботи, а також список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.

## ВИСНОВКИ

Наведені в дисертаційній роботі наукові положення та результати досліджень вирішують важливу науково-технічну проблему удосконалення існуючих та створення нових методів і засобів підвищення ефективності функціонування багатоканальних ОЕСС з комплексуванням зображення, шляхом використання нових методів проектування і узгодження інформаційних каналів, впровадження нових методів обробки сигналів, створення більш точних засобів визначення основних характеристик окремих ланок і всієї інформаційної системи «ФЦО – ОЕСС з комплексуванням – оператор» в цілому.

При виконанні дисертаційної роботи отримано такі наукові результати:

1. Вперше на базі розроблених моделей, сформульованих розрахункових методів, запропонованих технічних рішень створено науково обґрунтовані методологічні засади підвищення ефективності функціонування ОЕСС з комплексуванням зображень, які включають методи конструктивного узгодження характеристик основних блоків ОЕСС, механізм адаптивного вибору найкращого методу злиття зображень спектральних каналів, засоби експериментального визначення основних характеристик ОЕСС і дозволяють покращити якість виконання поточної задачі спостереження оператором.

2. Розроблено удосконалену математичну модель спектральних каналів ОЕСС, яка дозволяє більш точно аналізувати та синтезувати ОЕСС дистанційного зондування, узгоджувати основні параметри блоків системи з урахуванням як просторових, так і енергетичних характеристик й може використовуватись як основа для моделювання інформаційної системи «ФЦО – ОЕСС з комплексуванням – оператор».

3. Вперше на основі досліджень показників ефективності ТВ та ТПВ каналів і оцінок якості комплексування зображень запропоновано уніфікований метод оцінювання просторових й енергетичних властивостей каналів на основі показника якості *ТТР*. Такий єдиний підхід дозволяє визначати головний інформаційний канал в ОЕСС як базовий для подальшого комплексування, а також узгоджувати параметри вхідних блоків двоканальних ОЕСС, наприклад, діаметри вхідних зіниць об'єктивів шляхом максимізації показника *ТТР*.

4. Розроблено новий метод оцінювання ефективності функціонування ОЕСС з

комплексуванням інформації на основі апостеріорного показника  $TTP$ , який визначається чисельно для даного способу злиття зображень по результуючому просторовому спектру ФЦО. Цей метод дозволяє дослідити особливості проходження сигналу через всі ланки системи «ФЦО – ОЕСС – оператор» й особливості процесу комплексування зображень та його зорового сприйняття оператором, дає можливість розрахувати ймовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта в ОЕСС з комплексуванням й адаптивно змінювати спосіб злиття зображень в залежності від стану ФЦО.

5. Розроблено метод узгодження основних параметрів моноблочних коліматорних прицілів для автоматичної стрілецької зброї та запропоновані варіанти моноблочних коліматорних прицілів з підвищеною точністю прицілювання: приціл з двох оптичних деталей, склеєних по площині, забезпечує неузгодженість оптичних вісей каналів 3 мрад, а приціл з двох оптичних деталей, склеєних по сферичній поверхні, при такому ж діаметрі вихідної зіниці і масі забезпечує неузгодженість 1,25 мрад. Запропоновано метод розрахунку децентрованого телескопічного моноблока, в якому при паралактичній неузгодженості між лініями прицілювання і спостереження 3 мрад збільшення може досягати 1,6 крат порівняно з 1,4 крат для вісесиметричної схеми.

6. Вперше розроблено та експериментально підтверджено ефективність методології комплексування, яка передбачає використання показника  $TTP$  при аналізі проходження сигналу через всі ланки системи «ФЦО – ОЕСС – оператор» і виборі ведучого каналу, послідовне комплексування інформації в окремих каналах в процесі реєстрації для усунення змазування зображення та формування карти інформативності при паралельному комплексуванні зображень. Використання цієї стратегії дозволяє підвищити максимальну дальність виявлення об'єктів в двоканальних ОЕСС до 12%.

7. Розроблено новий метод вимірювання основних енергетичних характеристик спектральних каналів ОЕСС. На базі цього методу розроблені засоби проектування вимірювального стенду з використанням оригінального дифузного випромінювача змінної яскравості. Теоретично і експериментально показано, що запропонований метод порівняно з аналогами забезпечує підвищення динамічного діапазону до 2,5 разів при високій однорідності поля яскравості.

8. Запропоновано нові методи підвищення швидкості обробки інформації в багатоканальних ОЕСС з комплексуванням: з використанням карти інформативності на основі каналу низького просторового розділення й застосуванням цифрового когерентно-оптичного процесора. Об'єм обчислень в першому випадку може зменшуватись до 2 разів. Отримано формули для розрахунку імпульсного відгуку і передавальної функції когерентно-оптичного процесора, які дозволяють аналізувати і оптимізувати основні його характеристики.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Микитенко В.І. Комплексування інформації в багатоканальних оптико-електронних системах спостереження: монографія / Колобродов В.Г., Микитенко В.І. // Поліграфічний центр «Аверс», Київ, 2013. – 178 с.

*Здобувачем розроблено математичну модель двоканальної ОЕСС у складі ТВ*



*та ТПВ каналів та досліджено ефективність використання послідовного комплексування інформації в одному каналі та паралельного комплексування в спектральних каналах за різних умов спостереження.*

2. Микитенко В.І. Ефективність інфрачервоних оптико-електронних систем спостереження: монографія / В.Г. Колобродов, В.І. Микитенко, Є.Г. Балінський // Київ: «Вік прінт», 2017. - 202 с.

*Здобувачем виконано порівняльний аналіз алгоритмів визначення ефективності іконічних інфрачервоних ОЕСС, виділено першочергові проблеми галузі та визначено можливі напрями їх вирішення.*

3. Микитенко В.І. Оптические системы видеоспектрометров дистанционного зондирования Земли / Колобродов В.Г., Бородийчук П.В., Микитенко В.І. // Космічна наука і технологія. - 1998. - т.4, №1. - С.29-38. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, Crossref, OJS, Google Scholar).

*Здобувачем досліджено переваги й недоліки схемотехнічних рішень одержання авіакосмічних гіперспектральних зображень.*

4. Микитенко В.І. Классификация и методика сопоставительного анализа оптических схем коллиматорных прицелов / Сенаторов Н.В., Микитенко В.І. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2003. - Вып. 7. - С.8-12. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

*Здобувачем запропоновано спрощений узагальнений показник якості колімаційних прицілів для стрілецької зброї.*

5. Микитенко В.І. Оптимизация конструкции моноблочного коллиматорного прицела / Микитенко В.І., Сенаторов Н.В. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2003.- Вып. 8. - С.27-29. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

*Здобувачем обґрунтовано перелік часткових показників якості, які визначають ефективність малогабаритних моноблочних прицілів і дозволяють знайти компроміс між діаметром вихідної зіниці та масою моноблока.*

6. Микитенко В.І. Модели параллактической ошибки коллиматорного прицела на базе сферического зеркала со смещенной геометрической осью / Микитенко В.І., Сенаторов Н.В. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2003. - Вып. 9. - С.20-24. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

*Здобувачем розроблено рекомендації по забезпеченню точності суміщення візуального й прицільного каналів в меніскових колімаційних прицілах.*

7. Микитенко В.І. Стендовая аппаратура для вимірювання енергетичних характеристик оптико-електронних пристроїв космічного базування / Колобродов В. Г., Микитенко В.І., Л.А. Міхеєнко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». -2003. - №3. -С. 98 - 104. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus).

*Здобувачем теоретично й експериментально обґрунтовано метод отримання поля змінної яскравості в вимірювальному стенді.*

8. Микитенко В.І. Модели параллактической ошибки линзового моноблочного коллиматорного прицела / Сенаторов Н.В., Микитенко В.І. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2004.-



№1(10). - С.34-36. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

*Здобувачем запропоновано схемотехнічне рішення моноблочного колімаційного прицілу із зменшеною похибкою суміщення візуального й прицільного каналів.*

9. Микитенко В.И. Моноблочный телескопический визир малого увеличения / Сенаторов Н.В., Микитенко В.И. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2004. - Вип. 27. - С. 50 -55. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

*Здобувачем розроблено метод синтезу та запропоновано варіанти конструкції моноблочного телескопічного прицілу на базі телескопічної лінзи.*

10. Микитенко В.И. Полунатурная модель цели для определения исходных данных стрельбы из стрелкового оружия / Сенаторов Н.В., Лагно Ю.В., Микитенко В.И., Гурнович А.В. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2004.- №2(11). - С.35-37. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

*Здобувачем визначені параметри руху об'єкта в полі зору оператора при спостереженні з допомогою ОЕСС.*

11. Микитенко В.И. Сопоставительный анализ телескопических прицелов для стрелкового оружия / Гурнович А.В., Сенаторов Н.В., Колобродов В.Г., Микитенко В.И. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический журнал. - 2004.- №3(12). – С.35-41. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

*Здобувачем проаналізовано типові оптичні схеми телескопічних прицілів, обґрунтовано перевагу моноблочної конструкції.*

12. Микитенко В.И. Оценка эффективности выполнения боевой задачи оператором стрелкового оружия с оптическим прицелом / Сенаторов Н.В., Гурнович А.В., Микитенко В.И., Лагно Ю.В. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2005. - №1(14). - С.4-7. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

*Здобувачем запропоновано механізм врахування особливостей зорового сприйняття при визначенні ймовірності попадання в ціль.*

13. Микитенко В.І. Комплексування інформації в оглядово-візирних системах керованих рухомих об'єктів / Микитенко В.І. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2005. - Вип. 30. - С. 36 - 41. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

14. Микитенко В.И. Методы и средства измерения энергетических характеристик оптико-электронных систем космического зондирования Земли / Вариченко Л.В., Колобродов В.Г., Ладыка Я.Е., Микитенко В.И., Михеенко Л.А. // Космічна наука і технологія. - 2006. - т.12, №2/3. - С.59-69. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, Crossref, OJS, Google Scholar).

*Здобувачем запропоновано варіанти конструктивних рішень лабораторного стенду та елементної бази для вимірювання енергетичних характеристик ОЕСС.*

15. Микитенко В.І. Дослідження релевантних ознак зображень в ОЕП телевізійного типу / Микитенко В.І. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2006. - Вип. 31. - С. 24 - 31. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

16. Микитенко В.І. Моделювання зображення у задачах комплексування каналів оптико-електронних систем / Микитенко В.І., Котовський В.Й. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2007. - Вип. 33. - С. 24 - 29. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

*Здобувачем розроблено спрощену енергетичну модель формування випромінювання в спектральному діапазоні (0,4 – 14) мкм.*

17. Микитенко В.І. Багатоканальні іконічні системи дистанційного моніторингу / Богатирьова Г.В., Котовський В.Й., Микитенко В.І. // Вісті академії інженерних наук України. - 2007. - №2(32). - С.21 - 26. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

*Здобувачем виконано аналіз перспективних галузей використання багатоканальних ОЕСС.*

18. Микитенко В.І. Тенденції розвитку космічних оптико-електронних систем спостереження Землі / Колобродов В.Г., Микитенко В.І. // Наукові вісті НТУУ «КПІ». - 2007. - №3. - С.115-120. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus).

*Здобувачем обгрунтовано типи вхідних оптичних блоків для перспективних нано- та мікро-супутників.*

19. Микитенко В.І. Вибір показника якості в багатоканальних бортових оглядово-пошукових оптико-електронних системах / Микитенко В.І. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2007. - Вип. 34. - С.40 - 45. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

20. Микитенко В.І. Исследование тепловой составляющей окислительно-восстановительных процессов методом динамической термографии / Котовський В.Й., Микитенко В.І. // Электроника и связь. Тематический выпуск «Проблемы электроники». - 2008. - Ч.2 - №3-4. - С.93 - 95. (Видання індексується в наукометричних базах COPE, CrossRef, IC Journals Master List, BASE, Google Scholar, OpenAIRE, PBN, SIS, WorldCat).

*Здобувачем обгрунтовано параметри двоканальної ОЕСС для дослідження температурних розподілів на тілі людини.*

21. Микитенко В.І. Багатоканальні системи технічного зору для дистанційного енергоаудиту складних об'єктів / Котовський В.Й., Микитенко В.І. // Вісті академії інженерних наук України. - 2008. - №2(36). - С.16 - 19. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

*Здобувачем запропоновано метод підвищення точності дистанційного вимірювання температур будівель шляхом використання двоканальних ОЕСС.*

22. Микитенко В.І. Дистанційні спостереження в тумані з допомогою пасивних двоканальних іконічних оптико-електронних систем / Микитенко В.І., Котовський В.Й. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2008. - Вип. 35. - С.29 - 36. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

*Здобувачем проведено теоретичне моделювання та експериментальне дослідження дистанційних спостережень в тумані та в умовах задимленості.*

23. Микитенко В.І. Комплексування зображень в багатоканальних оптико-електронних системах з різноформатними матричними приймачами випромінювання / Микитенко В.І., Котовський В.Й. // Вісті академії інженерних наук України. - 2008. - №3 (37). - С.38 - 44. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

*Здобувачем проаналізовано якість просторового суміщення матричних зображень в двокональних оптичних системах різного типу.*

24. Микитенко В.І. Применение голографического оптического элемента при создании малогабаритных коллиматорных прицелов / Сенаторов Н.В., Полежаев В.В., Микитенко В.І., Сенаторов В.Н. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический журнал. - 2008.- №3(28). - С.27-34. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

*Здобувачем виконано оцінку потенційної точності прицілювання в малогабаритних прицілах з голографічними оптичними елементами.*

25. Микитенко В.І. Підвищення роздільної здатності зображень, спотворених лінійним рівномірним рухом / Микитенко В.І., Рибалко М.С. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2008. - Вип. 36. - С.24 - 30. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, PИИЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

*Здобувачем запропоновано використати неконтрольоване мікросканування для покращення просторового розділення шляхом послідовного комплексування зображень в одному спектральному каналі.*

26. Микитенко В.І. Вибір оптико-електронної системи малорозмірного університетського супутника / Колобродов В.Г., Лихоліт М.І., Марченко В.О., Микитенко В.І. // Вісник ЧДТУ. - 2008. - №2. - С. 167 - 172. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, Academic Resource Index, WorldCat, CrossRef, Ulrich's Periodicals Directory).

*Здобувачем обгрунтовано склад апаратури для дистанційного зондування Землі в оптичному діапазоні з борта недорогого мікросупутника.*

27. Микитенко В.І. Використання багатоканальних оптико-електронних систем для дослідження біологічних об'єктів / Котовський В.Й., Микитенко В.І. // Электроника и связь. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии». - 2009. - Ч.1 - №2-3. - С.187 – 190. (Видання індексується в наукометричних базах COPE, CrossRef, IC Journals Master List, BASE, Google Scholar, OpenAIRE, PBN, SIS, WorldCat).

*Здобувачем виготовлено та відюстовано макет двоканальної ОЕСС для лабораторних вимірювань температури шкіри людини.*

28. Микитенко В.І. Энергетическая калибровка многоспектральных сканирующих устройств высокого разрешения / Михеенко Л.А., Микитенко В.І. // Космічна наука і технологія. - 2009. - т.15, №3. - С.42-49. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, Crossref, OJS, Google Scholar).

*Здобувачем запропоновано схему виміральної установки для експериментального визначення енергетичних характеристик багатоканальних ОЕСС з широким динамічним діапазоном.*

29. Микитенко В.І. Модернізація авіаційного стрілецького прицілу комплексуванням інформаційних каналів / Микитенко В.І., Сенаторов М.В. // Вісник НТУУ

«КПІ». Серія приладобудування.- 2010. - Вип. 40. - С.86 - 93. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, PИИЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

*Здобувачем обгрунтовано можливість модернізації авіаційного стрілецького прицілу шляхом комплексування індикатора на лобовому склі й візирної головки.*

30. Микитенко В.И. Стратегия комплексирования информации в двухканальных оптико-электронных системах наблюдения с разными полями зрения / Микитенко В.И., Рибалко М.С. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2011. - №1(38). - С.19-23. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

*Здобувачем запропонований алгоритм реєстрації та злиття телевізійного та тепловізійного зображень в ОЕСС на основі карти інформативності, яка формується в високочастотній області просторового спектру.*

31. Микитенко В.І. Узгодження діаметрів вхідних зіниць дзеркально-лінзового об'єктиву двоканальної ОЕСС / Микитенко В.І., Рибалко М.С. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2011. - Вип. 42. - С.54 – 61. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, PИИЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

*Здобувачем запропоновано використання показника ТТР для узгодження основних параметрів вхідних блоків двоканальної ОЕСС.*

32. Микитенко В.І. Підвищення ефективності роботи тепловізійної системи при спостереженні малорозмірних цілей на морському фоні / Микитенко В.І., Подрига С.І. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - 2011. - №2(38). С.56 – 59. (Видання індексується в наукометричних базах Google Scholar, Index Copernicus).

*Здобувачем запропоновано спосіб просторової фільтрації сигналу ФЦО з використанням попередньо визначеної дальності виявлення об'єкта.*

33. Микитенко В.І. Оцінка показників якості комплексованих зображень в двоканальних ОЕСС / Рибалко М.С., Микитенко В.І., Мамута О.Д. // Вісник ЧДТУ. - 2011. - №4. - С.57 - 62. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, Academic Resource Index, WorldCat, CrossRef, Ulrich's Directory).

*Здобувачем виготовлено макет двоканальної ОЕСС, з допомогою якої отримано серію зображень й проведено суб'єктивну експертизу їх якості.*

34. Микитенко В.І. Оцінка ефективності багатоканальних оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням інформації / Колобродов В.Г., Мамута М.С., Микитенко В.І. // Наукові вісті НТУУ «КПІ». - 2012. - №6(86). - С.127 - 131. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus).

*Здобувачем запропоновано метод визначення показника ТТР для багатоканальних ОЕСС з комплексуванням зображень.*

35. Микитенко В.І. Удосконалення розрахунку мінімальної роздільної різниці температур медичного тепловізора / А.М.Л. Аль-Мзіраві, Колобродов В.Г., Микитенко В.І. // Наукові вісті НТУУ «КПІ». - 2014. - №5 (97). - С.96 - 100. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus).

*Здобувачем теоретично та експериментально досліджено мінімальну роздільну різницю температур тепловізора Thermal Eye TSC.*

36. Микитенко В.І. Комплексування зображень у цілодобових двоканальних системах спостереження / Микитенко В.І., Балтабаєв М. М., Пономаренко О. А. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2014. – Вип. 48. – С. 43 – 49. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

*Здобувачем запропоновано спрощену модель утворення оптичного випромінювання в видимому та ІЧ діапазонах.*

37. Микитенко В.І. Расчет минимальной разрешаемой разности температур тепловизионных приборов / Ахмед М.Л. Аль-Мзирави, Колобродов В.Г., Микитенко В.І. // Приборы и методы измерений. - 2015 г., № 1(10). - С.64 - 69. (Іноземне видання).

*Здобувачем виконано порівняння формул для розрахунку мінімальної роздільної різниці температур для різних апроксимацій модуляційної передавальної функції зорової системи спостерігача.*

38. Микитенко В.І. Метод комплексування даних з попереднім знаходженням інформативної області сцени / Плотніков О.М., Микитенко В.І. // Вісник Хмельницького національного університету. - 2017. - №1(245). - С.196 - 201. (Видання індексується в наукометричних базах Google Scholar, Index Copernicus, eLibrary.ru, Polish Scholarly Bibliography).

*Здобувачем запропоновано створювати карту інформативності при комплексуванні спектральних каналів по зображенню низької роздільної здатності.*

39. Mykytenko V. I. Calculation Model for Optoelectronic Remote Sensing System's Radiometric Resolution at Arbitrary Viewing Angles / Kolobrodov, V. H., Lykholit, M. I., Mykytenko, V. I., Tiagur, V. M., Dobrovolska, K. V. // Visnyk NTUU KPI. Seriiia Radiotekhnika Radioaparatabuduvannia. - 2017. - Iss. 69. - PP.30-34. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, WorldCat, OpenAIRE, DOAJ).

*Здобувачем запропонована спрощена модель розрахунку енергетичного розділення ОЕСС космічного базування видимого діапазону спектра.*

40. Mykytenko V.I. Physical and mathematical model of the digital coherent optical spectrum analyzer / V.G. Kolobrodov, G.S. Tymchyk, V.I. Mykytenko, M.S. Kolobrodov // Optica Applicata. - 2017. - (Vol.47), No.2. - PP.273-282. (Іноземне видання).

*Здобувачем проаналізовано вплив оптичного когерентного процесора на спектр зображень при їх обробці в ОЕСС з матричними приймачами випромінювання.*

41. Mykytenko V. I. Influence of the Matrix Structure of the Modulator and Detector on the Optical Spectrum Analyzer Output Signal / Kolobrodov, V. H., Tymchik, G. S., Mykytenko, V. I., Kolobrodov, M. S., Lutsiuk, M. M. // Visnyk NTUU KPI Seriiia. Radiotekhnika Radioaparatabuduvannia. – 2018. - Iss. 72. - PP.78 -85. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, WorldCat, OpenAIRE, DOAJ).

*Здобувачем досліджено вплив параметрів матричного приймача випромінювання на функцію передачі сигналу когерентного спектроаналізатора.*

42. Микитенко В.І. Порівняння якості роботи фільтрів для зменшення шумів зображень тепловізійного каналу оглядових оптико-електронних пристроїв / Балахонова Н. О., Микитенко В. І., Пашков Р. А. // Вісник КПІ. Серія приладобудування. - 2019. - Вип. 57(1). - С.26 – 35. (Видання індексується в наукометричних

базах Index Copernicus, PИHЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

*Здобувачем сформульовано задачу й вихідні дані попереднього фільтрування зображень в ОЕСС з комплексуванням.*

43. Микитенко В. І. Патент на винахід 78609 Україна, МПК G01J1/10, F21V 9/00. Дифузний випромінювач / Міхеєнко Л.А., Колобродов В.Г., Микитенко В. І., Петрущенко Л.А., Гайворонська Г.О.; заявник та патентовласник НТУУ «КПІ». - №а200504103; заявл. 28.04.2005; опубл. 10.04.2007, бюл. №4.

*Здобувачем обґрунтовано отримання корисного ефекту при виключенні площі поверхні діафрагми з регульованим діаметром отвору із загальної площі оптично-спряжених фотометричних куль.*

44. Микитенко В.І. Патент на корисну модель №82581, МПК G06T 5/50 (2006.01) / Спосіб комплексування в двоканальних іконічних системах / Мамута М.С., Микитенко В.І., Мамута О.Д. // Заявлено 21.03.2013; Опубл. 12.08.2013, Бюл. №15, 2013 р.

*Здобувачем запропоновано формувати карту інформативності на основі показника успішності виконання завдання.*

45. Mykytenko V. I. Refinement of thermal imager minimum resolvable temperature difference calculating method / Mykytenko V. I., Kolobrodov V. G. // Proc. SPIE 9809, Twelfth International Conference on Correlation Optics, 98090C (November 30, 2015); doi:10.1117/12.2228532.

*Здобувачем уточнено розрахунок коефіцієнту смуги пропускання ОЕСС з використанням моделі Ніла для апроксимації зорової системи.*

46. Mykytenko V. I. Spaceborne linear array imager's spatial resolution for arbitrary viewing angles / Valentin G. Kolobrodov; Catherine V. Dobrovolska; Volodymyr I. Mykytenko; Grygorij S. Tymchik; Volodymyr M. Tiagur; Paweł Komada; Assel Mussabekova; Aliya Targeusizova; Aigul Iskakova // Proceedings of SPIE V. 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High Energy Physics Experiments 2017; 104450J (2017); doi: 10.1117/12.2280909.

*Здобувачем запропоновано розрахункову формулу для визначення модуляційної передавальної функції вхідного блоку ОЕСС при похилих кутах візування.*

47. Mykytenko V. I. Substantiation of a university nanosatellite television camera parameters / Valentin Kolobrodov, Volodymyr Mykytenko, Vyacheslav Sokurenko, Andrzej Smolarz, Assel Mussabekova, Samat Sundetov, Zhanar Azeshova // Proceedings of SPIE. Volume 11045, Optical Fibers and Their Applications 2018; 1104512 (2019); doi: 10.1117/12.2522404.

*Здобувачем запропоновано методику моделювання системи «земна поверхня – атмосфера – телевізійна камера», яка дозволяє забезпечити задане просторове розділення на поверхні Землі.*

48. Mykytenko V. I. University Nanosatellite Television Camera / V. Mykytenko, V. Kolobrodov, O. Lysenko, V. Sokurenko // IEEE Conference Proceedings. 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). - Kyiv, 2019. - PP. 543-547.

*Здобувачем запропоновано метод узгодження параметрів об'єктива та матричного приймача випромінювання для телевізійної камери дистанційного спостереження.*

49. Микитенко В.І. Стендовая аппаратура для измерения энергетических характеристик сканирующих устройств космического базирования / Міхеєнко Л.А., Микитенко В.І. // Перша науково-технічна конференція «Приладобудування 2002: підсумки і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2002. - С.52.

*Здобувачем обґрунтовано параметри основних блоків стенду для вимірювання енергетичних характеристик ОЕСС.*

50. Микитенко В.І. Установка для аттестации космических систем зондирования Земли / Колобродов В.Г., Міхеєнко Л.А., Микитенко В.І. // II науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (22–23 квітня 2003 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2003. - С.34-35.

*Здобувачем виконано аналіз доступної елементної бази для вимірювання енергетичних характеристик ОЕСС в видимому та ближньому ІЧ діапазонах.*

51. Микитенко В.І. Моделирование работы оператора в поисково-прицельных оптических и оптико-электронных системах / Микитенко В.І. // II науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (22–23 квітня 2003 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2003. - С.55.

52. Микитенко В.І. Моноблочный телескопический визир малого увеличения / Сенаторов Н.В., Микитенко В.І. // III науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (20 - 21 квітня 2004 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2004. - С.54-55.

*Здобувачем проведено аналіз критеріїв оцінки якості візуального сприйняття тепловізійних зображень.*

53. Микитенко В.І. Особенности измерения энергетических характеристик космических оптико-электронных сканеров / Колобродов В.Г., Міхеєнко Л.А., Микитенко В.І. // XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (20-21 квітня 2004 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2004. - С.55-56.

*Здобувачем досліджено фотометричні характеристики інтегрального випромінювача для вимірювання функції передачі сигналу ОЕСС.*

54. Микитенко В.І. Метрологическое обеспечение энергетической аттестации оптикоэлектронных систем зондирования Земли / Колобродов В.Г., Міхеєнко Л.А., Микитенко В.І. // IV Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (26-27 квітня 2005 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2005. - С.54.

*Здобувачем проаналізовано методи створення змінної яскравості в вимірювальних стендах.*

55. Микитенко В.І. Анализ задач визуального поиска и распознавания / Микитенко В.І. // V Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (25-26 квітня 2006 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2006. - С.78-79.

56. Микитенко В.І. Оцінка якості комплексування зображень в багатоканальних оптико-електронних системах / Микитенко В.І. // V Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (25–26 квітня

2006 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2006. - С.79-80.

57. Микитенко В.І. Покращення роздільної здатності зображення при дистанційному спостереженні земної поверхні з рухомої платформи / Микитенко В.І., Рибалка М.С. // VI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (24-25 квітня 2007 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2007. - С.54 - 55.

*Здобувачем запропоновано використання неконтрольованого мікросканування для усунення змазу зображення й підвищення його просторового розділення.*

58. Микитенко В.І. Модель оптичного зображення для комплексування у багатоканальних оптико-електронних системах / Котовський В.Й., Микитенко В.І. // VI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (24-25 квітня 2007 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2007. - С. 56 - 57.

*Здобувачем запропонована спрощена модель формування зображень в двоканальних ОЕСС.*

59. Микитенко В.І. Створення оптико-електронного блоку цифрової кадрової фотокамери космічного базування / Колобродов В.Г., Микитенко В.І., Бараненко І.В. // VI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (24-25 квітня 2007 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2007. - С. 52 - 53.

*Здобувачем запропоновано спосіб оцінки якості космічних зображень.*

60. Микитенко В.І. Метод функціональної діагностики стану мікросудинної системи на основі обміну кисню та теплового випромінювання / Котовський В.Й., Ройтман Е.М., Микитенко В.І. // XXVII Международная научно-техническая конференция «Проблемы электроники», ч. 2. Сборник тезисов докладов / НТУУ «КПІ», Факультет електроніки. - Киев, 2007. – С.83-85.

*Здобувачем запропоновано використовувати тепловізори для вимірювання температур при контролі капілярного кровоплину на шкіряних покровках.*

61. Микитенко В.І. Комплексування зображень при денних дистанційних спостереженнях / Микитенко В.І. // VII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (22-23 квітня 2008 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2008. - С.66.

62. Микитенко В.І. Покращення роздільної здатності зображень при дистанційному спостереженні Землі в умовах вібрацій / Микитенко В.І., Рибалка М.С. // Перша студентська науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (23 квітня 2008 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2008. - С.18.

*Здобувачем запропоновано алгоритм послідовного комплексування в одному спектральному каналі для підвищення просторового розділення зображення.*

63. Микитенко В.І. Підвищення просторового розділення оптико-електронної системи спостереження за рахунок коливань платформи / Микитенко В.І. // Перша Всеукраїнська конференція «Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки» (3-5 червня 2008 р.). Збірник тез доповідей / КП СІБ «Арсенал». - Київ, 2008. - С.45 - 46.

64. Микитенко В.І. Обґрунтування параметрів оптико-електронної системи



спостереження для мікросупутників / Тимчик Г.С., Колобродов В.Г., Микитенко В.І. // Перша Всеукраїнська конференція «Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки» (3-5 червня 2008 р.). Збірник тез доповідей / КП СПБ «Арсенал». - Київ, 2008. - С. 47 - 48.

*Здобувачем запропоновано вирішення задачі узгодження об'єктива ОЕСС і приймача випромінювання по критерію просторового розділення.*

65. Микитенко В.І. Використання об'єктивів змінного збільшення в двоканальних ОЕСС Микитенко В.І., Котовський В.Й. // VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (28-29 квітня 2009 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2009. - С.43.

*Здобувачем розроблено розрахункову модель для оцінки ефективності пошуку/виявлення та розпізнавання об'єктів двоканальними ОЕСС з об'єктивними різниці полів зору.*

66. Микитенко В.І. Стратегія комплексування відео зображень / Микитенко В.І. // IX Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (27-28 квітня 2010 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2010. - С.61 - 62.

67. Mykytenko V. A new approach to information fusion in optoelectronic surveillance systems / Rybalko M., Mykytenko V. // 11-th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science SPO 2010 (October 21-24). - Kyiv, 2010.

*Здобувачем запропоновано новий алгоритм побудови карти інформативності.*

68. Микитенко В.І. Оцінка ефективності двоканальної ОЕСС з функцією комплексування інформації / Микитенко В.І., Рибалко М.С. // XI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2012. - С.72 - 73.

*Здобувачем запропоновано використання показника успішності виконання завдання для оцінки якості комплексованих зображень.*

69. Микитенко В.І. Вплив оптичних характеристик поверхонь об'єкту на аналіз його теплового стану/ Микитенко В.І. // XI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2012. - С.64.

70. Микитенко В.І. Оцінка ефективності двоканальної ОЕСС з комплексуванням інформації за різних зовнішніх умов функціонування / Мамута М. С., Мамута О. Д., Микитенко В.І. // XII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2013. - С.66-67.

*Здобувачем досліджено ефективність двоканальної ОЕСС з комплексуванням інформації за різних погодних умов функціонування.*

71. Mykytenko V. Image fusion for surveillance applications: state of the art and new aspects / Mykytenko V. // XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2014. - С.53-54.

72. Микитенко В.І. Моделирование и разработка многоканальных средств диагностики состояния человека на основе анализа его инфракрасного излучения /

Микитенко В.И. // Матеріали за 10-а міжнародна научна практична конференція «Динаміка на сучасній науці». Том 11. Технології. «Бял ГРАД-БГ» ООД. - Софія, 2014. - С.49 - 53.

73. Mykytenko V. The impact of phase distortions in matrix imagers with information fusion on image quality / Mykytenko V. // XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2015. - С. 50.

74. Микитенко В.І. Визначення ефективності оглядових оптико-електронних систем безпілотних літальних апаратів / Микитенко В.І. // XV Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2016. - С.51 - 52.

75. Микитенко В.І. Імплементация багатоспектральних ОЕСС на FPGA / Плотніков О.М., Микитенко В.І. // X науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування». Збірник тез доповідей / КПІ ім. Ігоря Сікорського, Приладобудівний факультет. - Київ, 2017. - С. 40.

*Здобувачем виконано порівняння методів комбінування зображень різних полів зору на одному кадрі – за рахунок комплексування та шляхом врізки.*

76. Mykytenko V. Infrared surveillance imager's application / Mykytenko V. // XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». - КПІ ім. Ігоря Сікорського, Приладобудівний факультет. - Київ, 2018. - С. 51 - 52.

77. Микитенко В.І. Оптико-електронна система спостереження для наземної техніки / Микитенко В.І., Пашков Р.А. // XI науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування» (15-16 травня 2018 р.). КПІ ім. Ігоря Сікорського, Приладобудівний факультет. - Київ, 2018. - С. 159-162.

*Здобувачем досліджено точність суміщення візирних осей в різних компоновках багатоканальних ОЕСС.*

78. Микитенко В.І. Підвищення ефективності функціонування оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням зображень / Микитенко В.І. // Третя Українська науково-технічна конференція «Спеціальне приладобудування: стан і перспективи» (4-5 грудня 2018 р.), КП СІБ «Арсенал». - Київ, 2018. - С. 55 - 58.

79. Mykytenko V. Dual-band surveillance imagers evaluation / Mykytenko V. // XVIII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». КПІ ім. Ігоря Сікорського, Приладобудівний факультет. - Київ, 2019. - С. 50 - 51.

## АНОТАЦІЯ

**Микитенко В.І. Підвищення ефективності функціонування оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням зображень.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.07 - оптичні прилади та системи. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Міністерство

освіти і науки України, Київ, 2020.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню важливої наукової проблеми підвищення ефективності функціонування багатоканальних оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням зображень шляхом створення методів узгодження характеристик основних блоків, механізму оцінювання ефективності функціонування систем і адаптивного вибору найкращого методу злиття зображень спектральних каналів, засобів експериментального визначення основних характеристик систем, що дозволяє покращити якість виконання поточної задачі спостереження оператором, підвищити максимальну дальність виявлення об'єктів в двоканальних системах до 12%, забезпечує збільшення динамічного діапазону вимірювання енергетичних характеристик до 2,5 разів.

**Ключові слова:** оптико-електронна система спостереження, комплексування зображень, критерії ефективності функціонування, радіометричне розділення, енергетичне калібрування, підвищення просторового розділення, малогабаритні приціли, зорове сприйняття.

### АННОТАЦИЯ

Микитенко В.И. **Повышение эффективности функционирования оптико-электронных систем наблюдения с комплексированием изображений.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.07 - оптические приборы и системы. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Sikорского», Министерство образования и науки Украины, Киев, 2020.

Диссертационная работа посвящена решению важной научной проблемы повышения эффективности функционирования многоканальных оптико-электронных систем наблюдения с комплексированием изображений путем создания методов согласования характеристик основных блоков, механизма оценки эффективности функционирования систем и адаптивного выбора наилучшего метода слияния изображений спектральных каналов, средств экспериментального определения основных характеристик систем, что позволяет улучшить качество выполнения текущей задачи наблюдения оператором, повысить максимальную дальность обнаружения объектов в двухканальных системах до 12%, обеспечивает увеличение динамического диапазона измерения энергетических характеристик до 2,5 раз.

**Ключевые слова:** оптико-электронная система наблюдения, комплексирование изображений, критерии эффективности функционирования, радиометрическое разрешение, энергетическая калибровка, повышение пространственного разрешения, малогабаритные прицелы, зрительное восприятие.

### ABSTRACT

Mykytenko V.I. **Improving the Efficiency of Optoelectronic Surveillance Systems with Image Fusion.** – Qualification scientific work manuscript copyright.

Thesis for a degree of Doctor of technical sciences in the Faculty of Instrumentation Engineering on speciality 05.11.07 - Optical Devices and Systems. – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to solving the scientific problem of increasing performance of optoelectronic surveillance systems (OESS) with image fusion by creating scientific bases and applied methods of analysis, synthesis and adjustment of information channels on a uniform methodological basis. The methodological bases for improving the OESS power consumption with image fusion are scientifically substantiated. They include the methods of constructive harmonization of the OESS's main units characteristics, the mechanism of the adaptive selection of the best method of spectral images merging, the means of experimental determination of the OESS main characteristics and allow increase performance of the system.

By information fusion from different channels, one can dramatically improve the quality of background status (BS) information. There is still no unified OESS design technology to analyze and synthesize the entire information system, to formulate technical requirements for individual blocks of spectral channels and algorithms for image fusion, taking into account the context of the observer's current task and type of BS. A number of problems remain to be solved with regard to improve the OESS performance by forming the image in operator's field of view, which content provides best solution to the current surveillance task.

An «object - OESS with image fusion – operator» mathematical model has been created. It allows analyze and design the OESS within a linear model. The formula for modulation transfer function of the “lens - detector” system of the aerospace OESS was obtained at arbitrary angles of view. It can be used to calculate the values of the lens pupil diameter, focal length of the lens and threshold irradiance of detector, which is required to achieve the given image contrast. Unified algorithm for estimation of spatial and energy properties of OESS spectral channels based on the targeting task performance (TTP) metric is offered. It allows to determine the main information channel in the OESS as the base for further fusion, as well as to coordinate the parameters of the input blocks of two-channel OESS.

The method of performance estimation of OESS with information fusion on the basis of a posteriori *TTP* metric is developed. The metric is determined numerically for the method of merging images on the resulting spatial spectrum of images. This method allows to investigate the features of the image fusion process and its visual perception by the operator. It allows you to calculate the probability of detection, recognition and identification of an object, which is observed by the OESS with image fusion.

A new method of reconciling the basic parameters of monoblock collimator and telescopic sights for small arms is proposed. Two variants of monoblock collimator sights with improved aiming accuracy are offered. The sight of two optical parts with different refractive index, glued on the plane, provides a linear aperture of the original pupil of the sight 0.276, with parallax 3 mrad. A monoblock collimator sight of two optical parts with different refractive index, glued on a spherical surface, at the same linear aperture of the original pupil and mass provides parallax of 1.25 mrad. A scheme of a decentralized telescopic monoblock is proposed, in which at a mismatch of 3 mrad the magnification can reach 1.6 times compared to 1.4 times for an axisymmetric scheme.

A new method for measuring OESS spectral channels basic energy characteristics has been developed. This method, compared to its analogues, increases the dynamic range up to 2.5 times with a high uniformity of the brightness field.

For the first time, the efficiency of the image fusion strategy, which allows to

increase the maximum detection range of objects in dual-channel OESS by up to 12%, was developed and experimentally validated. New methods of increasing the speed of information processing in multichannel OESS with image fusion are proposed. The first method uses the information map based on the low spatial resolution channel and the second method uses a digital coherent optical processor. The amount of computation in the first case can be reduced up to 2 times.

**Keywords:** optoelectronic surveillance system, image fusion, performance evaluation, radiometric resolution, measurement of energy characteristics, spatial resolution enhancement, small-scale sights, visual perception.