

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

В. Г. Колобродов, В. І. Микитенко

Тепловізійні оптико-електронні прилади

(теорія, приклади і задачі по проєктуванню тепловізорів)

Підручник

Затверджено Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як підручник для здобувачів ступеня магістра
за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2024

УДК 621.384.3
К 61

Автори: *Колобродов Валентин Георгійович*, д-р техн. наук, проф.
Микитенко Володимир Іванович, д-р техн. наук, проф.

Рецензенти: *Кондратенко С. В.*, д-р ф.-м. наук, проф., професор кафедри оптики КНУ імені Тараса Шевченка
Тягур В. М., д-р техн. наук, доцент, заступник начальника НТК КП СПБ «Арсенал»

Відповідальний редактор *Чиж І. Г.*, доктор техн. наук, проф.

Гриф надано Вченої радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол №2 від 05.02.2024 р.)

Колобродов В. Г.
К 61 Тепловізійні оптико-електронні прилади (теорія, приклади і задачі по проєктуванню тепловізорів) [Електронний ресурс] : підруч. для здобувачів ступеня магістра спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / В. Г. Колобродов, В. І. Микитенко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 202 с.

Розглянуто загальні принципи проєктування оптико-електронних систем спостереження інфрачервоного діапазону спектру. Викладено відомості щодо фізичних основ перетворення сигналів при дистанційних спостереженнях. Розглянуто моделювання основних ланок перетворення сигналів – фоно-цільової обстановки, оптичної системи, блоку приймача випромінювання, блоку електроніки, дисплея, спостерігача. Містить методи теоретичного визначення основних технічних та споживчих характеристик тепловізорів, в тому числі – поляриметричних тепловізорів. Для практичного засвоєння теоретичного матеріалу значну увагу приділено прикладам розв'язання типових задач, що виникають в ході проєктування інфрачервоних оптико-електронних систем спостереження. Може бути корисним студентам та фахівцям для набуття навичок проєктування та розрахунків тепловізійної техніки.

УДК 621.384.3

Реєстр. № П 23/24-022. Обсяг 11,2 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідectво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© В. Г. Колобродов, В.І. Микитенко 2024
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024

ЗМІСТ

Скорочення	6
Вступ.....	8
Розділ 1. Математичні основи перетворення сигналів	
в тепловізорах	11
1.1. Узагальнена модель тепловізійної системи спостереження	11
1.2. Методи перетворення оптичного зображення в електричний відеосигнал	15
1.3. Приклади розрахунку параметрів систем розкладення зображення	20
1.4. Математичні основи перетворення сигналів в ТПСС	22
1.4.1. Оптичні та електричні сигнали	23
1.4.2. Частотний аналіз детермінованих сигналів	24
1.4.3. Частотний аналіз випадкових сигналів	25
1.4.4. Лінійні системи	28
1.4.5. Оптична передавальна функція	29
1.4.6. Проходження детермінованих і випадкових сигналів через лінійну систему	30
1.5. Ймовірність виявлення сигналів на фоні шумів	31
1.5.1. Статистичні характеристики виявлення	31
1.5.2. Правила вибору рішення	32
1.5.3. Виявлення методом однократного відліку	32
1.5.4. Визначення порогового відношення сигнал/шум	35
1.6. Приклади розрахунку перетворення сигналів в ТПСС	37
Задачі для самостійного розв'язування	41
Розділ 2. Моделювання складових елементів тепловізорів	44
2.1. Узагальнені характеристики джерел випромінювання	44
2.1.1. Енергетичні характеристики об'єктів і фонів	46
2.1.2. Просторові характеристики об'єктів і фонів	47
2.1.3. Моделі об'єктів і фонів	48
2.1.4. Приклади розрахунку характеристик моделей об'єктів і фонів	49
2.2. Атмосфера	51
2.3. Оптична система	53
2.3.1. Основи габаритного розрахунку	53
2.3.2. Основи енергетичного розрахунку.....	54
2.3.3. Просторове розділення.....	55
2.3.4. Геометрична шумова смуга пропускання	60
2.3.5. Приклади розрахунку параметрів оптичних систем	62
2.4. Приймач випромінювання	65
2.4.1. Основні характеристики приймачів випромінювання	65
2.4.2. Модуляційна передавальна функція	67
2.4.3. Приклади розрахунку параметрів приймачів випромінювання	69
2.5. Електронний тракт обробки відеосигналів	70

2.6. Дисплей	72
2.7. Закони зорового сприйняття зображення	75
2.7.1. Основні характеристики процесу зорового сприйняття	75
2.7.2. Модуляційна передавальна функція зорової системи	77
2.7.3. Просторове та часове інтегрування зорової системи	77
2.7.4. Основи теорії сприйняття зображення на екрані дисплея	78
2.7.4.1. Ймовірність виявлення	79
2.7.4.2. Ймовірність розпізнавання	80
2.7.4.3. Приклади застосування законів зорового сприйняття під час проєктування ТПСС	82
Задачі для самостійного розв'язання	83
Розділ 3. Методи розрахунку узагальнених параметрів і характеристик тепловізорів	87
3.1. Узагальнені характеристики тепловізорів	87
3.1.1. Загальні положення і визначення	88
3.2. Методи розрахунку узагальнених характеристик ТПСС	93
3.2.1. Функція передачі сигналу	94
3.2.2. Передавальна функція	95
3.2.3. Еквівалентна шуму різниця температур	97
3.2.4. Мінімальна роздільна різниця температур	99
3.2.5. Приклади розрахунку узагальнених характеристик ТПСС	106
Задачі для самостійного розв'язання	115
Розділ 4. Основи проєктування класичних тепловізорів	117
4.1. Класичний енергетичний розрахунок ТПСС	117
4.1.1. Розрахунок дальності дії ТПСС у разі відсутності фону	118
4.1.2. Розрахунок дальності дії ТПСС у разі спостереження об'єкта на рівномірному фоні	120
4.2. Синтез оптичної системи ТПСС	122
4.2.1. Забезпечення температурного та просторового розділення....	122
4.2.2. Поле зору	125
4.3. Модель ТПСС з фотонним МПВ	126
4.3.1. Модель сигналу	126
4.3.2. Модель шуму	127
4.3.3. Відношення сигнал/шум	129
4.4. Приклади проєктування класичних тепловізорів	130
4.5. Методи розрахунку максимальної дальності виявлення і розпізнавання ТПСС	134
4.5.1. Стандарт НАТО для розрахунку максимальної дальності дії ТПСС	134
4.5.2. Загальне рівняння для розрахунку максимальної дальності дії ТПСС	137
4.5.3. Розрахунок максимальної дальності розпізнавання ТПСС, обмежених контрастом і шумами	139
4.5.3.1. Контрастно обмежені системи	140
4.5.3.2. Системи, обмежені шумом	141
4.5.4. Метод розрахунку граничної МДР	143
4.5.5. Ймовірність розрізнення цілі контрастно обмеженою	

тепловізійною системою безпілотного літального апарату	146
4.5.5.1. Особливості ТПСС для дронів	146
4.5.5.2. Контрастно обмежені тепловізори	147
4.5.5.3. Критерій Джонсона для оцінки ефективності ТПСС	149
4.5.5.4. Модуляційна передавальна функція тепловізора	154
4.5.5.5. Пороговий контраст сприйняття тепловізійного зображення	159
4.5.5.6. Алгоритм визначення відстані від цілі до ТПСС при виконанні завдання спостереження з певною ймовірністю на основі функцій $TPPF$ і $TRTPF$	161
4.5.6. Приклади розрахунку узагальнених характеристик класичних тепловізорів	162
4.5.6.1. Приклади розрахунку максимальної дальності дії ТПСС..	162
4.5.6.2. Приклад розрахунку ймовірності розрізнення цілі контрастно обмеженою ТПСС	166
Задачі для самостійного розв'язання	168
Розділ 5. Основи проєктування поляриметричних тепловізорів	173
5.1. Фізичні основи роботи ПТ	173
5.1.1. Принципи формування поляризаційного зображення	173
5.1.2. Поляриметричний метод виявлення цілі	176
5.1.3. Алгоритм отримання поляриметричних зображень за допомогою параметрів Стокса	179
5.1.4. Приклади розрахунку характеристик частково поляризованого випромінювання	180
5.2. Ймовірності виявлення і розпізнавання поляриметричних зображень об'єктів	181
5.2.1. Приклад розрахунку ймовірності	182
5.3. Поляриметрична модель теплоконтрастних об'єктів спостереження	186
5.3.1. Моделювання поляризації теплового випромінювання	186
5.3.2. Поляризаційний еліпс	190
5.4. Приклади розрахунку характеристик поляриметричного тепловізора	193
Задачі для самостійного розв'язання	196
Список використаної літератури	199

СКОРОЧЕННЯ

АЧТ	Абсолютно чорне тіло
АЦП	Аналого-цифровий перетворювач
БПЛА	Безпілотний літальний апарат
ЕШРТ	Еквівалента шуму різниця температур
ІЧ	Інфрачервона/ний
МДВ	Максимальна дальність виявлення
МДР	Максимальна дальність розпізнавання
МДС	Максимальна дальність спостереження
МПВ	Матричний приймач випромінювання
МБМ	Мікроболометрична матриця
МРРТ	Мінімальна роздільна різниця температур
МРРЯ	Мінімальна роздільна різниця яскравості
МПВ	Модуляційна передавальна функція
ОПФ	Оптична передавальна функція
ОС	Оптична система
ПФ	Передавальна функція
ПТ	Поляриметричний тепловізор
ПВ	Приймача випромінювання
ПЗЗ	Прилад з зарядовим зв'язком
ТПСС	Тепловізійна система спостереження
ФПФ	Фазова передавальна функція
ФЦО	Фоно-цільової обстановки
ФПС	Функція передачі сигналу
ФРТ	Функція розсіювання точки
CTF	Contrast Threshold Function
MDTD	Minimum Detectable Temperature Difference
MRLD	Minimum Resolvable Luminance Difference
MRTD	Minimum Resolvable Temperature Difference
MTF	Modulation Transfer Function
NEI	Noise Equivalent Irradiance
NEP	Noise Equivalent Power
NETD	Noise Equivalent Temperature Difference
NPS	Noise Power Spectrum
OTF	Optical Transfer Function
PSF	Point Spread Function

SiTF	Signal Transfer Function
SN	Special noise
TRTPF	Target Rang Transfer Probability Function
TTPF	Target Transfer Probability Function
TTP	Targeting Task Performance
TN	Time noise

ВСТУП

Теплобачення, інфрачервона (ІЧ) техніка й оптоелектроніка є галузями високих «критичних» технологій. Рівень їх розвитку безпосередньо пов'язаний з економічним потенціалом та обороноздатністю держави. Сучасні тепловізійні системи спостереження (ТПСС) широко застосовують для пошуку, виявлення та розпізнавання об'єктів у просторі на граничній дальності, та вимірювання їх параметрів, таких як просторові координати, швидкість руху і розміри [1 – 4]. В останні роки ТПСС отримали новий розвиток, який має революційний характер і пов'язаний зі створенням неохолоджуваних ІЧ матричних приймачів випромінювання (МПВ) [5].

Триває інтенсивний розвиток теорії і методів проєктування ТПСС, що пов'язано не тільки з удосконаленням їх елементної бази, а і з необхідністю враховувати сукупність нових факторів. Це, наприклад, різке збільшення обсягу інформації, яку необхідно обробляти в реальному масштабі часу, особливості просторової і часової вибірки високого розділення тощо.

Провідні в науково-технічному розвитку країни постійно збільшують витрати на дослідження в галузі тепловізійної техніки різного призначення. Особливий пріоритет мають оптико-електронні системи військового призначення. Наприклад, у 2023 році у світі у створення таких систем було інвестовано 13,22 мільярдів доларів, а прогноз на 2028 рік становить 22,87 мільярдів доларів [6].

У цьому підручнику наведені теоретичні основи, приклади і задачі з проєктування ТПСС різного призначення, оскільки у цих систем є спільна основа. Вона базується на перетворенні енергії випромінювання від об'єкта спостереження в електричний сигнал з подальшою його обробкою і створенні зображення на екрані дисплея, яке сприймає спостерігач (оператор). Процес виявлення об'єкта може здійснювати безпосередньо оператор на екрані дисплея, або відбуватись автоматично шляхом відповідної обробки відеосигналу. Попри активне впровадження в останній

час автоматичних систем обробки зображення, необхідно визнати, що людина-оператор за умови наявності достатнього часу на прийняття рішення справляється з задачею виявлення та особливо розпізнавання об'єктів значно краще автоматичних пристроїв. Тому задача розробки ТПСС, в яких кінцевим ланцюгом прийняття рішень є оператор – надзвичайно актуальна. Особливо це стосується тепловізорів для розвідки, виявлення, розпізнавання і прицілювання у військовій справі.

ТПСС складаються, як правило, із таких основних елементів: оптичної системи (ОС) у вигляді ІЧ об'єктива, приймача випромінювання (ПВ), блоків аналогової та цифрової обробки відеосигналу і дисплея. Складність перетворення інформації від об'єктів і фонів до очей оператора зумовлює необхідність розглядати ТПСС на рівні спільного системного підходу з використанням методів аналізу лінійних інваріантних оптико-електронних систем, викладених у підручниках і монографіях [1 – 4, 7].

Досить докладно розглянуто одну із найважливіших характеристик ТПСС – максимальну дальність дії, що залежить від багатьох факторів як самої системи, так і навколишнього середовища. Процес сприйняття зображення оператором має ймовірнісний характер. Тому ТПСС можна також характеризувати максимальною дальністю виявлення та максимальною дальністю розпізнавання об'єктів при заданій ймовірності або ймовірністю виявлення та розпізнавання.

Підручник написано на основі лекцій для магістрів і аспірантів по дисциплінам «Тепловізійні оптико-електронні прилади» і «Оптико-електронні системи спостереження», які викладаються в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» для підготовки фахівців з проєктування оптико-електронних систем, автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій. При написанні підручника використано матеріали підручників Колобродова В. Г., Шустера Н. «Тепловізійні системи (фізичні основи, методи проєктування і контролю, застосування)» і Колобродова В.Г., Лихоліта М.І. «Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження», а також багаторічний досвід авторів створення оптичних та оптико-електронних приладів спостереження різного призначення на провідних підприємствах України: Казенному підприємстві СПБ Арсенал, НДІ

«Квант», НВК «Фотоприлад», ДП «Київський радіозавод». Додано новий розділ стосовно поляриметричних тепловізорів, які раніше не розглядались у вітчизняній навчальній літературі.

Підручник буде корисним для магістрів і аспірантів, які здобувають освіту у напрямку комп'ютерно-інтегрованих технологій, стане у нагоді науково-інженерним працівникам оптичного та електронного приладобудування, фахівцям з технічного зору.

РОЗДІЛ 1. МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ В ТЕПЛОВІЗОРАХ

1.1. Узагальнена модель тепловізійної системи спостереження

Узагальнену модель ТПСС показано на рис. 1.1 [1, 8]. Випромінювання від об'єкта спостереження і фону проходить через атмосферу і потрапляє в ОС ТПСС. Оптична система формує зображення об'єкта і фону в площині приймача випромінювання (ПВ). У ПВ потік випромінювання перетворюється в електричний відеосигнал, який після підсилення надходить до пристроїв аналогової та цифрової обробки. Після необхідних перетворень відеосигнал надходить до дисплея, на екрані якого формується видиме зображення об'єкта та фону, що сприймається оператором.

Основним завданням ТПСС є перетворення невидимого ІЧ випромінювання теплоконтрастних об'єктів спостереження в аналог видимого зображення на екрані дисплея для їх виявлення, розпізнавання та дослідження.

Оскільки теплове зображення формується, в основному, за рахунок власного випромінювання об'єктів та фонів, які мають різний розподіл по поверхні температури та коефіцієнта випромінювання, то воно істотно відрізняється від свого аналога у видимій області спектру. Наприклад, теплове зображення не має тіней, що ускладнює просторове зорове сприйняття об'єктів. Крім того, для більшості об'єктів і фонів відсутній взаємозв'язок між коефіцієнтом відбивання та температурним полем і коефіцієнтом випромінювання. Однак теплове поле звичайно відповідає формі та розмірам об'єкта, що дозволяє розпізнавати об'єкти по їхнім контурам.

Розглянемо детальніше основні елементи узагальненої моделі ТПСС. *Об'єктами спостереження* є джерела випромінювання, що формують сигнал головним чином внаслідок власного теплового випромінювання. Усі тіла з температурою вище абсолютного нуля є джерелами теплового випромінювання. Різниця між розподілом температури і коефіцієнтом

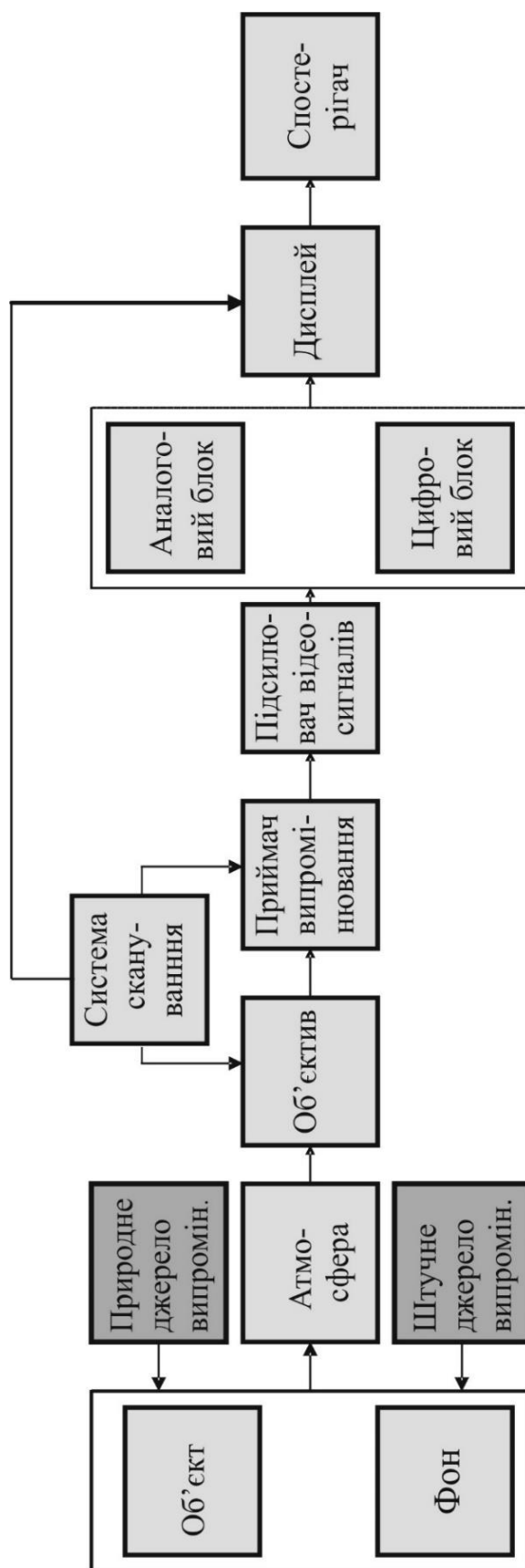


Рис. 1.1. Узагальнена модель ТІСС

випромінювання по поверхні об'єктів і на фонах утворює випромінювання, що містить інформацію про об'єкт спостереження.

Об'єкти і фони характеризуються просторовими (геометричні розміри, форма, положення у просторі), енергетичними (поверхнева енергетична густина випромінювання), поляризаційними параметрами. Для об'єктів ці параметри описують детермінованими функціями, а для фонів – випадковими.

Атмосфера є середовищем між об'єктом спостереження та ТПСС. В атмосфері потік випромінювання від об'єктів і фонів змінюється внаслідок поглинання, розсіювання, фазових викривлень хвильового фронту. При цьому відбуваються зміни як енергетичних, так і просторових характеристик випромінювання.

Основними елементами *оптичної системи* є об'єктив і система сканування. *Об'єктив* формує зображення об'єктів і фонів у площині ПВ у заданому спектральному діапазоні. Вимоги до світлосили об'єктива та якості зображення визначені завданнями, які вирішує ТПСС. Під час проєктування об'єктива завжди доводиться шукати компромісне рішення для створення простого приладу, який забезпечує потрібну світлосилу та якість зображення. Світлосила об'єктива визначає енергетичне розділення ТПСС, а його аберації – просторове розділення.

Система сканування призначена для перетворення двовимірного розподілу освітленості зображення в одновимірний потік випромінювання, який надходить на ПВ. Її будують залежно від типу ПВ (одноелементний, лінійний або матричний) та завдань, які вирішує ТПСС. Системи сканування бувають з оптико-механічною та електронною розгорткою зображення, з паралельним та послідовним принципом розкладення двовимірного оптичного сигналу в одновимірний сигнал.

Приймач випромінювання (ПВ, detector) – це основний елемент, який визначає можливості ТПСС і перетворює світлову енергію в електричний сигнал. Існують різні визначення ПВ, проте усі вони відзначають головну його властивість – здатність виявляти наявність випромінювання шляхом перетворення його в електричну енергію з наступною реєстрацією. ПВ класифікують головним чином за такими ознаками: видом енергії, в яку перетворюється випромінювання; характером зміни чутливості зі зміною

довжини хвилі приймального випромінювання; областю спектру, де вони є найбільш чутливими або застосовуються; робочою температурою чутливої площадки; кількістю, розмірами, розташуванням чутливих елементів (пікселів).

Пристрої аналогової і цифрової обробки підсилюють досить слабкий вихідний електричний сигнал ПВ, виділяють необхідну інформацію із суміші корисного сигналу від об'єкта і шуму та перетворюють сигнал для подальшого відображення на екрані дисплея. Основними характеристиками підсилювача є коефіцієнт підсилення, смуга пропускання, рівень власних шумів. Основними видами аналогової обробки є спектральна фільтрація, гамма-корекція та апертурна корекція, реверсування контрасту тощо. Основними видами цифрової обробки є перетворення аналогового відеосигналу у цифрову форму, обробка цифрового сигналу (додавання та віднімання кадрів, псевдокольорове кодування, оконтурювання зображення об'єктів, зміна масштабу, визначення координат об'єкта тощо) та перетворення його в аналогову форму.

Дисплей (монітор, відеооглядовий пристрій) призначений для перетворення часового електричного сигналу у просторове розподілення яскравості екрана у видимій області спектру, що відповідає розподілу яскравості у площині об'єктів. Основним елементом перетворення в дисплеї можуть бути матриці світлодіодів або рідинних кристалів та ін. Необхідно також відзначити, що формування зображення в дисплеї і робота системи розгортки зображення відбуваються синхронно.

Спостерігач (оператор) – це споживач інформації, створеної на екрані дисплея. Сприйняття оператором інформації залежить від параметрів зображення на екрані дисплея (середньої яскравості, контрасту, розмірів екрана, спектрального складу випромінювання, швидкості руху зображення об'єкта та ін.) та умов спостереження (відстані до екрана, яскравості довколишнього фону, вібрацій дисплея та ін.). Спостерігач використовує власний досвід і кваліфікацію у розшифровці тепловізійних зображень для виявлення та розпізнавання об'єктів.

Хоч розглянута узагальнена модель ТПСС є тривіальною для фахівців оптико-електронного приладобудування, проте недостатнє врахування процесів перетворення інформації в окремих елементах системи може

викликати серйозні помилки під час проектування ТПСС. Важливо також відзначити, що створення достатньо якісної системи можливе лише за умови врахування основних параметрів усіх ланцюгів ТПСС, у тому числі параметрів і характеристик об'єктів спостереження, завад, фонів, атмосфери, а також оператора-спостерігача.

1.2. Методи перетворення оптичного зображення в електричний відеосигнал

Процес перетворення двовимірного оптичного сигналу в одновимірний електричний сигнал можна реалізувати двома основними способами. Перший використовують у тепловізорах з оптико-механічною системою сканування, а другий – у тепловізорах з електронною розгорткою.

Об'єкти формують зображення об'єкта у площині матричного приймача випромінювання (МПВ), який має велику кількість пікселів. Під дією випромінювання кожен піксель формує електричний сигнал, пропорційний освітленості зображення. Цей сигнал послідовно зчитується за допомогою електронної системи сканування, у результаті на виході утворюється відеосигнал. Після підсилення і обробки цей відеосигнал надходить до дисплея, де відбувається його перетворення у зображення на екрані. Процес формування зображення відбувається як результат послідовного підключення елемента екрана до відеосигналу, синхронно з розгорткою зображення. Тому яскравість елемента екрана пропорційна величині миттєвого значення відеосигналу, а значить і яскравості відповідного елемента об'єкта спостереження.

Зображення у фокальній площині об'єктива $x'y'$ подамо у вигляді матриці, яка складається з вертикальних стовпців та горизонтальних рядків. Вважатимемо, що в межах кожного елемента матриці (елемента розкладання, пікселя) розміром $V_D \times W_D$ потік випромінювання є рівномірним як за поверхневою густиною, так і за спектральним складом. Тоді кутовий розмір пікселя, а отже і величина миттєвого поля зору, дорівнюватиме (рис. 1.2)

$$\alpha_D = \frac{V_D}{f'_0}; \beta_D = \frac{W_D}{f'_0}, \quad (1.1)$$

де f'_o – задня фокусна відстань об'єктива.

Миттєве поле зору ТПСС зазвичай вимірюють у мілірадіанах або кутових мінутах.

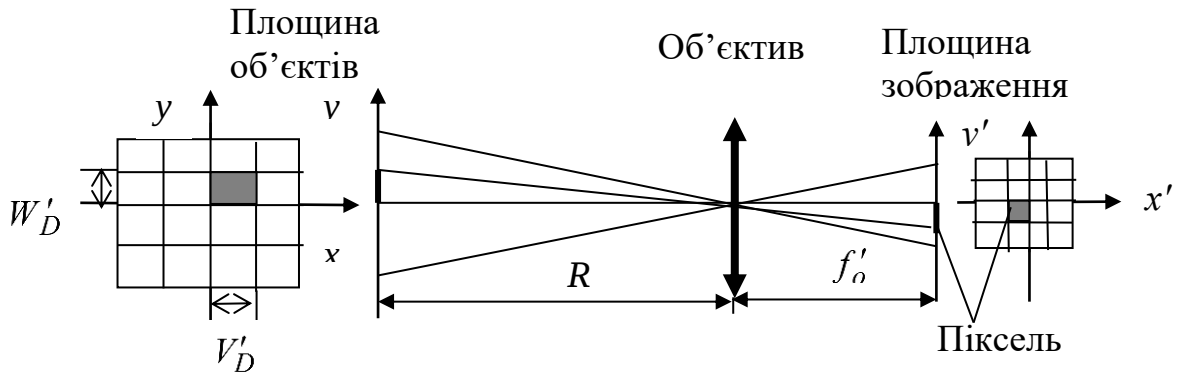


Рис. 1.2. Схема просторового розкладання зображення на окремі пікселі в ТПСС

Наведемо ряд визначень [9]. Формування та передачу інформації про кожен піксель називають *розгорткою* (скануванням) зображення. Зображення, отримане в результаті одноразового відображення усіх пікселів, називають *кадром*. Геометричну криву, утворену послідовною передачею пікселів називають *траєкторію розгортки*, а структуру поля зображення, утворену в результаті розгортки, називають *растром*. Залежно від траєкторії розгортки растри поділяють на лінійні, точкові, спіральні тощо. За лінійної траєкторії розгортки растром є сукупністю *рядків*.

Для прямокутного раstra відношення ширини V' зображення до його висоти W' називають *форматом кадру*

$$k_f = \frac{V'}{W'}. \quad (1.2)$$

Важливим параметром, який характеризує швидкість передачі зображення, є число кадрів, що передається (або поновлюється) за одиницю часу, або *частота кадрів* f_f .

Максимальне число пар темних і світлих точок, яке може сформувати ТПСС в одному кадрі з N елементами розкладання, дорівнює $N/2$. Для того, щоб розгледіти на екрані зображення двох відокремлених точок, спостерігач має бачити їх під кутом зору ω_E , який є більшим від мінімального кутового розділення ока $\delta\omega_E$. При максимальному використанні роздільної здатності ока вважається, що $\omega_E = 2\delta\omega_E$ [9].

Очевидно, що для відображення на екрані двох близько розміщених точок зображення, необхідно сформувати зображення не тільки цих точок, але й просвіт між ними (рис. 1.3).

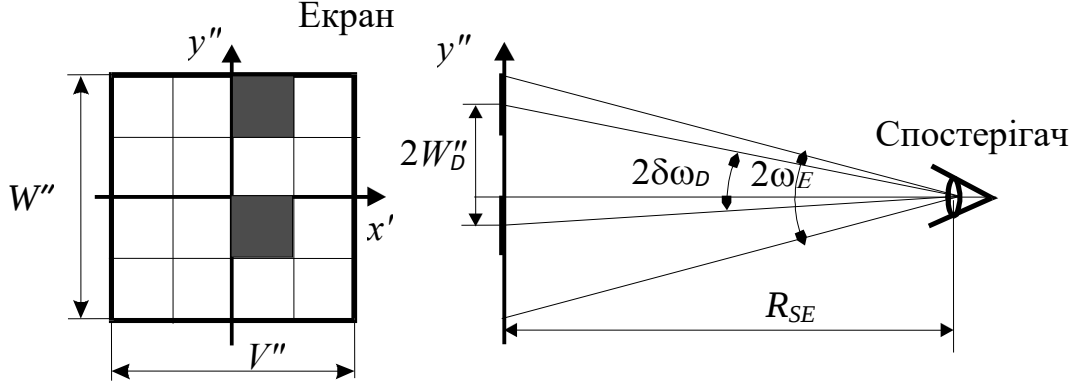


Рис. 1.3. До визначення оптимальної відстані спостереження

Відстань між центрами цих точок на екрані дорівнює подвійному розміру пікселя $2W_D''$ в лінійній мірі або $2\delta\omega_E$ в кутовій мірі. Експериментальні дослідження свідчать, що спостерігач зазвичай обирає таку відстань до екрана, за якої кутова відстань між двома рядками дорівнює одній кутовій хвилині, тобто $\delta\omega_E = 1'$. Тоді максимальна кількість елементів по висоті кадру W'' (кількість рядків лінійної розгортки) в полі зору $2\omega_E$, становить

$$q_{\max} = \frac{2\omega_E}{\delta\omega_E}. \quad (1.3)$$

Слід зазначити, що формула (1.3) є досить умовною, оскільки в разі зміни відстані R_{SE} від екрана до спостерігача кут поля зору також змінюється

$$2\omega_E = 2\arctg \frac{W''}{2R_{SE}}. \quad (1.4)$$

Загальна кількість елементів у кадрі дорівнює

$$N = p \times q = k_f q^2. \quad (1.5)$$

Оптимальну відстань спостереження зображення R_{SE} , згідно з рис. 1.3 і формулою (1.4), можна визначити за формулою

$$R_{SEopt} = \frac{1}{2} W'' \operatorname{ctg} \omega_E = \frac{1}{2} W'' \operatorname{ctg} \frac{q\delta\omega_E}{2}. \quad (1.6)$$

Тоді, наприклад, для $\delta\omega_E = 1'$ і $q = 575$ маємо $R_{SEopt} = 6W''$.

Розглянемо методи перетворення оптичного зображення в електричний відеосигнал.

Розгортки бувають детермінованими, коли траєкторія руху елемента розгортки є чітко визначеною та наперед заданою, і недетермінованими, коли напрям руху елемента розгортки автоматично встановлюється залежно від змісту зображення [9]. Найчастіше використовують лінійні рядкові розгортки. В них переміщення елемента розкладання здійснюється з постійною швидкістю уздовж паралельних рядків.

Для реалізації лінійної розгортки в сучасних ТПСС використовують кілька методів [4]:

- двовимірне сканування одно елементним ПВ;
- паралельне сканування лінійкою ПВ;
- послідовне сканування лінійкою ПВ;
- послідовно-паралельне сканування МПВ;
- електронне сканування.

Розглянемо докладніше двовимірне сканування одно елементним ПВ. Нехай одно елементний ПВ має чутливу площадку розміром $V_D \times W_D$, а об'єktiv формує зображення у межах лінійного поля зору $V' \times W'$ (рис. 1.4).

Очевидно, що кутове поле зору у просторі зображення визначається аналогічно (1.4) як

$$2\omega_x = 2\arctg \frac{V'}{2f_o}; \quad 2\omega_y = 2\arctg \frac{W'}{2f_o}. \quad (1.7)$$

Розгортка є періодичним процесом. Під час повернення рядкової і кадрової розгортки у початкове положення (так званий *зворотній хід рядкової і кадрової розгортки*) система сканування не бере участі у формуванні зображення і частина часу втрачається. Цю частину відносно періоду кадрової t_f та рядкової t_l розгортки позначають через $1 - \eta_f$ та $1 - \eta_l$. Коефіцієнти η_l та η_f визначають ефективність рядкової та кадрової розгортки. Величину

$$\eta_{sc} = \eta_f \eta_l \quad (1.8)$$

називають *коефіцієнтом використання розгортки*. Тоді активний час, протягом якого формується повний кадр,

$$t_a = t_f \eta_{sc}, \quad (1.9)$$

де $t_f = \frac{1}{f_f}$ – період кадрової розгортки.

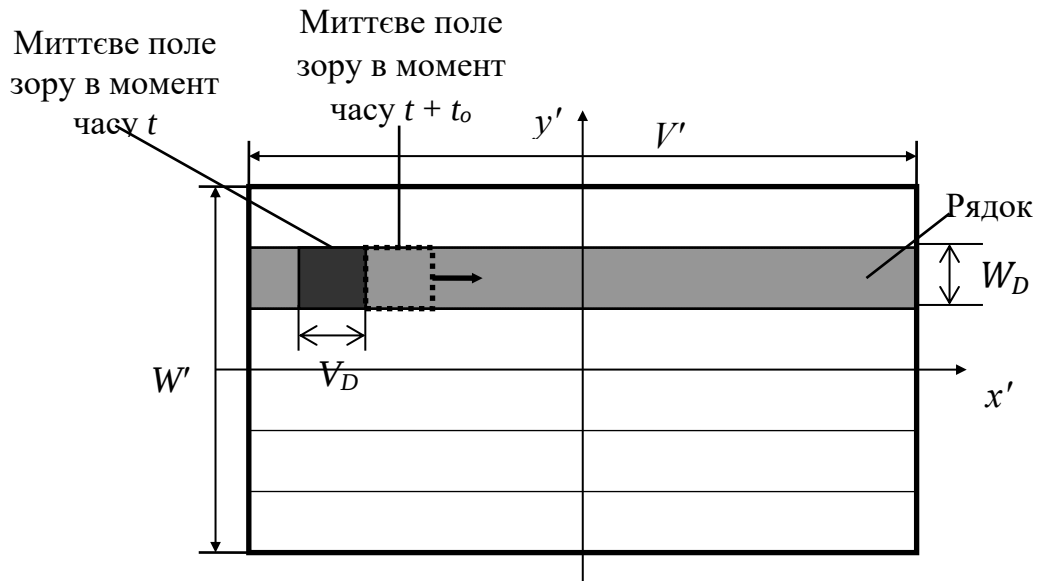


Рис. 1.4. Двовимірне сканування одно елементним ПВ

Наприклад, аналоговий телевізійний стандарт SECAM має такі параметри: число рядків у растрі $q = 625$; формат кадру $k_f = 4:3$; частота кадрів $f_f = 25$ Гц; коефіцієнт використання розгортки $\eta_{sc} = \eta_f \eta_l = 0,82 * 0,92 = 0,7544$. Важливий параметр, який характеризує сканування, – *час розкладення одного елемента* t_0 – визначають часом знаходження точки зображення у межах миттєвого поля зору (рис. 1.4). Визначимо величину t_0 , виходячи з умови, що відстань між сусідніми рядками дорівнює вертикальному розміру миттєвого поля зору W_D або β_D . У межах активної частини формування растру у вертикальному напрямі розміщується $q = \frac{2\omega_y}{\beta_D}$ елементів розкладення (рядків), а в горизонтальному напрямі – $p = \frac{2\omega_x}{\alpha_D}$ елементів (стовпців). Величину $q=q_a$ називають *числом активних рядків у растровому зображенні*.

Загальна кількість активних елементів розкладання зображення становить

$$N_a = pq = \frac{2\omega_x 2\omega_y}{\alpha_D \beta_D}. \quad (1.10)$$

Причому це число елементів формується за час t_a , який визначають формулою (1.9). Тоді час формування одного елемента дорівнює

$$t_o = \frac{t_a}{N_a} = \frac{\alpha_D \beta_D \eta_{sc} t_f}{2\omega_x 2\omega_y}. \quad (1.11)$$

Для передачі синусоїдального розподілу яскравості з найменшим періодом потрібно використовувати щонайменше два елементи розкладення (для передачі світлої та темної ділянок), тобто мінімально можливий часовий період такого розкладання буде рівний $2t_o$. Тому потрібну смугу пропускання системи (відео підсилювача) можна оцінити за формулою

$$\Delta f = f_{\max} - f_{\min} \approx f_{\max} = \frac{1}{2t_o} = \frac{2\omega_x 2\omega_y f_f}{2\alpha_D \beta_D \eta_{sc}}, \quad (1.12)$$

де $f_{\max}$ і $f_{\min}$ – верхня і нижня граничні частоти відео підсилювача відповідно.

Для інших реалізацій лінійної розгортки формула (1.12) має вигляд [4]:

- для паралельного сканування лінійкою ПВ

$$\Delta f = \frac{2\omega_x 2\omega_y f_f}{2q_D \alpha_D \beta_D \eta_{sc}}, \quad (1.13)$$

де q_D – число пікселів у лінійці ПВ;

- для послідовного сканування лінійкою ПВ

$$\Delta f = \frac{2\omega_x 2\omega_y f_f}{2p_D \alpha_D \beta_D \eta_{sc}}, \quad (1.14)$$

де p_D – число пікселів у лінійці ПВ;

- для послідовно-паралельного сканування матричним МПВ прямокутної форми

$$\Delta f = \frac{2\omega_x 2\omega_y f_f}{2q_D \alpha_D \beta_D \eta_{sc}}, \quad (1.15)$$

де $p_D \times q_D$ – формат матриці;

- для електронного сканування (в повноформатних МПВ)

$$\Delta f \approx f_{\max} = \frac{1}{2} f_d = \frac{p_D q_D f_f}{2\eta_{sc}}, \quad (1.16)$$

де f_d – тактова частота зчитування.

1.3. Приклади розрахунку параметрів систем розкладання зображення

Приклад 1.1. Визначте оптимальні розміри екрана дисплея тепловізора, встановленого перед оператором на відстані 500 мм, який

використовує МПВ квадратної форми форматом 320×240 пікселів. При цьому електронне збільшення тепловізора дорівнює одиниці.

Розв'язання. Розглянемо рис. 1.2. Оптимальний розмір екрана визначають із умови, щоб кутова відстань між двома елементами розкладення зображення на екрані монітора α_D'' дорівнювала кутовому розділенню ока $\delta\omega_E$, тобто

$$\frac{V_D''}{R_{SEopt}} = \delta\omega_E.$$

Розмір екрана по горизонталі $V'' = V_D'' p_D$. Звідси

$$V_{opt}'' = R_{SEopt} \delta\omega_E p_D = 50 \frac{\pi}{180 \cdot 60} 320 = 47 \text{ мм.}$$

Оптимальний розмір екрана по вертикалі визначають форматом матриці

$$W_{opt}'' = V_{opt}'' \frac{q_D}{p_D} = 47 \frac{240}{320} = 35 \text{ мм.}$$

Приклад 1.2. ТПСС «VAMPIR MB» фірми SAT (Франція) використовує круговий послідовно-паралельний метод сканування МПВ і має поле зору $2\omega_x \times 2\omega_y = 360^\circ \times 4^\circ$. Частота кадрів (частота кругового обертання) $f_f = 1$ Гц. Число рядків у растрі $q = 288$. Матричний приймач випромінювання форматом $p_D \times q_D = 4 \times 288$ має розміри матриці $X_D \times Y_D = 0,383 \times 8,064 \text{ мм}^2$ і одного пікселя $V_D \times W_D = 25 \times 28 \text{ мкм}^2$. Визначте фокусну відстань об'єктива ТПСС і параметри розкладення зображення.

Розв'язання. 1. Визначимо фокусну відстань об'єктива, використовуючи рис. 1.2. Із умови прикладу маємо, що число рядків у зображенні $q = 288$ дорівнює числу пікселів у МПВ $q_D = 288$. Це означає відсутність кадрової розгортки у системі сканування. Тоді вертикальне кутове поле зору $2\omega_y = 4^\circ$ визначається відповідним розміром МПВ $W' = Y_D = 8,064 \text{ мм}$. Із формули (1.7) знаходимо, що

$$f_o' = \frac{W'}{2\text{tg}\omega_y} = \frac{8,064}{2\text{tg}2^\circ} = 116 \text{ мм.}$$

2. Смугу пропускання відео підсилювача визначаємо за формулою (1.15)

$$\Delta f = \frac{2\omega_x 2\omega_y f_f}{2q_D \alpha_D \beta_D \eta_{sc}},$$

де із умови прикладу відомі $2\omega_x \times 2\omega_y = 360^\circ \times 4^\circ$, $f_f = 1$ Гц, $q_D = 288$.
Очевидно, що за кругового сканування ефективність розгортки $\eta_{sc} \approx 1$.

Кутові розміри пікселя МПВ визначаємо за формулою (1.1)

$$\alpha_D = \frac{V_D}{f'_o} = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{116} = 0,216 \text{ мрад} = 12,4 \cdot 10^{-3} \text{ град};$$

$$\beta_D = \frac{W_D}{f'_o} = \frac{28 \cdot 10^{-3}}{116} = 0,241 \text{ мрад} = 13,8 \cdot 10^{-3} \text{ град}.$$

Тоді

$$\Delta f = \frac{360 \cdot 4}{2 \cdot 288 \cdot 12,4 \cdot 10^{-3} \cdot 13,8 \cdot 10^{-3}} = 14,6 \text{ кГц}.$$

3. Час розкладення одного елемента зображення знаходимо із формули (1.12)

$$t_o = \frac{1}{2\Delta f} = \frac{1}{2 \cdot 14,6 \cdot 10^3} = 3,42 \cdot 10^{-5} \text{ с}.$$

4. Число елементів розкладення зображення знаходимо за формулою (1.10)

$$N_a = pq = \frac{360 \cdot 4}{12,4 \cdot 10^{-3} \cdot 13,8 \cdot 10^{-3}} = 8,4 \cdot 10^6.$$

Таким чином, ТПСС повинна мати об'єктив із фокусною відстанню $f'_o = 116$ мм і систему сканування, що має параметри: $f_f = 1$ Гц; $q = 288$; $N_a = 8,4 \cdot 10^6$; $2\omega_x \times 2\omega_y = 360^\circ \times 4^\circ$; $t_o = 34,2$ мкс; $\Delta f = 14,4$ кГц.

1.4. Математичні основи перетворення сигналів в ТПСС

Під час проєктування ТПСС часто виникає потреба в математичному моделюванні системи з метою визначення просторого й енергетичного розділення та оцінки якості зображення. Таке моделювання дозволяє аналізувати, оптимізувати і синтезувати ТПСС для отримання її заданих узагальнених характеристик. У цьому підрозділі розглядаються математичні основи теорії перетворення сигналів в ТПСС від об'єкта спостереження до очей спостерігача.

1.4.1. Оптичні та електричні сигнали

У підрозділі 1.1 було показано, що при дистанційних спостереженнях в інформаційній системі, що містить ТПСС, відбуваються такі перетворення сигналів: випромінювання від об'єкта і фону проходить через атмосферу і потрапляє до вхідної зіниці об'єктива; об'єктив формує зображення (розподіл освітленості) у площині ПВ; система сканування перетворює двовимірний розподіл освітленості в одновимірний часовий потік випромінювання; ПВ перетворює це випромінювання в електричний сигнал; електронні пристрої здійснюють необхідні перетворення сигналу і шуму ПВ; дисплей перетворює часовий електричний сигнал у просторовий розподіл яскравості на екрані; спостерігач сприймає світловий потік з екрана дисплея. Отже відбувається перетворення сигналів як в оптичній, так і електричній формах.

Оптичним сигналом будемо називати функцію $f(x, y, z; t)$, яка характеризує залежність будь-якого параметра оптичного випромінювання (яскравості, світності, освітленості, стану поляризації) від просторових координат x, y, z і часу t . Оскільки в ТПСС найчастіше розглядають розподіл випромінювання у площині, який повільно змінюється з часом, то під оптичним сигналом надалі будемо розуміти функцію $f(x, y)$ двох змінних x, y . При цьому третя координата z визначає відстань R від об'єкта до ТПСС.

Під *електричним сигналом* будемо розуміти функцію $f(t)$, яка характеризує залежність напруги або струму від часу t .

Усі оптичні та електричні сигнали можна розділити на детерміновані (регулярні) та випадкові. До *детермінованих сигналів* належать такі, значення яких є точно відомими і які можуть бути задані точними функціональними залежностями. До них, наприклад, відносяться оптичні та електричні сигнали, сформовані об'єктами. *Випадкові сигнали* описують функціями, значення яких у довільній точці простору або часу передбачити неможливо. До них належать, наприклад, оптичні та електричні сигнали, сформовані завадами, а також власними шумами елементів ТПСС.

Під час аналізу детермінованих сигналів досліджують їх властивості

у кожній точці, а під час аналізу випадкових сигналів визначають їх статистичні характеристики.

1.4.2. Частотний аналіз детермінованих сигналів

Частотний аналіз (Фур'є-аналіз, спектральний аналіз) є зручним математичним апаратом для дослідження проходження сигналів через лінійні системи. Розглянемо частотний аналіз на прикладі двовимірної детермінованої функції $f(x, y)$, яка може бути подана інтегралом Фур'є:

$$f(x, y) = F^{-1}\{\tilde{f}\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{f}(v_x, v_y) \exp[j2\pi(xv_x + yv_y)] dv_x dv_y, \quad (1.17)$$

де

$$\tilde{f}(v_x, v_y) = F\{f\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp[-j2\pi(v_x x + v_y y)] dx dy - \quad (1.18)$$

просторовий спектр (Фур'є-спектр, просторовий спектр) функції $f(x, y)$;

$F^{-1}\{\quad\}$ і $F\{\quad\}$ – оператори зворотного та прямого перетворення Фур'є;

v_x, v_y – просторові частоти, мм^{-1} .

Для спрощення розрахунку спектра $\tilde{f}(v_x, v_y)$ використовують кілька теорем, які є наслідками (1.18). Деякі з цих теорем (для одновимірного випадку) наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Основні властивості перетворення Фур'є

Теорема	Вихідна функція $f(x)$	Спектр функції $F(v_x) = F\{f(x)\}$
1. Теорема лінійності	$af(x)$	$a\tilde{f}(v_x)$
2. Теорема подібності	$f(ax)$	$\frac{1}{a}\tilde{f}\left(\frac{v_x}{a}\right)$
3. Теорема зсуву	$f(x - a)$	$\tilde{f}(v_x) \exp(-j2\pi a v_x)$
4. Теорема згортки	$\int_{-\infty}^{\infty} f_1(\xi) f_2(\xi - x) d\xi$ $f_1(x) f_2(x)$	$\tilde{f}_1(v_x) \tilde{f}_2(v_x)$ $\int_{-\infty}^{\infty} \tilde{f}_1(\xi) \tilde{f}_2(\xi - v_x) d\xi$
5. Інтегральна теорема Фур'є	$F^{-1}\{f(x)\}$	$f(x)$

Функцію двох незалежних змінних називають *функцією з роздільними змінними* у певній системі координат, якщо її можна подати у вигляді добутку двох функцій, кожна з яких залежить тільки від однієї змінної.

У декартовій (прямокутній) системі координат функція $f(x, y)$ є функцією з роздільними змінними, якщо

$$f(x, y) = f_1(x)f_2(y). \quad (1.19)$$

Перетворення Фур'є від такої функції

$$\tilde{f}(v_x, v_y) = F\{f\} = F_1(v_x)F_2(v_y). \quad (1.20)$$

У полярній системі координат r, θ функцію $f(r, \theta)$ називають *вісесиметричною*, якщо

$$f(r, \theta) = f(r). \quad (1.21)$$

Для вісесиметричних функцій перетворення Фур'є (1.18) має вигляд

$$\tilde{f}(v_r) = 2\pi \int_0^\infty f(r)J_0(2\pi v_r r)rdr, \quad (1.22)$$

де J_0 – функція Бесселя першого роду нульового порядку.

Формула (1.22) називається *прямим перетворенням Фур'є-Бесселя*. *Зворотне перетворення Фур'є-Бесселя* має вигляд

$$f(r) = 2\pi \int_0^\infty \tilde{f}(v_r)J_0(2\pi v_r r)v_r dv_r. \quad (1.23)$$

Оскільки перетворення Фур'є-Бесселя є частковим випадком перетворення Фур'є, то для нього справедливі всі теореми, наведені у табл. 1.1.

1.4.3. Частотний аналіз випадкових сигналів

У ТПСС відбувається одночасне перетворення як детермінованих сигналів від об'єктів, так і випадкових сигналів від завад або шумів. Для реєстрації або спостереження сигналів за наявності шумів необхідна наявність попереднього знання відмінних ознак сигналу і шуму. Використання цих ознак дозволяє розв'язати задачу виявлення та розпізнавання об'єктів. Звичайно відповідь матиме ймовірнісний характер. Тобто завжди існує певна ймовірність і помилкового рішення. Це пов'язано з тим, що будь-яка ознака або властивість певною мірою властиві як сигналу, так і шуму.

На відміну від детермінованих сигналів, значення яких визначені однозначно, випадкові сигнали можуть приймати те чи інше значення, яке

заздалегідь неможливо передбачити. На прикладі одновимірних сигналів розглянемо математичні методи представлення шуму, потім основні властивості та поняття розповсюдимо на двовимірні оптичні випадкові сигнали.

Після того, як випадкова функція $f(t)$, яка у довільний момент часу t може набувати різних значень, є виміряною, вона стає детермінованою. Конкретний вигляд її називають *реалізацією випадкової функції*. Для розрахунків систем, які перетворюють випадкові сигнали, використовують характеристики та параметри, що отримують в результаті статистичної обробки окремих реалізацій.

Розглянемо N реалізацій випадкової функції $f(t)$, виберемо із цього числа ті N_i реалізації, значення яких у певний момент часу t менші, ніж деяке число f_i . За досить великого N відносна частка $\frac{N_i(f_i, t)}{N}$ функцій, які існують у момент часу t нижче рівня f_i , залишатиметься приблизно постійним числом P .

Це число $P(f_i, t)$ називається *одновимірною інтегральною функцією розподілу ймовірностей* випадкової функції. Похідна $\frac{\partial P(f, t)}{\partial f} = \psi(f, t)$ називається *одновимірною щільністю ймовірностей*.

Оскільки неперервна функція $f(t)$ обов'язково має яке-небудь конкретне значення f_i у проміжку від мінус нескінченності до плюс нескінченності, то ймовірність того, що вона лежить у цьому інтервалі, дорівнює одиниці. Тобто

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(f, t) df = 1. \quad (1.24)$$

Випадковий процес називають *стаціонарним* якщо функції щільності ймовірності не залежать від початку підрахунку часу

$$\psi(f, t_1) = \psi(f, t_2) = \psi(f).$$

Для стаціонарних процесів середнє значення та дисперсія є постійними величинами, які не залежать від часу. При цьому автокореляційна функція залежить від різниці часу $t = t_1 - t_2$.

Середнє значення $\langle f \rangle$ та дисперсію σ^2 випадкового стаціонарного сигналу визначають за формулами:

$$\langle f \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi(f) df; \quad (1.25)$$

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} [f(t) - \langle f \rangle]^2 \psi(f) df. \quad (1.26)$$

Випадковий стаціонарний процес називають *ергодичним* якщо будь-яка його статистична характеристика, отримана з множини реалізацій, із ймовірністю, близькою до одиниці, дорівнює часовому середньому, отриманому за значний проміжок часу $2T$ із однієї реалізації випадкового процесу.

Доцільно було б застосувати спектральний аналіз і для випадкових процесів. При цьому довелося би усереднювати спектральні характеристики окремих реалізацій. Але усереднення комплексних спектрів за всіма реалізаціями призведе до появи нульового спектру через випадковість та незалежність початкових фаз спектральних складових у різних реалізаціях. Тому усереднювати потрібно функцію, яка б не залежала від фазової характеристики реалізації. Якщо випадкова функція характеризує напругу або струм, то її квадрат – це миттєва потужність, яка виділяється на резисторі з опором у 1 Ом. Середній же квадрат характеризує середню потужність. Вона розподілена у смузі частот і на кожен герц частоти припадає певна величина середньої потужності, яку називають *спектральною щільністю середньої потужності* або *енергетичним спектром* функції $f(t)$. Останній термін походить від розмірності енергетичного спектра

$$G(f) = \text{Потужність} / \text{Частота} = \text{Потужність} \cdot \text{Час} = \text{Енергія}.$$

Для стаціонарного ергодичного процесу з нульовим середнім значенням енергетичний спектр та автокореляційна функція пов'язані між собою прямим та зворотним перетвореннями Фур'є:

$$G(f) = F\{ACF(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} ACF(t) \exp(-j2\pi ft) dt; \quad (1.27)$$

$$ACF(t) = F^{-1}\{G(f)\} = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) \exp(j2\pi ft) df. \quad (1.28)$$

Середнє квадратичне значення цього процесу визначається як

$$\langle f^2 \rangle = ACF(0) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) df. \quad (1.29)$$

Для двовимірних оптичних стаціонарних ергодичних випадкових сигналів формули (1.27) і (1.28) набувають вигляду:

$$G(v_x, v_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int ACF(x, y) \exp[-j2\pi(v_x x + v_y y)] dx dy; \quad (1.30)$$

$$ACF(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int G(v_x, v_y) \exp[j2\pi(x v_x + y v_y)] dv_x dv_y. \quad (1.31)$$

Формули (1.32) і (1.33) іноді називають *прямим і зворотним перетворенням Вінера*. При цьому функцію $G(v_x, v_y)$ називають *енергетичним спектром або спектром Вінера* просторової функції $f(x, y)$. Оскільки перетворення Вінера є аналогом перетворення Фур'є, то для нього справедливі теореми, наведені в табл. 1.1.

1.4.4. Лінійні системи

Розглянемо тільки ті системи, які перетворюють ряд вхідних функцій у ряд вихідних функцій. При цьому шуми системи не розглядаються. Нехай яскравість у площині об'єктів описують двовимірною функцією $L_o(x_o, y_o)$, а яскравість (освітленість) у площині зображення (на екрані дисплея) – $L_i(x_i, y_i)$. Дію системи на об'єкт позначимо оператором $S\{\}$, тобто

$$L_i(x_i, y_i) = S\{L_o(x_o, y_o)\}. \quad (1.32)$$

Систему називають *лінійною*, якщо для будь-яких двох функцій $L_{o1}(x_o, y_o)$ і $L_{o2}(x_o, y_o)$ виконується умова [2]

$$S\{aL_{o1}(x_o, y_o) + bL_{o2}(x_o, y_o)\} = aS\{L_{o1}(x_o, y_o)\} + bS\{L_{o2}(x_o, y_o)\}, \quad (1.32)$$

де a і b – комплексні коефіцієнти.

Функцію яскравості об'єкта $L_o(x_o, y_o)$ для обчислень зручно подати у вигляді комбінації зважених дельта-функцій Дірака, використовуючи так звану фільтрувальну властивість дельта-функції $\delta(x, y)$ [2],

$$L_o(x_o, y_o) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L_o(x, y) \delta(x_o - x, y_o - y) dx dy. \quad (1.33)$$

Сенс інтеграла (1.33) полягає у тому, що будь-яку функцію можна подати як нескінченну суму зважених та зміщених дельта-функцій, які математично визначають як

$$\delta(x_o - x, y_o - y) = \delta(x_o - x) \delta(y_o - y) = \begin{cases} \infty, & \text{якщо } x = x_o; y = y_o; \\ 0, & \text{якщо } x \neq x_o; y \neq y_o. \end{cases} \quad (1.34)$$

Для лінійних систем (1.32) розподіл яскравості зображення визначають як

$$L_i(x_i, y_i) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L_o(x, y) S\{\delta(x_o - x, y_o - y)\} dx dy. \quad (1.35)$$

Таким чином, функція розподілу яскравості зображення – це зважена сума реакцій системи на дельта-функції, що є компонентами системи.

Функцію

$$S\{\delta(x_o - x, y_o - y)\} = h_s(x_i, y_i; x_o, y_o) \quad (1.36)$$

називають *імпульсною реакцією (відгуком) системи*, а в системах, що формують зображення – *функцією розсіювання точки (ФРТ)*. Отже ФРТ є розподілом яскравості (освітленості) в зображенні точкового джерела випромінювання. Співвідношення (1.35) називають *інтегралом суперпозиції*, бо функція $L_i(x_i, y_i)$ виражається як інтеграл накладених одна на одну реакцій системи на дельта-функції, що зміщені одна відносно другої на нескінченно малу величину [2].

Інтеграл суперпозиції значно спрощується для *інваріантних систем*, коли імпульсна реакція системи не залежить від положення імпульсу (точкового об'єкта). Для ТПСС із збільшенням, рівним одиниці, умова інваріантності має вигляд

$$h_s(x_i, y_i; x_o, y_o) = h_s(x_i - x_o, y_i - y_o). \quad (1.37)$$

Умова (1.37) означає, що форма імпульсного відгуку не змінюється у разі зміщення щодо осей координат. Для лінійних інваріантних систем інтеграл суперпозиції (1.35) перетворюється в *інтеграл згортки*:

$$L_i(x_i, y_i) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L_o(x, y) h_s(x - x_i, y - y_i) dx dy. \quad (1.38)$$

1.4.5. Оптична передавальна функція

Якщо система, яка має складові з різними імпульсними відгуками h_i , здійснює ряд послідовних згорток сигналу об'єкта, то в ній дуже складно уявити процес перетворення сигналів. Теорема згортки у спектральному аналізі дозволяє перейти в область частот, де ці перетворення є набагато простішими [2].

Теорему згортки можна сформулювати таким чином: перетворення Фур'є згортки двох функцій дорівнює добутку перетворень Фур'є цих функцій. Стосовно рівняння (1.38), що описує розподіл яскравості у зображенні, теорема згортки має вигляд [2]

$$F\{L_o * h_s\} = F\{L_o\} \cdot F\{h_s\}, \quad (1.39)$$

де $F\{L_o\} = \tilde{L}_o(\nu_x, \nu_y)$ і $F\{L_i\} = \tilde{L}_i(\nu_x, \nu_y)$ – просторові спектри розподілу яскравості у площині об'єкта і зображення відповідно.

Перетворення Фур'є від імпульсного відгуку

$$H_s(v_x, v_y) = F\{h_s(x, y)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_s(x, y) \exp[-j2\pi(v_x x + v_y y)] dx dy \quad (1.40)$$

називають *оптичною передавальною функцією* (ОПФ) для систем, що формують зображення, або просто *передавальною функцією* (ПФ) системи. ОПФ ТПСС дає можливість оцінити здатність системи відтворювати сигнал об'єкта з різними просторовими частотами.

У загальному випадку ОПФ є комплексною функцією

$$H_s(v_x, v_y) = M_s(v_x, v_y) \exp[j\Phi(v_x, v_y)], \quad (1.41)$$

де $M_s(v_x, v_y) = |H_s(v_x, v_y)|$ – модуляційна передавальна функція (МПФ); $\Phi_s(v_x, v_y)$ – фазова передавальна функція (ФПФ).

Модуляційна передавальна функція є амплітудною реакцією системи на вхідний синусоїдальний розподіл яскравості одиничної амплітуди. Фазова передавальна функція характеризує фазовий зсув просторової частоти, який вносить система.

Спектральний аналіз досить широко застосовують під час проєктування ТПСС, бо ОПФ є зручною оцінкою якості зображення. У зв'язку з цим під час моделювання або експериментального визначення ОПФ потрібно належним чином упевнитись, що усі наведені вище застереження щодо існування ОПФ враховано.

1.4.6. Проходження детермінованих і випадкових сигналів через лінійну систему

Якщо лінійна інваріантна ТПСС перетворює детермінований розподіл яскравості $L_o(x_o, y_o)$ у площині спостереження в розподіл яскравості зображення $L_i(x_i, y_i)$ на екрані дисплея, то співвідношення між цими яскравостями визначають інтегралом згортки (1.38). В області просторових частот ця згортка має вигляд (1.39).

Якщо на вхід лінійної інваріантної системи надходить випадковий ергодичний сигнал, то в області просторових частот маємо співвідношення

$$G_i(v_x, v_y) = G_o(v_x, v_y) |H_s(v_x, v_y)|^2, \quad (1.42)$$

де $G_o(v_x, v_y)$, $G_i(v_x, v_y)$ – просторові спектри Вінера випадкового розподілу яскравості у площині спостереження і на екрані дисплея відповідно.

1.5. Ймовірність виявлення сигналів на фоні шумів

Нехай простір спостереження характеризується випадковим розподілом яскравості. З певною ймовірністю у цьому просторі може перебувати або бути відсутнім об'єкт спостереження. ТПСС має дати відповідь на питання про наявність об'єкта в полі зору, тобто розв'язати задачу виявлення об'єкта. При розв'язанні цієї задачі корисним сигналом є лише випромінювання об'єкта. Випромінювання решти елементів фоно-цільової обстановки, які потрапляють в поле зору, утворює заваду, що маскує корисний сигнал. До завад також відносяться шуми ПВ та електронного тракту.

1.5.1. Статистичні характеристики виявлення

Розподіл яскравості у полі зору ТПСС перетворюється в електричний сигнал $u(t)$ як деяку комбінацію корисного сигналу $u_s(t)$ (детермінованого) і шумового (випадкового) сигналу $u_n(t)$, якщо об'єкт знаходиться в полі зору. Якщо об'єкт відсутній у полі зору, то сигнал $u(t)$ може характеризуватися лише шумовим сигналом $u_n(t)$. Отже, сигнал $u(t)$ є єдиним джерелом інформації для розв'язання задачі виявлення наявності об'єкта в полі зору.

Прийняття будь-якого рішення про наявність об'єкта завжди супроводжується похибками одного з двох типів. Перша з них, яку називають *похибкою помилкової (хибної) тривоги*. Вона виникає тоді, коли за відсутності об'єкта в полі зору ТПСС формує рішення «Так» (об'єкт присутній). Друга похибка, яку називають *похибкою пропуску*, відповідає випадку, коли за наявності об'єкта в полі зору ТПСС формує рішення «Немає». Оскільки прийняття цих рішень має випадковий характер, то використовуються поняття *ймовірність хибної тривоги* P_{fa} і *ймовірність пропуску об'єкта* P_p .

Якщо об'єкт знаходиться у полі зору і ТПСС формує рішення «Так», то характеристикою системи є *ймовірність виявлення* P_d . Очевидно, що

$$P_d = 1 - P_p. \quad (1.43)$$

Якщо об'єкт не знаходиться в полі зору й ОЕСС формує рішення

«Немає», то цей процес прийняття рішення характеризується ймовірністю правильного виявлення P_{nd} . Очевидно, що

$$P_{nd} = 1 - P_{fa}. \quad (1.44)$$

Чим більшими є ймовірності P_d і P_{nd} (або меншими P_{fa} і P_p), тим вищою є якість ТПСС.

1.5.2. Правила вибору рішення

Для розв'язання задачі виявлення на стадії проєктування ТПСС має бути обумовлене певне правило, згідно з яким забезпечується видача рішень «Так» або «Немає». Це *правило вибору рішень* дозволяє вказати шлях аналізу реалізації $u(t)$. В основі цього правила лежать ймовірності прийняття правильних й хибних рішень.

Серед різних правил вибору рішень в ТПСС часто застосовують критерій Неймана-Пірсона. Його перевагою над іншими правилами є можливість аналітичного вирішення рівнянь, що описують процес виявлення сигналів. Відповідно до нього забезпечується максимальна величина ймовірності виявлення P_d за заданої величини ймовірності хибної тривоги P_{fa} . На практиці для спрощення розрахунків замість ймовірності хибної тривоги використовують:

- середнє число $\bar{N}_{fa}$ хибних тривог за одиницю часу або середній часовий інтервал $\bar{t}_{fa}$ між помилковими тривогами;
- ймовірність $P_{fa}(t_{op})$ виникнення хибної тривоги на заданому інтервалі часу роботи ТПСС t_{op} .

1.5.3. Виявлення методом однократного відліку

При розв'язанні задачі виявлення сигналу в ТПСС використовують пороговий пристрій (ПП), на виході якого формується рішення «Так» або «Немає» (рис. 1.5). Налаштування ПП здійснюють за величиною порогового значення сигналу u_{th} , яку визначають відповідним критерієм прийняття рішення (рис. 1.6).

Очевидно, що

$$P(u_{s \max} + u_n > u_{th}) = P(u_n > u_{th} - u_{s \max}). \quad (1.45)$$

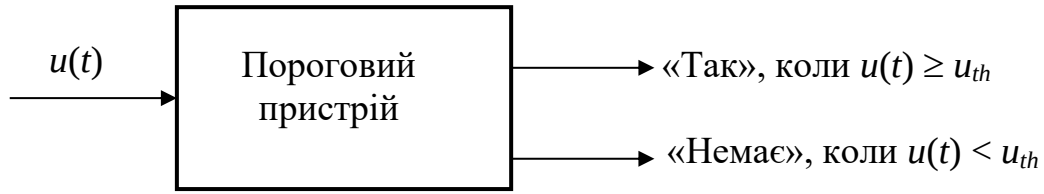


Рис. 1.5. Функціональна схема порогового пристрою, який реалізує процес прийняття рішення

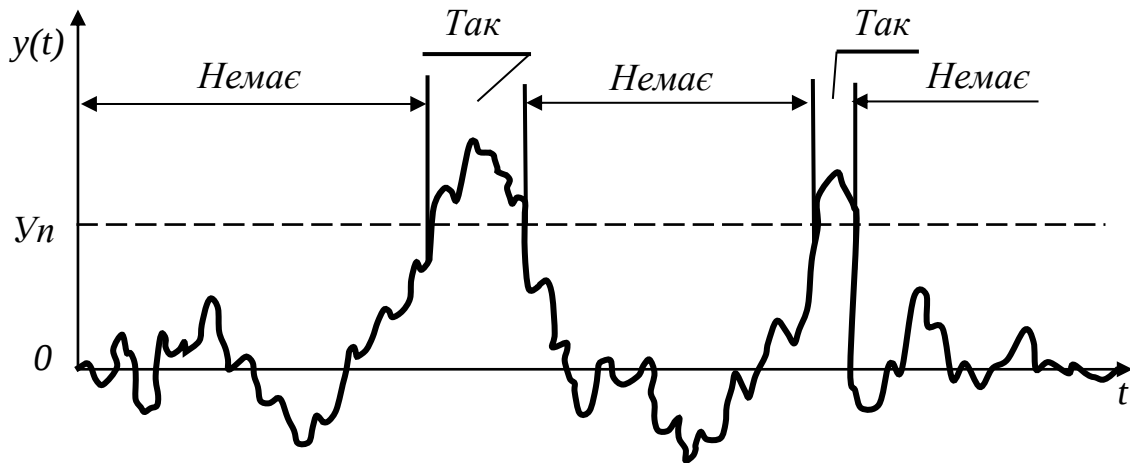


Рис. 1.6. Формування рішення «Так» і «Немає» на виході ПП виявлення методом однократного відліку

Згідно з критерієм Неймана-Пірсона ймовірність виявлення визначають за відношенням сигнал/шум, яке надходить до ПП. Введемо позначення

$$z = \frac{u_n}{\sigma_n}; SNR_{th} = \frac{u_{th}}{\sigma_n}; SNR = \frac{u_{s \max}}{\sigma_n}, \quad (1.46)$$

де $\sigma_n = \sqrt{u_n^2(t)}$ – середнє квадратичне значення шуму.

Тоді

$$P_d = P(z > z_0), \quad (1.47)$$

де $z_0 = SNR_{th} - SNR$.

Вважатимемо, що випадковий сигнал $u(t)$ підпорядковується нормальному закону розподілу. Тоді маємо

$$P(z > z_0) = \frac{1}{2} - \Phi(z_0), \quad (1.48)$$

де

$$\Phi(z_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{z_0} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (1.49)$$

– інтеграл ймовірностей. Значення цього табличного інтегралу наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

$$\text{Інтеграл ймовірностей } \Phi(z_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{z_0} e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

z_0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,000	004	008	012	016	020	024	028	032	036
0,1	040	044	048	052	056	060	064	067	071	075
0,2	079	083	087	091	095	099	103	106	110	114
0,3	118	122	126	129	133	137	141	144	148	152
0,4	155	159	163	166	170	174	177	181	184	188
0,5	191	195	198	202	205	209	212	216	219	222
0,6	226	229	232	236	239	242	245	249	252	255
0,7	258	261	264	267	270	273	276	279	282	285
0,8	288	291	294	297	300	302	305	308	311	313
0,9	316	319	321	324	326	329	331	334	336	339
1,0	341	344	346	349	351	353	355	358	360	362
1,1	364	367	369	371	373	375	377	379	381	383
1,2	385	387	389	391	393	394	396	398	400	401
1,3	403	405	407	408	410	411	413	415	416	418
1,4	419	421	422	424	425	426	428	429	431	432
1,5	433	434	436	437	438	439	441	442	443	444
1,6	445	446	447	448	450	451	452	453	454	455
1,7	455	456	457	458	459	460	461	462	462	463
1,8	464	465	466	466	467	468	469	469	470	471
1,9	471	472	473	473	474	474	475	476	476	477
2,0	477	478	478	479	479	480	480	481	481	482
2,1	482	483	483	483	484	484	485	485	485	486
2,2	486	486	487	487	487	488	488	488	489	489
2,3	489	490	490	490	490	491	491	491	491	492
2,4	492	492	492	492	493	493	493	493	493	494
2,5	494	494	494	494	494	495	495	495	495	495
2,6	495	495	496	496	496	496	496	496	496	496
2,7	497	497	497	497	497	497	497	497	497	497
2,8	497	498	498	498	498	498	498	498	498	498

Отже, ймовірність виявлення визначається співвідношенням

$$P_d = \frac{1}{2} - \Phi(SNR_{th} - SNR), \quad (1.50)$$

або

$$\Phi(SNR_{th} - SNR) = \frac{1}{2} - P_d. \quad (1.51)$$

Ймовірність хибної тривоги P_{fa} можна знайти аналогічним чином. Якщо сигнал від об'єкта u_s відсутній, то $SNR = 0$, а ймовірність перевищення порогового рівня u_{th} шумовим сигналом u_n дорівнює

$$P_{fa} = \frac{1}{2} - \Phi(SNR_{th}), \quad (1.52)$$

або

$$\Phi(SNR_{th}) = \frac{1}{2} - P_{fa}. \quad (1.53)$$

Якщо обернену функцію інтеграла ймовірностей позначити як $\Phi^{-1}\{\cdot\}$, то із (1.51) і (1.53) отримаємо:

$$SNR_{th} - SNR = \Phi^{-1}\left\{\frac{1}{2} - P_d\right\}; \quad (1.54)$$

$$SNR_{th} = \Phi^{-1}\left\{\frac{1}{2} - P_{fa}\right\}. \quad (1.55)$$

Звідки маємо

$$SNR = \Phi^{-1}\left\{\frac{1}{2} - P_{fa}\right\} - \Phi^{-1}\left\{\frac{1}{2} - P_d\right\}. \quad (1.56)$$

Таким чином, можна визначити величини SNR і SNR_{th} , якщо відомими є ймовірність виявлення P_d та ймовірність хибної тривоги P_{fa} .

1.5.4. Визначення порогового відношення сигнал/шум

Визначення порогового відношення сигнал/шум SNR_{th} за формулою (1.52) не дає відповіді на запитання: як часто в ПП із SNR_{th} з'являється хибна тривога. Для цього потрібно встановити зв'язок між пороговим відношення сигнал/шум SNR_{th} і часом між хибними тривогами $\bar{t}_{fa}$ при заданій ймовірності хибних тривог P_{fa} .

Допустимі параметри хибних тривог можуть бути задані трьома способами: допустимими значеннями ймовірності хибної тривоги P_{fa} , середній частоті $\bar{f}_{fa}$ або середнім періодом $\bar{t}_{fa}$ хибних тривог, ймовірністю P_{fa} появи хоч би однієї хибної тривоги на заданому проміжку спостереження t_{op} . Розглянемо розрахунок порогового відношення сигнал/шум SNR_{th} або порогової напруги u_{th} за різних способів визначення хибних тривог.

1. *Задана допустима ймовірність P_{fa} появи хибних тривог у будь-який момент часу.* Якщо щільність ймовірності амплітуд напруги шумового сигналу u_n нормальна, ймовірність хибної тривоги у будь-який момент

часу, коли виконується умова $u_n \geq u_{th}$, може бути розрахована за формулою (1.52).

Таким чином, якщо задана допустима ймовірність P_{fa} появи хибних тривог у будь-який момент часу, то за формулою (1.53) розраховують інтеграл ймовірностей (1.49) і за табл. 1.2 знаходять відповідне порогове відношення сигнал/шум SNR_{th} .

Якщо відома дисперсія шуму σ_n^2 , то це дозволяє знайти необхідне порогове значення напруги

$$u_{th} = SNR_{th} \sigma_n. \quad (1.57)$$

2. Задана середня частота $\bar{f}_{fa}$ появи хибних тривог. У цьому випадку для знаходження SNR_{th} використаємо формулу

$$\bar{f}_{fa} = \frac{1}{\bar{t}_{fa}} = f_n \exp\left(-\frac{u_{th}^2}{2\sigma_n^2}\right) = f_n \exp\left(-\frac{1}{2} SNR_{th}^2\right), \quad (1.58)$$

де f_n – середньоквадратична частота перетину шумового сигналу нульового значення, якщо середнє значення шуму дорівнює нулю.

Із формули (1.58) маємо, що

$$SNR_{th} = \sqrt{2 \ln \frac{f_n}{\bar{f}_{fa}}} = \sqrt{2 \ln(f_n \bar{t}_{fa})}. \quad (1.59)$$

3. Задана допустима ймовірність P_{fa} появи хоч однієї хибної тривоги за час спостереження t_{op} . Як зазначалося раніше, цей спосіб визначення параметрів хибних тривог застосовують тоді, коли ці тривоги мають бути вкрай рідкими. Для «білого» шуму маємо

$$SNR_{th} = \left\{ 2 \ln \left[\frac{\Delta f t_{op}}{-\sqrt{3} \ln(1-P_{fa})} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (1.60)$$

Після того, як знайдено порогове відношення сигнал/шум SNR_{th} , за формулою (1.54) можна визначити потрібне відношення сигнал/шум на вході ПП

$$SNR = SNR_{th} - \Phi^{-1} \left\{ \frac{1}{2} - P_d \right\}. \quad (1.61)$$

При цьому потрібну амплітуду корисного сигналу від об'єкта виявлення визначають як

$$u_s = \sigma_n SNR. \quad (1.62)$$

1.6. Приклади розрахунку перетворення сигналів в ТПСС

Приклад 1.3. Порівняйте спектри синусоїдальної і прямокутної нескінченних мір одиничної амплітуди з контрастом, рівним одиниці. Чому дорівнює амплітуда першої гармоніки прямокутної міри? Знайдіть середнє значення амплітуди першої гармоніки прямокутної міри за півперіоду.

Розв'язання. Періодична функція зміни енергетичної світності міри з періодом V_{tp} може бути подана у вигляді ряду Фур'є:

$$\Delta M(x) = \Delta M(x + iV_{tp}) = \frac{A_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} \left[A_i \cos\left(2\pi i \frac{x}{V_{tp}}\right) + B_i \sin\left(2\pi i \frac{x}{V_{tp}}\right) \right], \quad (1.63)$$

де $\frac{A_0}{2}$ – постійна складова;

$$A_i = \frac{2}{V_{tp}} \int_{-\frac{V_{tp}}{2}}^{\frac{V_{tp}}{2}} \Delta M(x) \cos\left(2\pi i \frac{x}{V_{tp}}\right) dx; \quad (1.64)$$

$$B_i = \frac{2}{V_{tp}} \int_{-\frac{V_{tp}}{2}}^{\frac{V_{tp}}{2}} \Delta M(x) \sin\left(2\pi i \frac{x}{V_{tp}}\right) dx \quad (1.65)$$

– дійсні амплітуди відповідних складових.

Математично відносні світності синусоїдальної та прямокутної мір згідно з умовою прикладу описують у межах періоду відповідно функціями:

$$\Delta M_s(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(2\pi \frac{x}{V_{tp}}\right); \quad \Delta M_r(x) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } |x| \leq \frac{V_{tp}}{4}; \\ 0, & \text{якщо } \frac{V_{tp}}{4} < |x| < \frac{V_{tp}}{2}. \end{cases}$$

Графіки цих функцій показані на рис. 1.7.

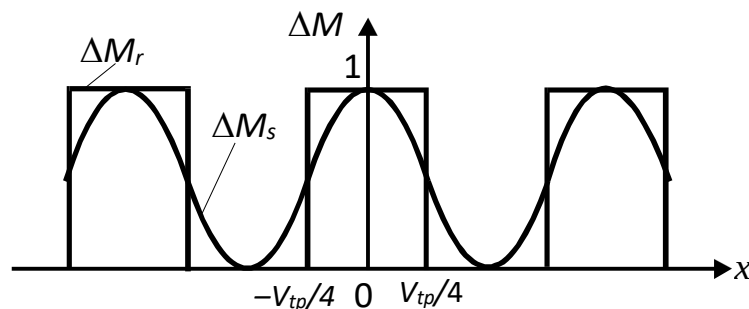


Рис. 1.7. Розподіл амплітуд вхідних сигналів

Тоді амплітуди перших гармонік дорівнюватимуть:

$$\begin{aligned}
 A_{1s} &= \frac{2}{V_{tp}} \int_{-\frac{V_{tp}}{2}}^{\frac{V_{tp}}{2}} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left(2\pi \frac{x}{V_{tp}} \right) \right] \cos \left(2\pi \frac{x}{V_{tp}} \right) dx = \\
 &= \frac{2}{V_{tp}} \frac{V_{tp}}{4\pi} \left[\sin \left(2\pi \frac{x}{V_{tp}} \right) + \pi \frac{x}{V_{tp}} + \frac{1}{2} \sin \left(4\pi \frac{x}{V_{tp}} \right) \right] \Big|_{-\frac{V_{tp}}{2}}^{\frac{V_{tp}}{2}} = \frac{1}{2}; \\
 A_{1r} &= \frac{2}{V_{tp}} \int_{-\frac{V_{tp}}{4}}^{\frac{V_{tp}}{4}} \cos \left(2\pi \frac{x}{V_{tp}} \right) dx = \frac{2}{V_{tp}} \frac{V_{tp}}{2\pi} \sin 2\pi \frac{x}{V_{tp}} \Big|_{-\frac{V_{tp}}{4}}^{\frac{V_{tp}}{4}} = \frac{2}{\pi}.
 \end{aligned}$$

Таким чином, амплітуда першої гармоніки прямокутної міри становить $4/\pi$ амплітуди синусоїдальної міри (рис. 1.8).

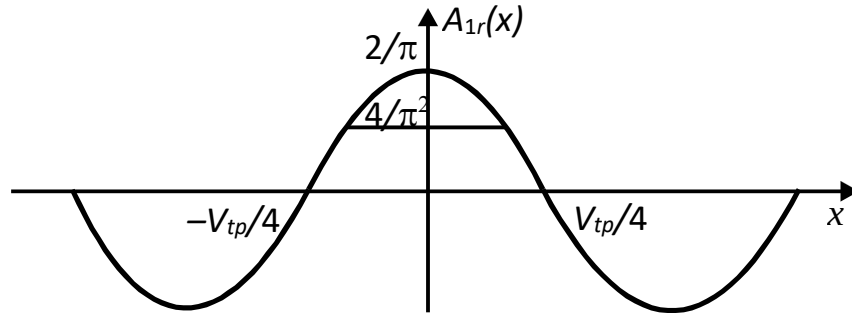


Рис. 1.8. Амплітуда першої гармоніки прямокутної міри

Середнє значення амплітуди першої гармоніки прямокутної міри за півперіоду знайдемо, користуючись формулою (рис. 1.7):

$$\langle A_{1r} \rangle = \frac{2}{V_{tp}} \int_{-\frac{V_{tp}}{4}}^{\frac{V_{tp}}{4}} \frac{2}{\pi} \cos \left(2\pi \frac{x}{V_{tp}} \right) dx = \frac{4}{\pi^2}.$$

Приклад 1.4. Геометричні розміри завад описуються стаціонарним випадковим процесом з релеєвським законом розподілу щільності ймовірності

$$\psi(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma_0^2} \exp \left(-\frac{x^2}{2\sigma_0^2} \right), & \text{якщо } x \geq 0; \\ 0, & \text{якщо } x < 0, \end{cases}$$

де σ_0 – параметр розподілу.

Покажіть, що середній розмір таких утворень дорівнює $1,253\sigma_0$, а

дисперсія – $0,429\sigma_0$.

Розв'язання. Середній розмір завад визначимо за формулою (1.25)

$$\langle x \rangle = \int_0^{\infty} x \frac{x}{\sigma_0^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_0^2}\right) dx = \frac{1}{\sigma_0^2} \int_0^{\infty} x^2 \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_0^2}\right) dx.$$

Для розрахунку цього інтеграла використаємо табличний інтеграл

$$\int_0^{\infty} x^2 \exp(-r^2 x^2) dx = \frac{\sqrt{\pi}}{4r^3}, \text{ де } r = 1/\sigma_0 \sqrt{2}.$$

$$\text{Тоді } \langle x \rangle = \frac{1}{\sigma_0^2} \frac{\sqrt{\pi}}{4} (\sigma_0 \sqrt{2})^3 = \sigma_0 \sqrt{\frac{\pi}{2}} = 1,253\sigma_0.$$

Дисперсію розміру завад визначимо за формулою (1.26):

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \int_0^{\infty} (x - \langle x \rangle)^2 \frac{x}{\sigma_0^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_0^2}\right) dx = \\ &= \frac{1}{\sigma_0^2} \int_0^{\infty} x^3 \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_0^2}\right) dx - 2 \frac{\langle x \rangle}{\sigma_0^2} \int_0^{\infty} x^2 \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_0^2}\right) dx + \frac{\langle x \rangle^2}{\sigma_0^2} \int_0^{\infty} x \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_0^2}\right) dx. \end{aligned}$$

Для розрахунку інтегралів в останньому виразі використаємо табличні

$$\text{інтеграли } \int_0^{\infty} x^3 \exp(-r^2 x^2) dx = \frac{1}{2r^4}, \quad \int_0^{\infty} x \exp(-r^2 x^2) dx = \frac{1}{2r^2}, \quad \text{де } r = 1/\sigma_0 \sqrt{2}.$$

Тоді

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \frac{1}{\sigma_0^2} \frac{4\sigma_0^4}{2} - 2 \frac{\langle x \rangle}{\sigma_0^2} \frac{\sqrt{\pi}\sigma_0^3 2^{\frac{3}{2}}}{4} + \frac{\langle x \rangle^2}{\sigma_0^2} \frac{2\sigma_0^2}{2} = \\ &= 2\sigma_0^2 - 2 \langle x \rangle^2 + \langle x \rangle^2 = \sigma_0^2 \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) = 0,429\sigma_0^2. \end{aligned}$$

Приклад 1.5. Знайдіть просторовий спектр розподілу яскравості круглого об'єкта радіусом r_t , який має рівномірну яскравість L_0 .

Розв'язання. Яскравість круглого об'єкта описують вісесиметричною функцією

$$L(r) = \begin{cases} L_0, & \text{якщо } 0 \leq r \leq r_t; \\ 0, & \text{якщо } r > r_t, \end{cases}$$

для якої просторовий спектр знаходять за допомогою перетворення Фур'є-Бесселя (1.22)

$$\tilde{L}(v_r) = 2\pi \int_0^{r_t} L_0 J_0(2\pi v_r r) r dr.$$

Для розрахунку цього інтеграла використаємо табличний інтеграл $\int_0^z J_0(x) x dx = z J_1(z)$, де $x = 2\pi v_r r$. Звідки $r = \frac{x}{2\pi v_r}$, а $dr = \frac{dx}{2\pi v_r}$. Тоді

$$\begin{aligned} \tilde{L}(v_r) &= 2\pi L_0 \int_0^{2\pi v_r r_t} J_0(x) \left(\frac{1}{2\pi v_r}\right)^2 x dx = \\ &= \frac{L_0}{2\pi v_r^2} 2\pi v_r r_t J_1(2\pi v_r r_t) = L_0 \pi r_t^2 \frac{2J_1(2\pi r_t v_r)}{2\pi r_t v_r}. \end{aligned}$$

Значення просторового спектру на нульовій просторовій частоті становить $v_r = 0$ знайдемо, якщо використаємо границю

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{2J_1(x)}{x} = 1. \quad (1.66)$$

Тоді $\tilde{L}(v_r = 0) = L_0 \pi r_t^2$. Графік нормованого просторового спектру $\tilde{L}_n(v_r) = \frac{\tilde{L}(v_r)}{\tilde{L}(0)} = \frac{2J_1(2\pi r_t v_r)}{2\pi r_t v_r}$ зображено на рис. 1.8, а його числові значення – у табл. 1.3. Функція $\frac{2J_1(x)}{x}$ має нульові значення, коли x дорівнює 3,83; 7,01; 10,17. При цьому просторова частота, яка відповідає першому нульовому значенню, дорівнює $v_{r01} = \frac{3,83}{2\pi r_t} = 1,22 \frac{1}{2r_t}$.

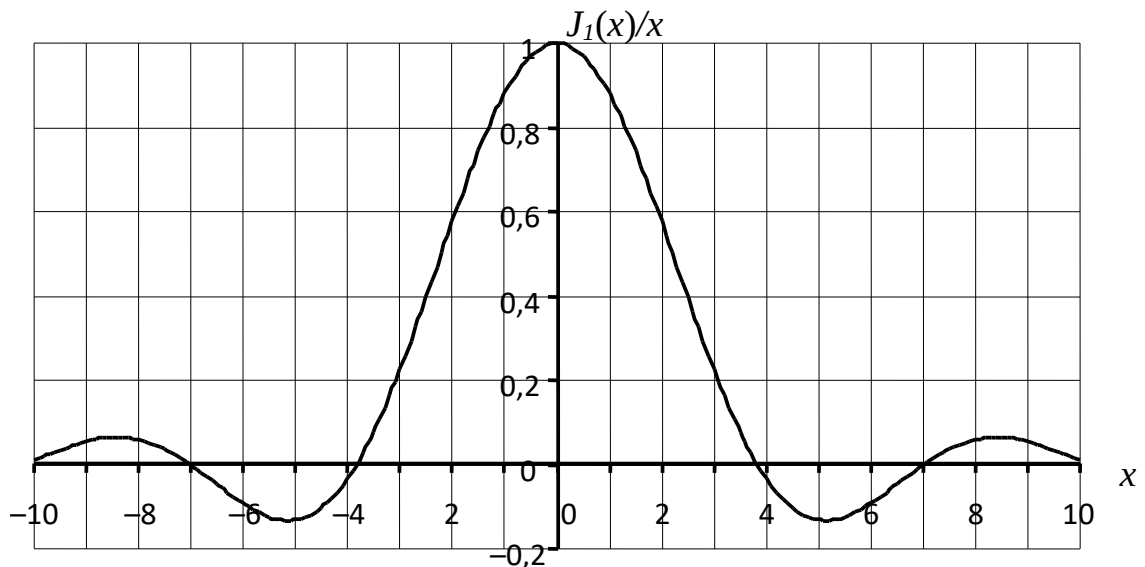


Рис. 1.8. Графік функції $\frac{2J_1(x)}{x}$

Таблиця 1.3

Значення функції $\frac{2J_1(x)}{x}$

x	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	1,000	0,999	0,995	0,989	0,980	0,969	0,956	0,940	0,922	0,902
1	0,880	0,856	0,831	0,803	0,774	0,744	0,712	0,680	0,646	0,612
2	0,577	0,541	0,505	0,470	0,434	0,398	0,362	0,327	0,293	0,259
3	0,226	0,194	0,163	0,134	0,106	0,079	0,053	0,029	0,007	-0,014
4	-0,033	-0,050	-0,066	-0,080	-0,092	-0,103	-0,112	-0,119	-0,124	-0,128
5	-0,131	-0,132	-0,132	-0,131	-0,128	-0,124	-0,119	-0,114	-0,107	-0,100
6	-0,092	0,084	-0,075	-0,066	-0,057	-0,047	-0,038	-0,029	-0,019	-0,010
7	-0,001	0,007	0,015	0,023	0,030	0,036	0,042	0,047	0,052	0,056
8	0,059	0,061	0,063	0,064	0,065	0,064	0,063	0,062	0,060	0,058
9	0,055	0,051	0,047	0,043	0,039	0,034	0,029	0,024	0,019	0,014
10	0,009	0,004	-0,001	-0,006	-0,011	-0,015	-0,019	-0,023	-0,026	-0,029

Приклад 1.6. Розрахуйте потрібне відношення сигнал/шум SNR_d на виході ПВ, яке дозволяє виявити сигнал від об'єкта з ймовірністю $P_d = 0,98$ при середньому інтервалі появи хибної тривоги $\bar{t}_{fa} = 10$ год. Смуга пропускання відео підсилювача становить $\Delta f = 2,76$ МГц.

Розв'язання. 1. Знайдемо спочатку порогове відношення сигнал/шум SNR_{th} , яке забезпечує появу хибної тривоги на інтервалі $\bar{t}_{fa} = 10$ год. $= 3,6 \cdot 10^4$ с. Прийmemo, що у межах смуги пропускання відео підсилювача $\Delta f = 2,76 \cdot 10^6$ Гц шум ПВ є «білим». Тоді, користуючись формулами (1.59) і (1.60), знаходимо, що

$$SNR_{th} = \sqrt{2 \ln \left(\frac{\Delta f}{\sqrt{3}} \bar{t}_{fa} \right)} = \sqrt{2 \ln \left(\frac{2,76 \cdot 10^6}{\sqrt{3}} \cdot 3,6 \cdot 10^4 \right)} = 7,04. \quad (1.67)$$

2. Відношення сигнал/шум SNR_d , потрібне для виявлення сигналу від об'єкта з ймовірністю $P_d = 0,98$, знаходимо із формули (1.61)

$$SNR = SNR_{th} + \Phi^{-1} \left\{ P_d - \frac{1}{2} \right\} = 7,04 + \Phi^{-1} \{0,48\}. \quad (1.68)$$

Із табл. 1.2 маємо, що $\Phi^{-1} \{0,48\} = 2,05$. Тоді $SNR_d = 7,04 + 2,05 \approx 9,1$.

Задачі для самостійного розв'язання

Задача 1.1. Визначте оптимальні розміри екрана дисплея ТПСС, розгортка якого відповідає аналоговому телевізійному стандарту SECAM. Дисплей розміщено на відстані $R_{SE} = 50$ см від спостерігача.

Відповідь: $W''_{\text{opt}} = 2R_{SE} \text{tg} \frac{q\delta\omega_E}{2} = 8,4 \text{ см}; V'_{\text{opt}} = k_f W''_{\text{opt}} = 11,2 \text{ см}.$

Задача 1.2. Тепловізійна система спостереження використовує мікроболометричну матрицю U-3000A фірми Boeing, яка має формат $p_D \times q_D = 320 \times 240$ та розміри пікселя $V_D \times W_D = 51 \times 51 \text{ мкм}^2$. Система сканування використовує паралельно-послідовний метод і забезпечує поле зору за азимутотом $2\omega_x = 360^\circ \times n$ і за кутом місця $2\omega_y$ у межах від -15° до 60° . Час формування повного поля зору $t_f = 2 \text{ с}$. Визначте фокусну відстань об'єктива ТПСС і параметри розкладення зображення.

Відповідь: $f'_o \approx 8 \text{ мм}; p \times q = 1152 \times 240; k_f = \frac{360}{75} = 4,8; f_f = 0,5 \text{ Гц}; t_o = 1 \text{ мс}; \Delta f = 347 \text{ Гц}$ (за відсутності кадрової розгортки).

Задача 1.3*. Тепловізійна система спостереження має поле зору $2\omega_{xs} \times 2\omega_{ys} = 6,9^\circ \times 5,2^\circ$ і використовує фокальну матрицю ID ML069 фірми SOFRADIR (Франція), яка має формат $p_D \times q_D = 320 \times 240$ та розміри пікселя $V_D \times W_D = 51 \times 51 \text{ мкм}^2$. Кутове розділення ТПСС $\delta\omega = 1 \text{ кут. мін.}$ Система сканування використовує паралельно-послідовний метод розгортки зображення і забезпечує поле зору за азимутотом $2\omega_x = 360^\circ \times n$ і за кутом місця $2\omega_y$ у межах від -11° до 30° . Час формування повного поля зору $t_f = 2 \text{ с}$. Визначте фокусну відстань об'єктива ТПСС і параметри розкладення зображення.

Відповідь: $f'_o = 135,4 \text{ мм}; p \times q = 21600 \times 1920; k_f = 11,25; f_f = 0,5 \text{ Гц}, t_o = 11,57 \text{ мкс}; \Delta f = 43,2 \text{ кГц}.$

Задача 1.4.* ТПСС для огляду повітряного простору використовує паралельний метод сканування МПВ і має поле зору $2\omega_x \times 2\omega_y = 360^\circ \times 10^\circ$. Система сканування забезпечує обертання за азимутотом із постійною швидкістю $\omega_{sc} = 5 \text{ об/с}$. Матричний приймач випромінювання має формат $p_D \times q_D = 320 \times 240$ та розміри пікселя $V_D \times W_D = 51 \times 51 \text{ мкм}^2$. Визначте фокусну відстань об'єктива ТПСС і параметри розкладення зображення.

Відповідь: $f'_o = 70 \text{ мм}; p \times q = 8642 \times 240; k_f = 36; f_f = 5 \text{ Гц}; t_o = 23 \text{ мкс}; \Delta f = 21,7 \text{ кГц}.$

Задача 1.5. Знайдіть амплітудно-частотний та фазочастотний спектри ідеального точкового випромінювача, яскравість якого описується дельта-

функцією $L_o(x, y) = L_o \delta(x - x_o, y - y_o)$.

Відповідь: $|\tilde{L}_o(v_x, v_y)| = L_o$; $\Phi(v_x, v_y) = \exp[-j2\pi(x_o v_x + y_o v_y)]$.

Задача 1.6. Знайдіть просторовий спектр коефіцієнта пропускання діафрагми прямокутної форми розміром $V_o \times W_o$. Побудуйте графіки функцій $\tilde{T}(v_x, 0)$ і $\tilde{T}(0, v_y)$ за $V_o = 4$ мм і $W_o = 2$ мм.

Відповідь: $\tilde{T}(v_x, v_y) = V_o W_o \text{sinc}(V_o v_x) \text{sinc}(W_o v_y)$.

Задача 1.7. Діафрагма ОС має кільцеподібну форму з радіусами r_1 і r_2 . Знайдіть просторовий спектр коефіцієнта пропускання такої діафрагми. Побудуйте графік функції цього спектра за $r_1 = 5$ мм і $r_2 = 3$ мм.

Відповідь: $\tilde{T}(v_r) = \pi r_1^2 \frac{2J_1(2\pi r_1 v_r)}{2\pi r_1 v_r} - \pi r_2^2 \frac{2J_1(2\pi r_2 v_r)}{2\pi r_2 v_r}$.

Задача 1.8.* Доведіть, що одновимірна функція

$$f(x) = \sum_{i=-N}^N \text{rect}\left(\frac{x - iV_D}{v_D}\right)$$

має просторовий спектр

$$\tilde{f}(v_x) = v_D \text{sinc}(v_D v_x) \frac{\sin[(2N+1)\pi V_D v_x]}{\sin(\pi V_D v_x)}.$$

Задача 1.9. Функція $f(r)$ має просторовий спектр у вигляді гаусової функції $\exp(-2\pi^2 r_o^2 v_r^2)$. Знайдіть функцію $f(r)$.

Відповідь: $f(r) = \frac{1}{2\pi r_o^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2r_o^2}\right)$.

Задача 1.10*. Визначте порогове відношення SNR_{th} порового пристрою, якщо середня частота появи хибної тривоги $f_{fa} = 10^{-5}$ Гц, а ТПСС має ширину смуги пропускання $\Delta f = 100$ кГц.

Відповідь: $SNR_{th} = 6,7$.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕПЛОВІЗОРІВ

2.1. Узагальнені характеристики джерел випромінювання

Джерелами випромінювання, яке сприймають ТПСС, є штучні або природні об'єкти (автомобілі, люди, літаки, елементи ландшафту або рослинності тощо) і фони (земна або водна поверхня, небо тощо). Об'єкти і фони характеризують енергетичними параметрами (енергетичною яскравістю) і просторовими параметрами (геометричними розмірами, формою, текстурами). При цьому для об'єктів ці параметри описують детермінованими функціями, а для фонів – випадковими.

ІЧ діапазон випромінювання характеризується *енергетичними величинами*, а для характеристики видимого випромінювання використовують *фотометричні величини*. У таблиці 2.1 наведено основні енергетичні та фотометричні величини, формули для їх розрахунку та одиниці виміру.

Між світловим потоком Φ_v та потоком випромінювання Φ_e існує взаємний зв'язок

$$\Phi_v = 683 \int_{0,38}^{0,77} V_E(\lambda) \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda, \text{ лм}, \quad (2.1)$$

де $V_E(\lambda)$ – відносна спектральна чутливість зорової системи людини, графік якої подано на рис. 2.1. У формулі (2.1) довжина хвилі вимірюється в мікрометрах.

Енергетична яскравість L_e випромінювальної площадки в цілому залежить як від розташування площадки, так і від напрямку θ_1 спостереження випромінювання. Яскравість деяких поверхонь не залежить від кута θ_1 . Їх випромінювання підпорядковується *закону Бугера-Ламберта-Бера*, який є повністю справедливим тільки для поверхонь, що ідеально розсіюють випромінювання. Енергетичну світність джерела випромінювання, яке підпорядковується цьому закону, визначають як

$$M_e = \pi L_e. \quad (2.2)$$

Таблиця 2.1

Основні енергетичні і фотометричні величини та їх одиниці

Енергетичні величини			Фотометричні величини		
Термін	Формула	Одиниця виміру	Термін	Формула	Одиниця виміру
Потік випромінювання (radiant flux)	$\Phi_e = \int_0^\infty \Phi_\lambda(\lambda) d\lambda$	1 Вт = 10^7 ерг·с	Світловий потік (luminous flux)	$\Phi_v = 683 \int_0^\infty V(\lambda) \Phi_\lambda(\lambda) d\lambda$	лм
Енергія випромінювання (radiant energy)	$Q_e = \int_0^t \Phi_e(t) dt$	1 Дж = 10^7 ерг	Світлова енергія (luminous energy)	$Q_v = \int_0^t \Phi_v(t) dt$	1 лм·с = 1 табольт
Енергетична сила світла (radiant intensity)	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	Вт/ср	Сила світла (luminous intensity)	$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$	кд
Енергетична світність (radiant emittance)	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA_1}$	1 Вт/м ² = 10^4 Вт/см ²	Світність (luminous emittance)	$M_v = \frac{d\Phi_v}{dA_1}$	$\frac{\text{лм}}{\text{м}^2}$
Енергетична освітленість (irradiance)	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA_2}$	Вт/м ²	Освітленість (luminance)	$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA_2}$	1 лк = 1 лм/м ² = 10^{-4} фот
Енергетична яскравість (radiance)	$L_{e\theta_1} = \frac{dL_{e\theta_1}}{dA_1 \cos \theta_1}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}$	Яскравість (luminance)	$L_{v\theta_1} = \frac{dL_{v\theta_1}}{dA_1 \cos \theta_1}$	1 кд/м ² = 10^{-4} стильб
Енергетична експозиція (energy exposure)	$H_e = E_e \cdot t$	$\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$	Експозиція (light exposure)	$H_v = E_v \cdot t$	лк·с

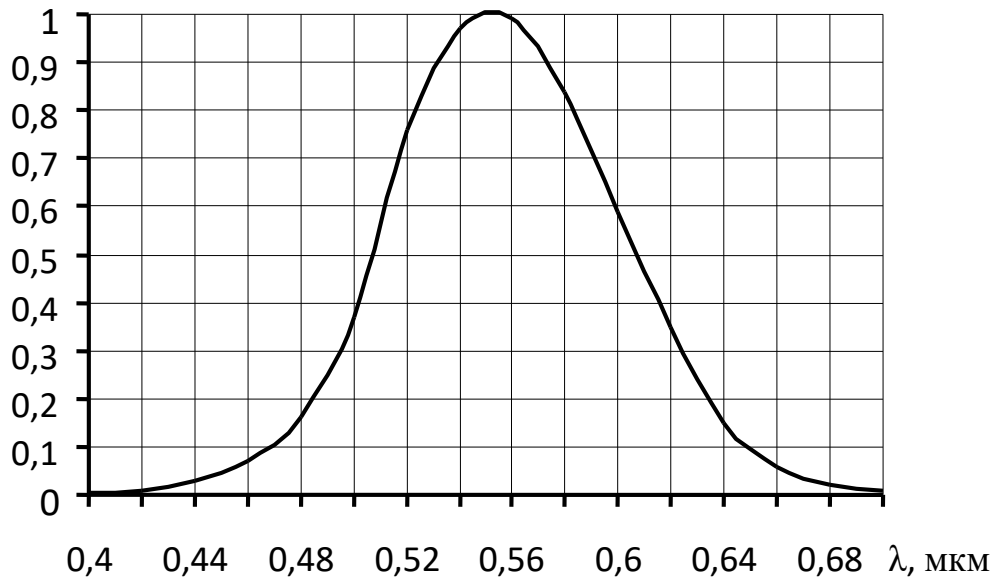


Рис. 2.1. Відносна спектральна чутливість зорової системи людини

Якщо об'єкт або фон випромінюють за законом Бугера-Ламберта-Бера (2.2), то для них енергетичний параметр зручно задавати температурою поверхні T та спектральним коефіцієнтом випромінювання $\varepsilon(\lambda)$. При цьому спектральну енергетичну світність визначають функцією Планка $M_\lambda(\lambda, T)$:

$$M(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) M_\lambda(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{мкм}}, \quad (2.3)$$

де $c_1 = 37415 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мкм}^4$, $c_2 = 14388 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ – постійні коефіцієнти; λ – довжина хвилі, мкм.

2.1.1. Енергетичні характеристики об'єктів і фонів

Об'єкти та фони можна характеризувати будь-якою енергетичною величиною їх випромінювання – потоком випромінювання Φ_e , енергетичною силою I_e , світністю M_e , енергетичною освітленістю (опроміненістю) E_e , енергетичною яскравістю L_e випромінювання. Точка визначення цих величин має бути приведена до площини об'єкту/фону, до площини вхідної зіниці ОС або до площини зображення (площини ПВ). При цьому використовують як спектральні, так і інтегральні величини.

Для кількісної оцінки фоно-цільової обстановки (ФЦО) найчастіше використовують:

1. Абсолютний контраст енергетичної яскравості

$$\Delta L_e = L_{et} - L_{eb}, \quad (2.4)$$

де $L_{et} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda t}(\lambda) d\lambda$ і $L_{eb} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda b}(\lambda) d\lambda$ – інтегральні енергетичні яскравості цілі і фон відповідно.

2. Температурний контраст

$$\Delta T = T_t - T_b, \quad (2.5)$$

де T_t і T_b – температура поверхонь цілі і фону, які існують у межах миттєвого поля зору ТПСС, відповідно.

В практиці використання ТПСС важливу роль відіграють не абсолютні значення контрастів, а відносні. У загальному випадку контраст у площині спостереження визначають як відношення різниці ΔL_e інтегральної енергетичної яскравості об'єкта L_{et} і фону довкола нього L_{eb} до більшої із них $L = \max\{L_{et}, L_{eb}\}_{\max}$:

$$C_{L1} = \frac{L_{et} - L_{eb}}{L_{\max}} = \frac{\Delta L_e}{L_{\max}}. \quad (2.6)$$

За іншими визначеннями контраст яскравості обраховують як:

$$C_{L2} = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\min}}; \quad (2.7)$$

$$C_{L3} = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}. \quad (2.8)$$

2.1.2. Просторові характеристики об'єктів і фонів

Як відмічалось раніше, Крім енергетичних характеристик об'єкти і фони описують просторовими характеристиками. Причому просторова функція енергетичної яскравості $L_{et}(x, y)$ залежить від стану поверхні об'єкта, його орієнтації, поверхневого розподілу температури $T_t(x, y)$, коефіцієнта випромінювання $\varepsilon_t(x, y)$. Для об'єктів спостереження просторовий розподіл яскравості $L_{et}(x, y)$, як правило, є детермінованою функцією, а для фонів $L_{eb}(x, y)$ – випадковою функцією.

Розподіл яскравості об'єктів і фонів можна розглядати як в області просторових координат x, y , так і в області просторових частот ν_x, ν_y .

Просторовий спектр розподілу яскравості об'єкта визначають за формулою (1.18) як

$$\tilde{L}_{et}(v_x, v_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L_{et}(x, y) \exp[-j2\pi(v_x x + v_y y)] dx dy. \quad (2.9)$$

Просторові характеристики стаціонарних ергодичних фонів в області координат x, y описують:

– середнім значенням

$$\langle L_{eb} \rangle = \frac{1}{4XY} \int_{-X}^X \int_{-Y}^Y L_{eb}(x, y) dx dy, \quad (2.10)$$

де $4XY$ – площа усереднення;

– дисперсією

$$\sigma_b^2 = \frac{1}{4XY} \int_{-X}^X \int_{-Y}^Y [L_{eb}(x, y) - \langle L_{eb} \rangle]^2 dx dy; \quad (2.11)$$

– автокореляційною функцією

$$ACF_b(x, y) = \frac{1}{4XY} \int_{-X}^X \int_{-Y}^Y [L_{eb}(\xi + x, \eta + y) - \langle L_{eb} \rangle][L_{eb}(\xi, \eta) - \langle L_{eb} \rangle] d\xi d\eta. \quad (2.12)$$

В області просторових частот фони характеризуються енергетичним спектром Вінера

$$G_b(v_x, v_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} ACF_b(x, y) \exp[-j2\pi(v_x x + v_y y)] dx dy. \quad (2.13)$$

2.1.3. Моделі об'єктів і фонів

Для математичного моделювання при розрахунках використовують певні моделі об'єктів і фонів (тест-об'єкти). Це дозволяє досліджувати різні ТПСС у певних однакових умовах. Розглянемо моделі об'єктів і фонів, які часто використовують у математичному моделюванні тепловізорів.

Згідно зі стандартом НАТО 4347 [10] під час дослідження ТПСС використовують модель об'єкта у вигляді квадратного тест-об'єкта, який має коефіцієнт випромінювання $\varepsilon_t = 1$ та розміри $V_{tp} \times W_{tp} = 2,3 \times 2,3 \text{ м}^2$. Тест-об'єкт з температурним контрастом $\Delta T = T_t - T_b = 2 \text{ К}$ вважають розміщеним на рівномірному фоні з температурою $T_b = 288 \text{ К}$ і коефіцієнтом випромінювання $\varepsilon_b = 1$.

Для вимірювання мінімальної роздільної різниці температур ТПСС використовують чотири штрихову теплову міру (так звана міра Фуко). Смуга та проміжки в цій мірі мають однакову ширину V_{tp} , а їх висота дорівнює $7V_{tp}$. Смуга і проміжки випромінюють як АЧТ з різною, але сталою температурою.

2.1.4. Приклади розрахунку характеристик моделей об'єктів і фонів

Приклад 2.1.1. Тест-об'єкт, який використовується у стандарті НАТО 4247, міститься на відстані 5 км від ТПСС. Знайдіть просторовий спектр його інтегральної яскравості в області кутових просторових частот, які мають розмірність мрад⁻¹, якщо ТПСС працює у спектральному діапазоні від 8 мкм до 14 мкм.

Розв'язання. Будемо використовувати вихідні дані про тест-об'єкт, наведені в п. 2.1.3.

1. Насамперед визначимо абсолютний контраст енергетичної яскравості за формулами (2.2) – (2.4)

$$\Delta L_e = \int_8^{14} [L_{e,tp}(\lambda) - L_{e,b}(\lambda)] d\lambda = \frac{1}{\pi} \Delta M_8^{14}.$$

За формулою Планка (2.3) знаходимо відносний інтегральний контраст світності $\Delta M_8^{14} = 0,47$ мВт/см². Тоді $\Delta L_e = 0,15$ мВт/(ср · см²).

2. Розподіл яскравості тест-об'єкта у вигляді квадрата розміром $V_{tp} \times W_{tp} = 2,3 \times 2,3$ м² описуємо функцією

$$\Delta L_e(x, y) = \Delta L_e \operatorname{rect}\left(\frac{x}{V_{tp}}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{y}{W_{tp}}\right),$$

а просторовий спектр функцією

$$\Delta \tilde{L}_e(v_x, v_y) = \Delta L_e V_{tp} W_{tp} \sin c(V_{tp} v_x) \sin c(W_{tp} v_y). \quad (2.14)$$

Для переходу від лінійних просторових частот до кутових просторових частот використаємо рис. 2.2, де V_{tp} і ϕ_{tp} – лінійний і кутовий періоди синусоїдальної міри відповідно. Лінійні і кутові просторові частоти визначають як

$$v_x = \frac{1}{V_{tp}}, \text{ мм}^{-1}; \quad \psi_x = \frac{1}{\phi_{tp}}, \text{ мрад}^{-1}.$$

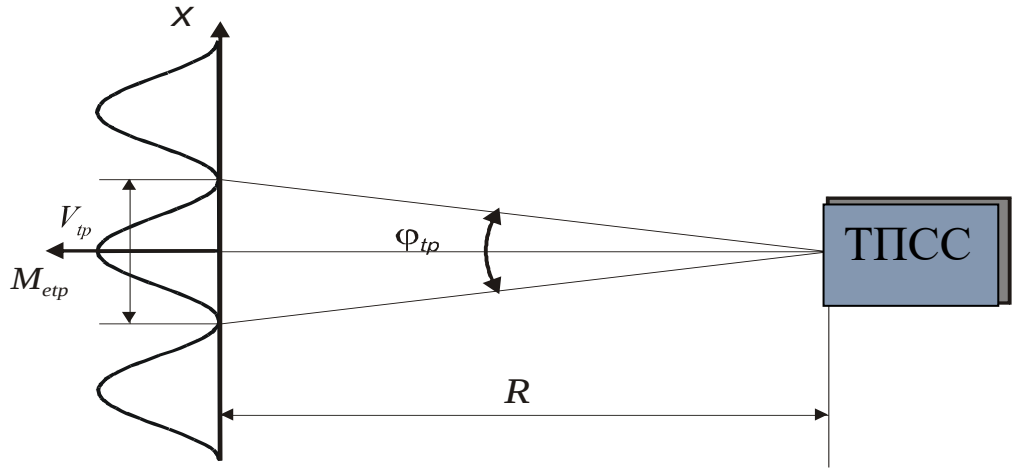


Рис. 2.2. Зв'язок між лінійним та кутовими періодами міри

Із рис. 2.2 знаходимо, що $\phi_{tp} = \frac{V_{tp}}{R}$, мрад, де R – відстань від об'єкта до ТПСС. Звідси

$$v_x = \frac{1}{V_{tp}} = \frac{R}{V_{tp}} \frac{1}{R} = \frac{\psi_x}{R}. \quad (2.15)$$

Тоді просторовий спектр інтегральної яскравості (2.14) в області кутових просторових частот матиме вигляд

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{L}_e(v_x, v_y) &= \Delta L_e V_{tp} W_{tp} \sin c \left(V_{tp} \frac{\psi_x}{R} \right) \sin c \left(W_{tp} \frac{\psi_x}{R} \right) = \\ &= 7,94 \cdot \sin c(0,46\psi_x) \cdot \sin c(0,46\psi_y). \end{aligned}$$

Приклад 2.1.2. Знайдіть просторово-частотний енергетичний спектр (спектр Вінера) фону, випадкове стаціонарне поле яскравості якого описується кореляційною функцією у вигляді гаусоїди:

$$ACF(r) = \sigma_b^2 \exp \left(-\frac{r^2}{2r_b^2} \right), \quad (2.16)$$

де σ_b^2 – дисперсія флуктуацій яскравості фону; r_b – радіус кореляції фону.

Розв'язання. Для знаходження спектра Вінера ізотропного фону використаємо формулу (2.13), записавши її у полярній системі координат аналогічно перетворенню Фур'є-Бесселя (1.22):

$$G_b(v_r) = 2\pi \int_0^\infty ACF(r) J_0(2\pi v_r r) r dr. \quad (2.17)$$

У нашому випадку

$$G_b(v_r) = 2\pi \int_0^\infty \sigma_b^2 \exp \left(-\frac{r^2}{2r_b^2} \right) J_0(2\pi v_r r) r dr.$$

Останній інтеграл розрахуємо за допомогою табличного інтеграла:

$$\int_0^{\infty} x e^{-px^2} J_n(bx) J_n(cx) dx = \frac{1}{2p} \exp\left(-\frac{b^2+c^2}{4p}\right) I_n\left(\frac{bc}{2p}\right), \quad (2.18)$$

де J_n – функція Бесселя n -го порядку першого роду; I_n – модифікована функція Бесселя n -го порядку першого роду; $x = r$; $p = \frac{1}{2r_b^2}$; $b = 2\pi\nu_r$; $c = 0$.

Тоді

$$G_b(\nu_r) = 2\pi\sigma_b^2 r_b^2 \exp(-2\pi^2 r_b^2 \nu_r^2). \quad (2.19)$$

2.2. Атмосфера

Випромінювання від об'єктів, перш ніж потрапити до ТПСС, проходить атмосферу, де воно ослаблюється. Ослаблення випромінювання залежить, головним чином, від трьох явищ: поглинання молекулами атмосферних газів; розсіювання на молекулах, аерозолях та частинках, присутніх в атмосфері; ослаблення за рахунок гідрометеорів (хмар, туману, дощу, снігу). Крім того в атмосфері відбувається викривлення хвильового фронту випромінювання (фазові викривлення), але в практиці використання ТПСС на ці ефекти поки не зважають внаслідок їх незначного впливу на якість виконання типових завдань дистанційних спостережень.

Пропускання атмосфери описують такими коефіцієнтами:

– спектральними коефіцієнтом пропускання $\tau_A(\lambda)$ і показником ослаблення $\kappa_A(\lambda)$, які зв'язані між собою законом Бугера-Ламберта

$$\tau_A(\lambda) = \frac{\Phi_\lambda(\lambda, R)}{\Phi_\lambda(\lambda, 0)} = \exp[-\kappa_A(\lambda)R], \quad (2.20)$$

де $\Phi_\lambda(\lambda, R)$ – спектральний потік випромінювання на вході ТПСС; R – відстань між об'єктом спостереження і ТПСС;

– інтегральним коефіцієнтом пропускання

$$\tau_A(R) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_\lambda(\lambda, 0) \tau_A(\lambda, R) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_\lambda(\lambda, 0) d\lambda}, \quad (2.21)$$

де $(\lambda_1 - \lambda_2)$ – робочий спектральний діапазон.

Загальний спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери визначають співвідношенням

$$\tau_\lambda(\lambda) = \tau_{H_2O}(\lambda) \tau_{CO_2} \tau_s(\lambda), \quad (2.22)$$

де $\tau_{H_2O}(\lambda), \tau_{CO_2}$ – спектральні коефіцієнти пропускання атмосфери,

зумовлені поглинанням парами води H_2O і молекулами вуглекислого газу CO_2 відповідно.

Атмосфера має спектральні області, де поглинання є дуже малим. Такі області називають *вікнами прозорості*. Сучасні ТПСС працюють у вікнах прозорості атмосфери від 3,5 мкм до 5 мкм і від 8 мкм до 14 мкм. Тепловізійні системи стеження використовують, в основному, вікно прозорості атмосфери від 8 мкм до 14 мкм, оскільки воно збігається з максимумом спектральної енергетичної світності тіл, нагрітих до атмосферних температур.

Існує багато методів розрахунку спектрального коефіцієнта пропускання атмосфери, в основу яких покладені експериментальні дані. Для розрахунку спектрального коефіцієнта пропускання атмосфери в усьому світі використовують експериментальні дані з визначення так званої метеорологічної дальності видимості (МДВ).

Метеорологічна дальність видимості R_v характеризує заму́тненість атмосфери і дорівнює найбільшій відстані видимості вдень темних об'єктів з кутовими розмірами, більшими $30'$, розміщених на фоні неба над горизонтом. Мінімальний контраст (пороговий контраст), який сприймається зоровою системою людини, становить 2 %. Тому МДВ R_v – це відстань, на якій об'єкт з одиничним контрастом після проходження атмосфери сприймається з пороговим контрастом $C_{v,th}$, тобто

$$C_v(R_v) = C_v(0) \exp(-\kappa_A R_v), \quad (2.23)$$

де згідно $C_v(R_v) = C_{v,th} = 0,02$.

Звідси

$$\kappa_A = \kappa_s = \frac{1}{R_v} \ln \frac{C_v(R_v)}{C_v(0)} = \frac{3,91}{R_v}, \quad (2.24)$$

де відстань R_v вимірюється в км, а κ_A – в км^{-1} .

За результатами натурних вимірювань встановлено, що коефіцієнт ослаблення атмосфери за рахунок розсіювання у діапазоні від 3 мкм до 14 мкм залежить від довжини хвилі як $\kappa_s \cong \lambda^{-1,3}$. Тому спектральний показник ослаблення $\kappa_A(\lambda)$ за рахунок розсіювання на атмосферних молекулах та частинках можна розрахувати за формулою

$$\kappa_A(\lambda) = \kappa_A(\lambda_0) \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^{1,3} = \frac{3,91}{R_v} \left(\frac{0,55}{\lambda} \right)^{1,3}, \quad (2.25)$$

де $\lambda_0 = 0,55$ мкм; λ – довжина хвилі.

2.3. Оптична система

Оптичні системи (ОС) ТПСС виконують такі функції:

1. Формують зображення у площині ПВ. При цьому має забезпечуватись необхідне просторове розділення (якість зображення) та енергетичне розділення (світлосила).
2. Забезпечують просторовий аналіз у заданому полі зору.

Першу функцію виконує *інфрачервоний об'єктив*, а другу – *система сканування*. Основна вимога до ОС – мати великий (достатній) коефіцієнт пропускання у робочому спектральному діапазоні ($\lambda_1 - \lambda_2$).

2.3.1. Основи габаритного розрахунку

Основна задача габаритного розрахунку – визначення фокусних відстаней, світлових діаметрів та взаємних відстаней між окремими компонентами (елементами) ОС. Для попереднього габаритного розрахунку використовують формули ідеальної ОС.

Спрощену схему об'єктива ТПСС зображено на рис. 2.3. Дія об'єктива у цій схемі описується головними площинами H , H' та фокусами F , F' , розміщення яких залежить від конкретної ОС (радіусів кривизни поверхонь, що заломлюють та відбивають промені, товщини оптичних середовищ, показників заломлення). Якщо об'єктив міститься у повітрі, то його передня та задня фокусні відстані зв'язані відношенням $f_o = f_o' > 0$. Відстань a' від задньої головної площини до ПВ та відстань a від передньої головної площини до об'єкта зв'язані між собою формулою відрізків

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f_o'}. \quad (2.26)$$

Відстані a та a' визначають лінійне (поперечне) збільшення зображення:

$$\beta' = \frac{2y'}{2y} = \frac{a'}{a}. \quad (2.27)$$

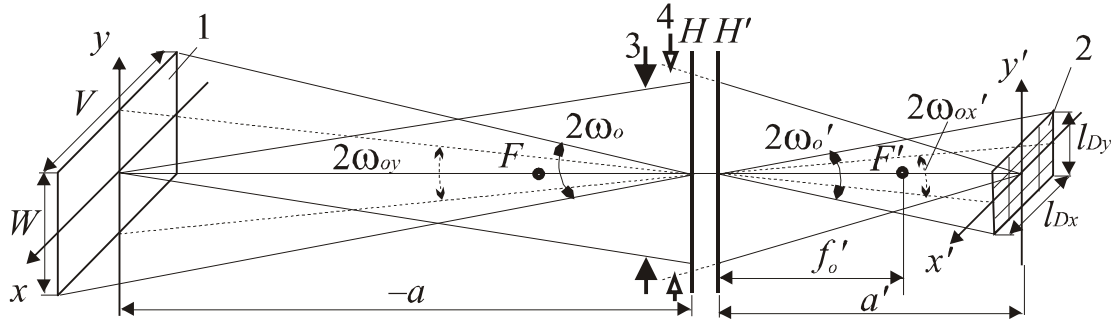


Рис. 2.3. Схема ідеальної ОС об'єктива: 1 – площина об'єкта; 2 – площина зображення; 3 – вхідна зіниця; 4 – вихідна зіниця

Поле зору ОС можна задавати як у лінійних, так і в кутових величинах як у просторі предметів, так і у просторі зображень. У більшості випадків кутове поле зору об'єктива у просторі предметів $2\omega_o$ збігається з полем зору у просторі зображень $2\omega'_o$, тобто $2\omega_o = 2\omega'_o$.

Із рис. 2.3 випливають кілька формул для розрахунку поля зору об'єктива:

$$2\omega_o = \sqrt{(2\omega_{ox})^2 + (2\omega_{oy})^2}; \quad (2.28)$$

$$2\omega_{ox} = 2\arctg \frac{l_{Dx}}{2a'}; \quad 2\omega_{oy} = 2\arctg \frac{l_{Dy}}{2a'}; \quad (2.29)$$

$$V = \frac{l_{Dx}}{|\beta'|}; \quad W = \frac{l_{Dy}}{|\beta'|}, \quad (2.30)$$

де $2\omega_{ox} \times 2\omega_{oy}$ – кутові поля зору уздовж відповідних осей; $l_{Dx} \times l_{Dy}$; $V \times W$ – лінійні поля зору у площині зображення (розмір МПВ) і у площині об'єктів відповідно.

2.3.2. Основи енергетичного розрахунку

Важливе значення для передачі випромінювання від об'єкта до ПВ має *апертурна діафрагма*, а також її зображення у просторі об'єктів та просторі зображень – *вхідна та вихідна зіниці* відповідно. Апертурна діафрагма – це той отвір в ОС, який обмежує пучок променів, що падають на осьову точку ПВ. Вона має форму круглого отвору в лінзових системах і форму кільця в дзеркальних системах.

Площа вихідної зіниці та її відстань до ПВ визначають конус променів, який формує зображення осьової точки об'єкта на ПВ. Променева енергія у цій точці зображення пропорційна тілесному куту конуса

променів. Як міру цього тілесного кута використовують *ефективне діафрагмове число*

$$k_{eff}^2 = \frac{f_o'^2}{D_p^2 - D_i^2}, \quad (2.31)$$

де D_p і D_i – зовнішній і внутрішній діаметри входної зіниці відповідно. Для лінзових систем $D_i = 0$. Для дзеркального об'єктива у випадку, коли об'єкт існує у нескінченності, діаметр D_i дорівнює діаметру малого дзеркала.

Можливість ОС концентрувати енергію випромінювання характеризують енергетичною освітленістю E'_{e0} , яка формується на чутливій поверхні ПВ за заданої енергетичної яскравості об'єкта L_{et} . Для осьової точки вісесиметричної ОС спектральну освітленість визначають формулою

$$E_{\lambda 0}(\lambda) = \frac{\pi \tau_A(\lambda) \tau_o(\lambda) L_{\lambda t}(\lambda)}{4k_{eff}^2}, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{мкм}}, \quad (2.32)$$

де $\tau_o(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт пропускання ОС.

2.3.3. Просторове розділення

Межу просторового розділення визначають розмірами чутливої площадки ПВ $V_D \times W_D$ і відстанню a' . З рис. 2.4 знаходимо найменший кут, що розділяється у напрямі осей x та y відповідно:

$$\delta\omega_x = \frac{V_D}{f_o'(1-\beta')}; \quad \delta\omega_y = \frac{W_D}{f_o'(1-\beta')}, \text{ мрад.} \quad (2.33)$$

Формула (2.33) дозволяє знайти мінімально можливі значення просторового розділення ТПСС. Більш повну характеристику просторової роздільної здатності ОС дає *модуляційна передавальна функція* (МПФ, МТФ, Modulation Transfer Function).

Найпростішим визначенням МПФ є відношення контрасту освітленості C_E у площині зображення до контрасту яскравості C_L синусоїдальної міри у площині об'єкта

$$M_o(\nu'_x) = \frac{C_E(\nu'_x)}{C_L(\nu_x)} \quad (2.34)$$

як функція просторової частоти

$$\nu'_x = \frac{1}{V'_{tp}}, \text{ мм}^{-1}, \quad (2.35)$$

де $V'_{tp} = V_{tp}\beta'$ – період зображення синусоїдальної міри (див. рис. 2.2).

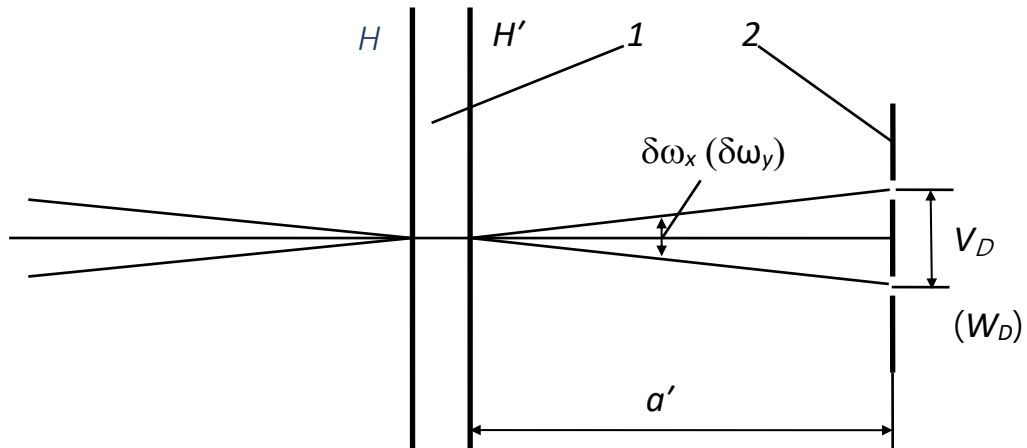


Рис. 2.4. Граничне розділення, обумовлене кінцевими розмірами чутливої площадки ПВ: 1 – ОС з головними площинами; 2 – матричний ПВ з періодом V_D у напрямі x' і W_D у напрямі y'

При дослідженнях МПФ забезпечують контраст $C_L = 1$. В цьому випадку МПФ дорівнюватиме контрасту зображення синусоїдальної міри, тобто $M_o(v'_x) = C_E(v'_x)$.

Застосування теорії лінійних систем до ОС, що створюють зображення, сформувало поняття *оптичної передавальної функції* (ОПФ, OTF – Optical Transfer Function), як нормоване Фур'є-перетворення від *функції розсіювання точки* (ФРТ, PSF – Point Spread Function). Функція розсіювання точки $PSF(x', y')$ являє собою розподіл освітленості у зображенні ідеального точкового об'єкта. У загальному випадку ОПФ визначають виразом

$$H_o(v'_x, v'_y) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} PSF(x', y') \exp[-j2\pi(v'_x x' + v'_y y')] dx' dy'}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} PSF(x', y') dx' dy'}, \quad (2.36)$$

де v'_x, v'_y – просторові частоти, мм^{-1} .

Модуль ОПФ називають *модуляційною передавальною функцією*, тобто $|H_o(v'_x, v'_y)| = M_o(v'_x, v'_y)$. Тільки для дифракційно обмеженої ОС з центральним екрануванням та без нього можна точно розрахувати ОПФ. Модуляційну передавальну функцію дифракційно обмеженого об'єктива із круглою входною зіницею діаметром D_p без центрального екранування

визначають функцією

$$M_o(v'_x) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} (\arccos x - x\sqrt{1-x^2}), & \text{якщо } 0 \leq x \leq 1; \\ 0, & \text{якщо } x > 1, \end{cases} \quad (2.37)$$

де

$$x = \lambda \frac{f'_o}{D_p} v'_x. \quad (2.38)$$

Максимальне значення просторової частоти знаходять з рівняння $M_o(v'_x) = 0$. Розв'язком цього рівняння є

$$v'_{x\max} = \frac{D_p}{\lambda f'_o} \text{ мм}^{-1}. \quad (2.39)$$

Графік МПФ дифракційно обмеженої ОС показано на рис. 2.5.

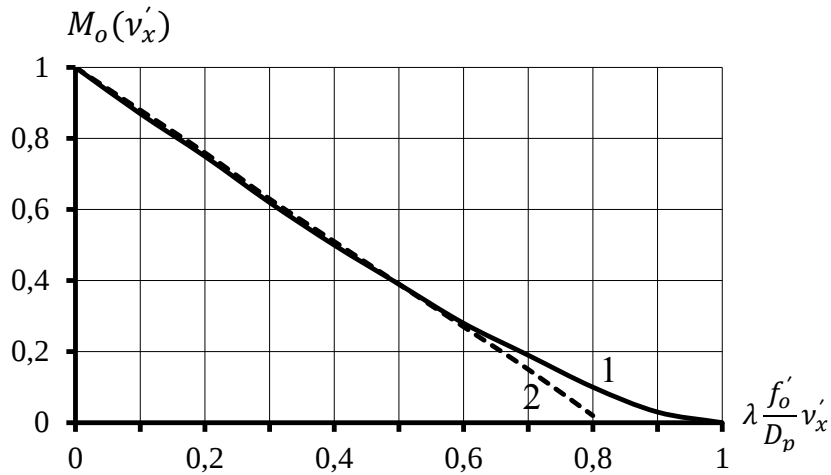


Рис. 2.5. Модуляційна передавальна функція дифракційно обмеженої ОС (графік 1) та її лінійна апроксимація (графік 2)

Нормовану ФРТ дифракційно обмеженої системи визначають функцією

$$PSF_{n,dl}(x', y') = PSF_{n,dl}(r') = \left[\frac{2J_1\left(\pi \frac{D_p r'}{\lambda f'_o}\right)}{\pi \frac{D_p r'}{\lambda f'_o}} \right]^2. \quad (2.40)$$

Графік ФРТ дифракційно обмеженої ОС показано на рис. 2.6.

Розподіл освітленості у зображенні точкового джерела, що формує дифракційно обмежена ОС, називають *картиною Ейрі*. Це зображення є світлою круглою плямою (так званий кружок Ейрі), навколо якої розміщені світлі концентричні кільця. Радіус кружка Ейрі, як впливає із формули (2.40), дорівнює

$$r_E = 1,22 \lambda \frac{f'_o}{D_p}. \quad (2.41)$$

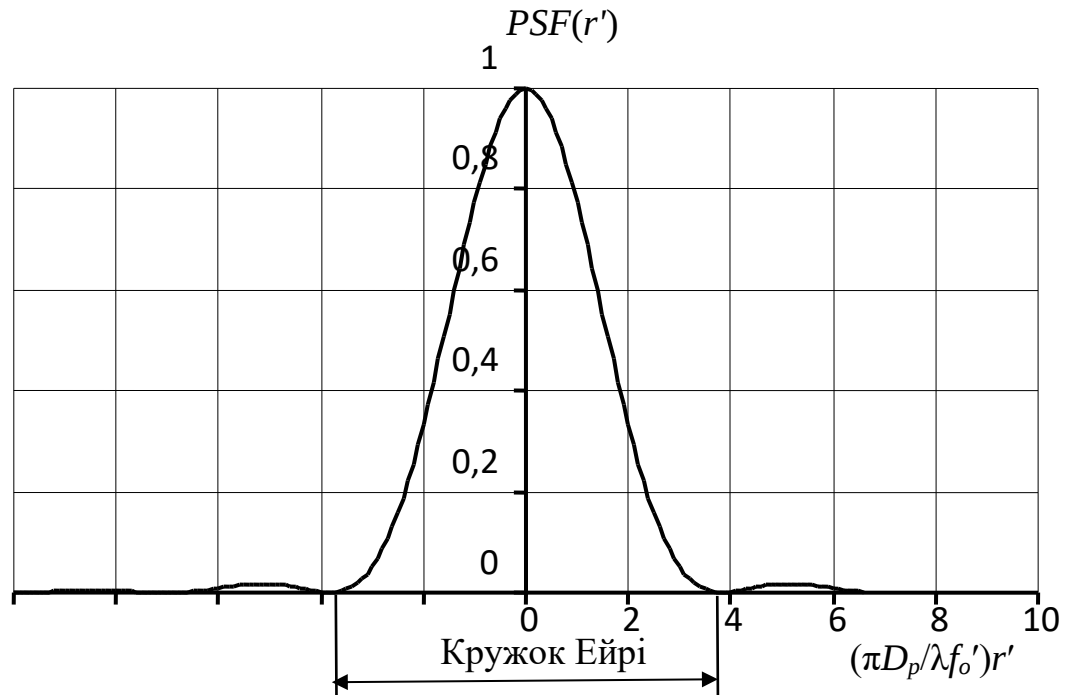


Рис. 2.6. Нормована ФРТ дифракційно обмеженої ОС

Кружок Ейрі визначає мінімально можливу відстань між зображеннями двох точок, які спостерігаються роздільно (окремо). Наприклад, для об'єктива з відносним отвором $D_p : f_o' = 1 : 1$ при $\lambda = 10$ мкм кружок Ейрі має діаметр 24,4 мкм, а при $\lambda = 0,55$ мкм – 1,34 мкм.

Для позаосьових точок МПФ найчастіше визначають у меридіональному та сагітальному розрізах. Для аналітичної оцінки якості зображення, що створює ОС, необхідно визначити математичний вигляд МПФ. Сучасні комп'ютерні програми дозволяють розрахувати МПФ реальної системи. Також МПФ конкретної ОС можна виміряти з допомогою відповідного лабораторного обладнання.

Для математичного моделювання ОС використовують аналітичні апроксимації МПФ. В табл. 2.1 наведено приклади трьох таких апроксимацій МПФ [8]. Використання тієї чи іншої формули залежить від вигляду МПФ. Формула 1 є лінійним наближенням дифракційно обмеженої системи з урахуванням центрального екранування. Параметр $\eta_{di} < 1$ зумовлений дифракцією і є важливим, оскільки від нього залежить вигляд МПФ. Формули 2 і 3 описують МПФ, задані окремими парами значень

(v'_{x1}, M_{o1}) . При цьому параметр n обирають довільно. Апроксимація МПФ функцією Гауса 3 дозволяє легко виконати перетворення Фур'є. Проте за такої апроксимації відбувається нетипове для ОС падіння контрасту, тому що за $v'_x \rightarrow \frac{0}{\partial v_x} \rightarrow 0$.

Таблиця 2.1

Функції для апроксимації МПФ

	1	2	3
$M_o(v'_x)$	$1 - a \frac{v'_x}{\eta_{di}}$	$(1 - av'_x)^n$	$\exp \left[- \left(a \frac{v'_x}{v'_{x1}} \right)^2 \right]$
$v'_{x1}(M_o = 0)$	$\frac{\eta_{di}}{a}$	$\frac{1}{a}$	—
a	$\frac{1,218}{D_o - D_i} \left(1 - \frac{\beta'}{\beta_p} \right) \lambda f'_o$	$\frac{1}{v'_{x1}} (1 - \sqrt[n]{M_{o1}})$	$\sqrt{\ln \left(\frac{1}{M_{o1}} \right)}$

Важливим параметром ОС, що створює зображення, є роздільна здатність v'_{res} , тобто здатність системи створювати роздільним зображення двох точкових джерел випромінювання однакової інтенсивності, розміщені одне біля одного. Просторову роздільну здатність визначають як величину, обернену до подвійної найменшої відстані між двома точками зображення, що формуються роздільно.

Класичне просторове розділення визначається *критерієм Релея*, згідно з яким дві точки зображення спостерігаються роздільно, якщо центр дифракційного зображення однієї точки збігається з першим мінімумом дифракційного зображення другої точки (рис. 2.6). Із цього критерію випливає, що відстань між зображеннями двох точок, що спостерігаються роздільно, дорівнює радіусу кружка Ейрі (2.41). Звідси знаходимо роздільну здатність об'єктива визначають за формулою

$$v'_{res} = \frac{1}{2r_E} = \frac{1}{2,44\lambda} \frac{D_o}{f'_o}. \quad (2.42)$$

2.3.4. Геометрична шумова смуга пропускання [10, 11]

В електронних інформаційних системах, що обробляють відеосигнали з метою створення зображення, багато років з великим успіхом застосовують ефективну шумову смугу Δf , яку визначають наступним чином. Нехай електронна система має МПФ $M_{El}(f)$, яка визначається її амплітудно-частотною характеристикою. Якщо на вхід такої системи надходить шумовий сигнал з енергетичною щільністю $G_n(f)$, то ефективну шумову смугу визначають як

$$\Delta f = \frac{\int_0^\infty G_n(f) M_{El}^2(f) df}{G_n^{max}}. \quad (2.43)$$

У більшості випадків оптико-електронні прилади працюють у діапазоні частот, коли шум можна вважати «білим», тобто $G_n(f) = G_o = \text{const}$. Тоді вираз (2.43) матиме вигляд

$$\Delta f = \int_0^\infty M_{El}^2(f) df. \quad (2.44)$$

Співвідношення (2.44) означає, що здатність електронної системи з МПФ $M_{El}(f)$ перетворювати шумовий сигнал еквівалентна електронній системі з МПФ

$$M_{El}^{eff} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } 0 \leq f \leq \Delta f; \\ 0, & \text{якщо } f > \Delta f, \end{cases} \quad (2.45)$$

тобто така МПФ має прямокутну форму.

Аналогічний підхід використаємо і для ОС, яка має МПФ $M_o(\nu_x, \nu_y)$. При цьому необхідно враховувати деякі особливості такого підходу:

1. На відміну від одновимірної МПФ електронної системи, МПФ ОС є двовимірною функцією просторових частот ν_x, ν_y , які вимірюються в мм^{-1} .

2. На відміну від часової частоти f , яка змінюється у межах від 0 до ∞ , просторові частоти ν_x, ν_y змінюються у межах від $-\infty$ до ∞ .

За аналогією з формулою (2.44) *геометричну шумову смугу пропускання* GNBW (Geometrical Noise Bandwidth) визначимо як

$$GB = \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty M_o^2(\nu_x, \nu_y) d\nu_x d\nu_y. \quad (2.46)$$

У формулі (2.46) права частина визначає об'єм фігури, обмежений поверхнею $M_o^2(\nu_x, \nu_y)$, а ліва частина – об'єм паралелепіпеда, який має

основу площею GB і висоту, що дорівнює одиниці. Такий підхід базується на тому факті, що усі ПВ мають чутливу площадку певних розмірів і тому являють собою інтегральні фільтри в області просторових частот. Крім того, ПВ завжди формує вихідний сигнал разом із шумовим сигналом. Аналогом геометричного шуму в ОС може бути кружок розсіювання.

Якщо МПФ $M_o(v_x, v_y)$ є функцією з роздільними змінними, тобто $M_o(v_x, v_y) = M_{ox}(v_x)M_{oy}(v_y)$, то геометричну шумову смугу (2.46) визначають як

$$GB = \Delta v_x \Delta v_y = \int_{-\infty}^{\infty} M_{ox}^2(v_x) dv_x \cdot \int_{-\infty}^{\infty} M_{oy}^2(v_y) dv_y. \quad (2.47)$$

Якщо МПФ $M_o(v_x, v_y)$ є вісесиметричною функцією, тобто $M_o(v_x, v_y) = M_o(v_r)$, де $v_r = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ – радіус просторової частоти в полярній системі координат, то геометричну шумову смугу визначають як

$$GB = 2\pi \int_0^{\infty} M_o^2(v_r) v_r dv_r. \quad (2.47')$$

Для вісесиметричної МПФ роздільну здатність v_{res} можна подати як радіус циліндра з висотою, рівною одиниці, об'єм якого дорівнює об'єму під поверхнею $M_o^2(v_r)$, тобто $GB = \pi v_{res}^2$. Звідки

$$v_{res} = \sqrt{\frac{GB}{\pi}} = \sqrt{2 \int_0^{\infty} M_o^2(v_r) v_r dv_r}. \quad (2.48)$$

Як приклад розрахунку геометричної шумової смуги та роздільної здатності розглянемо ОС, МПФ якої апроксимується формулою 3 із табл. 2.1. Подамо цю формулу для вісесиметричної МПФ у вигляді

$$M_o(v_r) = \exp(-2\pi^2 r_o^2 v_r^2), \quad (2.49)$$

де r_o – радіус кружка розсіювання на рівні 0,606 від максимального значення освітленості.

Радіус r_o може бути визначений за формулою 3 із табл. 2.1 за

$$M_{o1} = e^{-1} \text{ і } v_{x1} = (\sqrt{2}\pi r_o)^{-1}.$$

Функція розсіювання точки такої ОС має вигляд

$$PSF(r') = \frac{1}{2\pi r_o^2} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{r'}{r_o}\right)^2\right]. \quad (2.50)$$

Підставимо (2.49) в (2.47):

$$GB = 2\pi \int_0^{\infty} \exp(-4\pi^2 r_o^2 v_r^2) v_r dv_r = \frac{1}{4\pi r_o^2}. \quad (2.51)$$

Тоді роздільна здатність ОС згідно з (2.48) дорівнює

$$v_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi r_o}. \quad (2.52)$$

При цьому замість лінійного розділення у просторі зображення часто використовують кутове розділення у просторі об'єкта

$$\delta\omega_o = \frac{1}{2v_{\text{res}}f_o}. \quad (2.53)$$

Таким чином, геометрична шумова смуга пропускання є узагальненим параметром, який визначає роздільну здатність оптичних та оптико-електронних приладів, що створюють зображення. Ця смуга дозволяє з однакових позицій дослідити як оптичні, так і електронні елементи ТПСС.

2.3.5. Приклади розрахунку параметрів оптичних систем

Приклад 2.3.1. Виведіть формулу для кутового розділення ОС $\delta\omega_o$ залежно від розмірів чутливого елемента $V_D \times W_D$ ПВ за умови, що ОС і ПВ однаково зменшують контраст зображення.

Розв'язання. 1. З табл. 2.1 обираємо для апроксимації МПФ формулу 2 у лінійному наближенні:

$$M_o = 1 - \left(\frac{1-M_{o1}}{v'_{x1}} \right) v'_x,$$

де M_{o1}, v'_{x1} – координати заданої точки МПФ.

2. Одновимірну просторову передавальну функцію ПВ знаходимо за формулою (2.69): $M_{Ds} = \frac{\sin(\pi V_D v'_x)}{\pi V_D v'_x}$ або $M_{Ds} = \frac{\sin(\pi W_D v'_y)}{\pi W_D v'_y}$. Оскільки МПФ швидко зменшується, то для отримання мінімального кута $\delta\omega_o$ потрібно використовувати мінімальне значення розміру чутливого елемента. Нехай $V_D < W_D$. Тоді МПФ уздовж осі x буде $M_{Ds} = \frac{\sin(\pi V_D v'_x)}{\pi V_D v'_x}$.

3. З умови, що ОС і ПВ однаково зменшують контраст зображення, маємо $M_o = M_{Ds} = Y < 1$. З функції п. 2 маємо $V_D v'_x = X(Y)$, а з функції п. 1 – $v'_x = (1 - Y) \frac{v'_{x1}}{1 - M_{o1}}$. Система отриманих рівнянь дає значення просторової частоти $v'_{x1} = \frac{1 - M_{o1}}{V_D} \frac{X(Y)}{1 - Y}$. Ця просторова частота визначає кутове розділення ОС згідно з формулою (2.53):

$$\delta\omega_{M_{o1}} = \frac{1}{2f_o v'_{x1} (1 - \beta')} = \frac{V_D}{2f_o (1 - \beta') (1 - M_{o1})} m(Y), \quad (2.54)$$

де $m(Y) = \frac{1-Y}{X(Y)}$; Y – величина контрасту, однакова для обох МПФ.

Наприклад, для $Y = 0,5$ $m = 0,833$.

Приклад 2.3.2. Лінзовий ІЧ об'єктив системи FLIR має фокусну відстань $f_o = 250$ мм, апертуру $f_o/4$, робочий спектральний діапазон від 8 мкм до 14 мкм, роздільну здатність при 90 %-му контрасті, обмежену дифракцією. Яке кутове розділення має об'єктив, якщо величина МПФ $M_{o1} = 0,5$?

Розв'язання. 1. З табл. 2.1 обираємо лінійне наближення МПФ, обмеженої дифракцією:

$$M_o = 1 - \frac{1,218}{D_p} f_o' \lambda \frac{v_x'}{\eta_{di}}.$$

2. З умови прикладу знаходимо, що $\frac{D_p}{f_o'} = 0,25$ і $\eta_{di} = 0,9$. Тоді

$$M_o(v_x') = 1 - 5,413 \lambda v_x'.$$

3. Кутове розділення за величини МПФ M_{o1} визначають за формулою (2.54):

$$\delta\omega_1 = \frac{5,413 \lambda}{2 f_o' (1 - M_{o1})}.$$

4. Використовуючи останню формулу, знаходимо кутове розділення для $\lambda = 10$ мкм та $f_o' = 250$ мм. Якщо значення МПФ $M_{o1} = 0,5$, маємо, що $\delta\omega_1$ дорівнює 0,22 мрад.

Приклад 2.3.3. Визначте на основі рівняння (2.36) ОПФ H_o і роздільну здатність v'_{res} інфрачервоного об'єктива з вісесиметричною ФРТ (2.50), яка має радіус $r_o = 5$ мкм.

Розв'язання. 1. ОПФ визначаємо за формулою (2.36), записавши ФТР у прямокутній системі координат:

$$H_o(v_x', v_y') = \frac{\int \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[-\frac{x'^2 + y'^2}{2r_o^2} \right] \exp[-j2\pi(v_x'x' + v_y'y')] dx' dy'}{\int \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[-\frac{x'^2 + y'^2}{2r_o^2} \right] dx' dy'}.$$

Оскільки під інтегралами містяться функції із змінними, що розділяються, перейдемо в останньому виразі від двократних інтегралів до однократних:

$$H_o(v'_x, v'_y) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{x'^2}{2r_o^2} - j2\pi v'_x x'\right] dx' \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{y'^2}{2r_o^2} - j2\pi v'_y y'\right] dy'}{\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{x'^2}{2r_o^2}\right) dx' \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{y'^2}{2r_o^2}\right) dy'}.$$

Для подальших обчислень скористаємося табличним інтегралом:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-px^2 - qx) dx = \sqrt{\frac{\pi}{p}} \exp\left(\frac{q^2}{4p}\right),$$

де $p = \frac{1}{2r_o^2}$; $q = j2\pi v'_x$ (для знаменника $q = 0$); $x = x'$. Тоді

$$\begin{aligned} H_o(v'_x, v'_y) &= \frac{\sqrt{2\pi r_o^2} \exp\left(-2\pi^2 r_o^2 v'^2_x\right) \sqrt{2\pi r_o^2} \exp\left(-2\pi^2 r_o^2 v'^2_y\right)}{\sqrt{2\pi r_o^2} \sqrt{2\pi r_o^2}} = \\ &= \exp\left[-2\pi^2 r_o^2 (v'^2_x + v'^2_y)\right] = \exp\left(-2\pi^2 r_o^2 v'^2_r\right), \end{aligned}$$

де $v'_r = \sqrt{v'^2_x + v'^2_y}$ – радіус просторової частоти у полярній системі координат.

Таким чином, даний об'єктив має ОПФ та ФРТ у вигляді гаусоїд обертання.

2. Проаналізуємо тепер вирази для ФРТ і ОПФ. Якщо $r' = r_o$, то $PSF(r_o) = \exp\left(-\frac{1}{2}\right) = 0,607$, тобто r_o відповідає радіусу, за якого освітленість у зображенні точки зменшується до рівня 0,607 від максимального значення.

Визначимо просторову частоту v_{rC} , яка відповідає зниженню контрасту у зображенні до рівня C . Для цього використовуємо рівняння $|H_o| = C = \exp(-2\pi^2 r_o^2 v_{rC}^2)$. Звідси

$$v'_{rC} = \sqrt{\frac{\ln\left(\frac{1}{C}\right)}{2\pi^2}} \frac{1}{r_o}.$$

У таблиці подано значення просторової частоти, що відповідає заданому контрасту.

C	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
$v_{rC} r_o$	0,073	0,106	0,134	0,161	0,187	0,215	0,247	0,286	0,342

3. Роздільну здатність визначимо за формулою (2.48):

$$\begin{aligned} \nu_{res} &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-4\pi^2 r_o^2 (v_x'^2 + v_y'^2)\right] dv_x' dv_y' =} \\ &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-4\pi^2 r_o^2 v_x'^2) dv_x' \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-4\pi^2 r_o^2 v_y'^2) dv_y'} . \end{aligned}$$

Для обчислення використаємо наведений раніше табличний інтеграл,

$$\text{де } p = 4\pi^2 r_o^2; q = 0. \text{ Тоді } \nu_{res} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\pi}{4\pi^2 r_o^2}} \sqrt{\frac{\pi}{4\pi^2 r_o^2}}} = \frac{1}{2\pi r_o}.$$

Наприклад, якщо $r_o = 5$ мкм, то $\nu_{res} = 32$ мм⁻¹.

2.4. Приймач випромінювання

Приймач випромінювання (ПВ, детектор) є найважливішим елементом ТПСС, де він здійснює перетворення слабких потоків випромінювання з низьким контрастом в електричний сигнал.

2.4.1. Основні характеристики приймачів випромінювання

Розглянемо тільки ті характеристики ПВ, які будемо використовувати при проєктуванні ТПСС.

Чутливість R_D – це відношення електричного сигналу (напруги u_s або струму i_s) до оптичного сигналу (потoku випромінювання Φ_e' , освітленості E_e' , експозиції H_e'), який падає на чутливу площадку ПВ і створює електричний сигнал:

$$R_D = \frac{u_s}{\Phi_e'}, \frac{B}{\text{Вт}}. \quad (2.55)$$

Спектральну чутливість $R_D(\lambda)$ визначає, перш за все, матеріал чутливого елемента ПВ. Більшість ПВ мають захисні вікна, які виконують роль додаткового спектрального фільтра.

Частотна характеристика чутливості $R_D(f)$ – це залежність чутливості від частоти модуляції f потоку випромінювання, який падає на ПВ. Ця характеристика залежить від постійної часу ПВ t_D або відповідної релаксаційної частоти:

$$f_D = \frac{1}{2\pi t_D}, \quad (2.56)$$

де f_D – частота модуляції потоку випромінювання, за якої чутливість ПВ зменшується до 0,707 від максимального значення (або на 3 dB).

Спектр потужності шуму $G_n(f)$ або $NPS(f)$ (Noise Power Spectrum) залежить від частоти f і визначається як

$$G_n(f) = \frac{dP_n(f)}{df}, \quad (2.57)$$

де $P_n(f)$ – потужність шумового сигналу на виході ПВ. Інколи функція $NPS(f)$ визначається як нормоване значення спектру шуму

$$NPS(f) = \frac{G_n(f)}{G_{n,max}}. \quad (2.58)$$

Якщо функція $G_n(f) = G_n = \text{const}$ не залежить від частоти f , то такий шум називають «білим».

Потужність, еквівалентна шуму NEP (Noise Equivalent Power), або пороговий потік $\Phi_{e\min}$ – це таке значення потоку випромінювання, що створює на виході ПВ сигнал, який дорівнює середньоквадратичному значенню шуму u_n у заданій смузі частот:

$$NEP = \Phi_{emin} = \frac{u_n}{R_D}. \quad (2.59)$$

Ефективна шумова смуга Δf характеризує здатність підсилювача перетворювати сигнал і шум ПВ. Її визначають співвідношенням

$$\Delta f = \frac{1}{G_{n,max} \int_0^\infty G_n(f) M_{El}^2(f) df}, \quad (2.60)$$

де $M_{El}(f)$ – МПФ підсилювача (нормований частотний коефіцієнт підсилення).

Питома виявлювальна здатність D^* характеризує шумові властивості ПВ і визначається за формулою

$$D^* = \frac{\sqrt{A_D \Delta f}}{NEP}, \frac{\text{см} \cdot \sqrt{\Gamma_{\Pi}}}{\text{Вт}}, \quad (2.61)$$

де A_D – площа чутливої площадки ПВ, см^2 .

Питома виявлювальна здатність D^* залежить від температури об'єкта T_t , робочої температури ПВ T_D , довжини хвилі λ і частоти модуляції випромінювання f . У загальному випадку апроксимувати функцію $D^*(T_t, T_D, \lambda, f)$ неможливо. Тому D^* визначають для конкретних умов. Звичайно $D^*(T_t)$ визначають відносно АЧТ. Завжди з підвищенням робочої

температури T_D шуми ПВ зростають.

Із формул (2.59) і (2.61) можна встановити зв'язок між чутливістю R_D і питомою виявлювальною здатністю D^* :

$$R_D = D^* \frac{u_n}{\sqrt{A_D \Delta f}}. \quad (2.62)$$

Із цієї формули випливає, що спектральна $D^*(\lambda)$ і частотна $D^*(f)$ – питомі виявлювальні здатності пропорційні до відповідних чутливостей $R_D(\lambda)$ і $R_D(f)$ ПВ.

У деяких випадках для оцінки температурної чутливості і порівняння мікроболометричних матриць використовують параметр *еквівалентна шуму різниця температур NETD*, який характеризує ТПСС в цілому. Параметр *NETD* розраховують за формулою

$$NETD = \frac{4}{\sqrt{2A_D t_i \cdot D_{th}^* \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda}}. \quad (2.63)$$

де A_D – площа пікселя; t_i – час інтегрування; D_{th}^* – питома виявлювальна здатність; $M_\lambda(\lambda, T)$ – функція Планка.

2.4.2. Модуляційна передавальна функція

Модуляційну передавальну функцію ПВ описують добутком двох функцій: просторової МПФ M_{Ds} , обумовленої геометричною формою чутливої площадки, і часової МПФ M_{Dt} , обумовленої інерційністю ПВ. Загальну МПФ ПВ визначають добутком

$$M_D = M_{Ds} M_{Dt}. \quad (2.64)$$

Просторова МПФ є модулем нормованого перетворення Фур'є від розподілу чутливості $R_D(x', y')$ у межах чутливої площадки ПВ. Для одного елементного ПВ, чутливість якого в межах площадки прямокутної форми $V_D \times W_D$ постійна, просторову МПФ визначають функцією

$$M_{Ds}(v'_x, v'_y) = \frac{\sin(\pi V_D v'_x)}{\pi V_D v'_x} \frac{\sin(\pi W_D v'_y)}{\pi W_D v'_y}. \quad (2.65)$$

Така МПФ має перше нульове значення за $v'_{x01} = \frac{1}{V_D}$ і $v'_{y01} = \frac{1}{W_D}$. За вищих просторових частот МПФ стає від'ємною, тобто відбувається реверсування контрасту. Під час проектування ТПСС розмір чутливої площадки ПВ завжди повинен задовольняти умові

$$\begin{pmatrix} V_D \\ W_D \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} \frac{1}{v'_{x\max}} \\ \frac{1}{v'_{y\max}} \end{pmatrix}, \quad (2.66)$$

де $v'_{x\max}$ і $v'_{y\max}$ – максимальні просторові частоти сформованого зображення у площині ПВ уздовж відповідних координат.

У більшості випадків під час проєктування ТПСС дотримуються більш жорстких умов:

$$\begin{pmatrix} v'_{x\max} \\ v'_{y\max} \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} v_{Nx} = \frac{1}{2V_D} \\ v_{Ny} = \frac{1}{2W_D} \end{pmatrix}, \quad (2.67)$$

де v_N – частота Найквіста.

Найтиповішою часовою МПФ є МПФ низькочастотного фільтра:

$$M_{Dt}(f) = [1 + (2\pi t_D f)^2]^{-0.5}. \quad (2.68)$$

Загальна МПФ ПВ M_D повинна залежати від просторової частоти v'_x або від часової частоти f . Перехід від однієї частоти до іншої здійснюється за допомогою співвідношення

$$f t_o = v'_x V_D. \quad (2.69)$$

Під час проєктування ТПСС важливо узгодити між собою параметри час формування одного елементу зображення t_o і постійну часу ПВ за формулою

$$t_D \leq \frac{t_o}{\pi}. \quad (2.70)$$

Модуляційну передавальну функцію МПВ часто зручно подавати у вигляді добутку двох функцій: МПФ $M_{Ds1}(v_x, v_y)$ чутливої площадки пікселя і МПФ $M_{Dsd}(v_x, v_y)$, що враховує процес просторової вибірки, яку здійснює МПВ. Для прямокутної форми чутливої площадки розміром $V_D \times W_D$ МПФ $M_{Ds1}(v_x, v_y)$ має вигляд, аналогічний (2.68).

Функцію $M_{Dsd}(v_x, v_y)$ визначають періодом вибірки. Якщо період вибірки матричної структури $V_D \times W_D$, то функція $M_{Dsd}(v_x, v_y)$ має вигляд

$$M_{Dsd}(v_x, v_y) = \sin c(V_D v_x) \sin c(W_D v_y). \quad (2.71)$$

2.4.3. Приклади розрахунку параметрів приймачів випромінювання

Приклад 2.4.1. Розрахуйте питому виявлювальну здатність мікроболометричної матриці U 3000, яка має такі параметри:

- період матриці $V_D \times W_D = 51 \times 51$ мкм²;
- коефіцієнт заповнення $k_{Dff} = 0,5$;
- еквівалентна шуму різниця температур $NETD = 0,08$ К;
- постійна часу $t_D = 25$ мс;
- робочий спектральний діапазон $(\lambda_1 - \lambda_2) = (8 - 14)$ мкм.

Розв'язання. Використаємо формулу (2.63) для визначення параметра $NETD$ теплових ПВ. Із цієї формули маємо

$$NETD = \frac{4}{\sqrt{2A_D t_i} \cdot D_{th}^* \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_{\lambda}(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda}. \quad (2.72)$$

У формулі (2.63) відомі:

- період матриці $V_D \times W_D = 51 \times 51 =$ мкм²;
- коефіцієнт заповнення $k_{Dff} = 0,5$;
- еквівалентна шуму різниця температур $NETD = 0,08$ К;
- постійна часу $t_D = 25$ мс;
- робочий спектральний діапазон $(\lambda_1 - \lambda_2) = (8 - 14)$ мкм.

Площу чутливого елемента знайдемо із формули

$$A_D = (V_D W_D) k_{Dff} = 13 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2,$$

де k_{Dff} - коефіцієнт заповнення матриці чутливими пікселями.

Час інтегрування (накопичення) t_i може змінюватись у певних межах залежно від режиму роботи ПВ. Але він не може бути більшим від періоду кадрової розгортки $t_f \leq t_D$. Для частоти кадрів $f_f = 100$ Гц максимальний час інтегрування $t_i = \frac{1}{f_f} = 0,01$ с.

Визначимо інтеграл у формулі (2.63). У більшості випадків для вимірювання параметра $NETD$ використовують тест-об'єкт з температурою $T = 500$ К.

Із табл. 3.6 знаходимо для спектрального діапазону від 8 мкм до 14 мкм значення інтеграла [11]

$$I_2 = \int_8^{14} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T=500 \text{ K})}{\partial T} d\lambda = 699 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{К}}.$$

Після підстановки вихідних даних у формулу (2.63) маємо

$$D_{th}^* = \frac{4}{\sqrt{2 \cdot 13 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-2} \cdot 0,08 \cdot 699 \cdot 10^{-6}}} \approx 1,4 \cdot 10^8 \frac{\text{см} \sqrt{\text{Гц}}}{\text{Вт}}.$$

2.5. Електронний тракт обробки відеосигналів

Склад електронних блоків ТПСС залежить від призначення конкретної системи. Але більшість із систем містить блоки, які виконують однакові операції з обробки сигналів з пікселів МПВ. Первинна обробка відбувається у блоці ПВ, який складається із МПВ і схеми зчитування. Схема зчитування містить накопичувальні комірки, попередні підсилювачі, схеми вибірки і зберігання сигналів на час їх зчитування, щоб звести до мінімуму кількість виходів блоку ПВ.

Після аналогової обробки (вибірки і збереження) отримані дані мультиплексуються в АЦП за декількома каналами. У ПЗЗ-структурах відбувається послідовна обробка сигналів, причому одно каналний відеосигнал за постійної частоти кадрів має набагато більшу частоту вибірки пікселів. Електронний тракт сучасних ТПСС, що виконує обробку сигналів з МПВ, дозволяє отримати на виході аналоговий сигнал з розділенням від 14 біт до 16 біт.

На виході мультиплексора, крім корисного сигналу, також присутні сигнали часового та геометричного шумів. Останній обумовлений неоднорідністю параметрів чутливих елементів МПВ і схеми зчитування, а його амплітуда може бути значно більшою за корисний сигнал. Для зменшення геометричного шуму виконують спеціальну обробку сигналів - компенсацію або корекцію неоднорідності, яка може виконуватись до перетворення аналогових сигналів у цифрові.

У загальному випадку електронний тракт виконує дві основні функції:

- формування й обробки відеосигналу, який несе інформацію про об'єкт спостереження;
- реалізацію алгоритму керування усіма підсистемами ТПСС.

Отже ПВ перетворює оптичний сигнал, що несе інформацію про об'єкт спостереження, в електричний відеосигнал, який після попереднього

підсилення обробляється в аналоговій або цифровій формі. Аналогова обробка полягає у виділенні із відеосигналу істотних ознак про об'єкт з метою його виявлення та розпізнавання при малих контрастах яскравості на граничній дальності. Для цього відеосигнал з ПВ лінійно підсилюється до необхідної величини, після чого може здійснюватися його спектральна фільтрація і гамма-корекція, додавання та віднімання кадрів, псевдокольорове кодування, логарифмічне підсилення тощо.

Під час цифрової обробки аналоговий відеосигнал перетворюється в дискретну форму у відповідності з вибраним алгоритмом кодування. При цьому вирішуються такі задачі: покращення якості зображення за рахунок збільшення відношення сигнал/шум; підвищення контрастності та різкості; виділення пріоритетних ознак об'єкта; псевдокольорове кодування; зменшення відеосигналу від фонів і завад; побудова контурів зображення об'єкта; визначення координат об'єкта; автоматизоване або автоматичне виявлення та розпізнавання об'єкта; введення додаткової службової інформації тощо.

У більшості випадків під час проєктування ТПСС електронний тракт вважають лінійною системою з МПФ, яку можна визначити як

$$M_{El}(f) = \frac{C_{El}(f)}{C_{El}^{max}}, \quad (2.64)$$

де $C_{El}(f)$ – коефіцієнт підсилення на частоті f ; C_{El}^{max} – максимальне значення коефіцієнта підсилення.

Під час подальшого проходження сигналу і шуму по електронному тракту ТПСС вони дискредитуються у часі і квантуються по амплітуді.

Смугу пропускання електронного тракту зазвичай обмежують від 0 до деякої максимальної частоти f_{max} (частоти зрізу), за межами якої фільтр не пропускає сигнал. Модуляційна передавальна функція такого ідеального фільтра має вигляд

$$M_{ilf}(f) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } 0 \leq f \leq f_{max} \\ 0, & \text{якщо } f > f_{max} \end{cases}. \quad (2.65)$$

Якщо максимальна просторова частота обмежена частотою Найквіста $\nu_N = \frac{1}{2V_D}$, то максимальну частоту відеосигналу визначають як

$$f = \frac{1}{2t_{o_{max}}}. \quad (2.66)$$

Наступним елементом електронного фільтра є цифровий блок, який перетворює аналоговий сигнал у цифровий код, після чого здійснюється його обробка і перетворення в аналоговий сигнал. Передавальна функція цифрового блоку залежить від частоти дискретизації і для кутових просторових частот апроксимується формулою

$$M_{dm}(\nu_x) = \sin c\left(\frac{\nu_x}{\nu_d}\right), \quad (2.67)$$

де ν_d – кутова просторова частота дискретизації.

Якщо період МПФ дорівнює розміру пікселя, то $\nu_d = \frac{1}{\alpha_D}$, формула (2.67) набуде вигляду

$$M_{dm}(\nu_x) = \sin c(\alpha_D \nu_x). \quad (2.68)$$

У тих випадках, коли гранична частота у спектрі сигналу не перевищує частоту Найквіста, вважають, що $M_{El}(\nu_x) \cong 1$.

2.6. Дисплей

Після аналогової та цифрової обробки в електронному тракті відеосигнал подається у дисплей. Дисплей формує на екрані зображення у видимій області спектра, що відповідає розподілу енергетичної яскравості у площині об'єкта. Серед значної кількості типів дисплеїв найбільшого розповсюдження в ТПСС набули рідинно-кристалічні дисплеї.

Основними характеристиками дисплеїв є:

1. *Світність* або *яскравість* екрана, які характеризують можливість застосування дисплеїв в умовах сильного зовнішнього освітлення. Спектр світіння вибирають в залежності від спектральної чутливості людського зору.

2. *Контраст* зображення, який визначають як

$$C_{v1} = \frac{L_{v\max} - L_{v\min}}{L_{v\min}}, \quad (2.69)$$

або

$$C_{v2} = \frac{L_{v\max} - L_{v\min}}{L_{v\max} + L_{v\min}}, \quad (2.70)$$

де $L_{v\max}$ – максимальна яскравість екрана; $L_{v\min}$ – яскравість екрана вимкненого дисплея.

Контраст можна визначати для усього екрана відносно зовнішнього фону або між сусідніми точками зображення на екрані. Очевидно, у другому випадку він буде значно нижчим.

3. *Діаграма направленості* випромінювання екрана визначає можливість спостереження зображення в усіх можливих напрямках.

4. *Ефективність* (світловіддача) визначають коефіцієнтом корисної дії, тобто відношенням інтегральної потужності випромінювання екрана до потужності управління (живлення).

5. *Швидкодія*, яку визначають швидкістю відгуку. Для ТПСС ця величина має бути близькою до 1 мкс для послідовного адресування кожного елемента розкладання зображення. Швидкодію оцінюють часом розгортки і часом післясвітіння елемента розділення екрана.

6. *Розміри екрана* $L_{Sh} \times L_{Sv}$.

7. *Роздільну здатність* визначають кількістю ліній, які розділяються на одиниці довжини. Наприклад, розділення 20 лін/мм вважається адекватним спостереженню з відстані 25 см нормальним оком. При цьому елемент розділення має розмір 50 мкм.

Незважаючи на велике різноманіття фізичних процесів, які відбуваються в різних типах дисплеїв, при проєктуванні ТПСС їх вважають лінійними інваріантними системами, до яких можна застосувати поняття МПФ. Для матричних дисплеїв з ортогональним розташуванням пікселів розміром $v_s \times w_s$ МПФ дорівнює

$$M_s(v_x, v_y) = \frac{\sin(\pi v_s v_x)}{\pi v_s v_x} \frac{\sin(\pi w_s v_y)}{\pi w_s v_y}. \quad (2.71)$$

Розміри зображення об'єкта на екрані дисплея визначається як

$$V_t'' \times W_t'' = (V_t' \times W_t') \beta_{El}^2, \quad (2.72)$$

де $V_t' \times W_t'$ – розміри зображення об'єкта, сформованого ОС у площині ПВ;

$$\beta_{El} = \frac{L_{Sv}}{L_{Dv}} \quad (2.73)$$

– електронне збільшення, де L_{Sv} – висота раstra екрана дисплея; L_{Dv} – висота лінійного поля зору ОС у площині ПВ. Для МПВ $L_{Dv} = qW_D$ – розмір матриці уздовж вертикального напрямку.

Кутовий розмір зображення об'єкта на екрані дисплея залежить від відстані між екраном і оком спостерігача R_{SE} :

$$\xi_{tx}'' \times \xi_{ty}'' = \frac{V_t''}{R_{SE}} \times \frac{W_t''}{R_{SE}}. \quad (2.74)$$

Якщо оператор спостерігає зображення на екрані дисплея через окуляр, то кутовий розмір зображення визначають як

$$\xi''_{tx} \times \xi''_{ty} = \frac{v''_t}{f'_e} \times \frac{w''_t}{f'_e}, \quad (2.75)$$

де f'_e – фокусна відстань окуляра.

Під час моделювання ТПСС важливо встановити зв'язок між лінійними v_{xl} та кутовими v_{xa} просторовими частотами у просторі об'єкта і відповідними просторовими частотами v''_{xl} і v''_{xa} у просторі спостереження (рис. 2.7). Із рис. 2.7 маємо, що лінійні і кутові просторові частоти визначають так:

– у просторі об'єкта

$$v_{xl} = \frac{1}{V_{tp}}; \quad v_{xa} = \frac{R}{V_{tp}}; \quad (2.76)$$

– у просторі зображення (МПВ)

$$v'_{xl} = \frac{1}{V'_{tp}} = \frac{1}{V_{tp}} \frac{R}{f'_o} = v_{xl} \frac{R}{f'_o}; \quad v'_{xa} = \frac{f'_o}{V'_{tp}} = \frac{R}{V_{tp}} = v_{xa}; \quad (2.77)$$

– у просторі спостереження (екрана дисплея)

$$v''_{xl} = \frac{1}{V''_{tp}} = \frac{1}{V'_{tp} \beta_{El}} = \frac{v'_{xl}}{\beta_{El}} = v_{xl} \frac{R}{f'_o \beta_{El}}; \quad v''_{xa} = \frac{R_{SE}}{V''_{tp}} = \frac{R_{SE}}{V'_{tp} \beta_{El}} = v_{xa} \frac{R_{SE}}{f'_o \beta_{El}}. \quad (2.78)$$

Кутове збільшення системи «ТПСС – оператор» визначають як (рис. 2.7)

$$\Gamma_s = \frac{\tan \alpha''_{tp}}{\tan \alpha_{tp}} \approx \frac{\alpha''_{tp}}{\alpha_{tp}} = \frac{V''_{tp}}{R_{SE}} \frac{R}{V_{tp}} = \frac{V''_{tp}}{R_{SE}} \frac{f'_o}{V'_{tp}} = \frac{f'_o \beta_{El}}{R_{SE}}. \quad (2.79)$$

Тому співвідношення (2.77) можна подати у вигляді

$$v''_{xa} = \frac{v_{xa}}{\Gamma_s}. \quad (2.80)$$

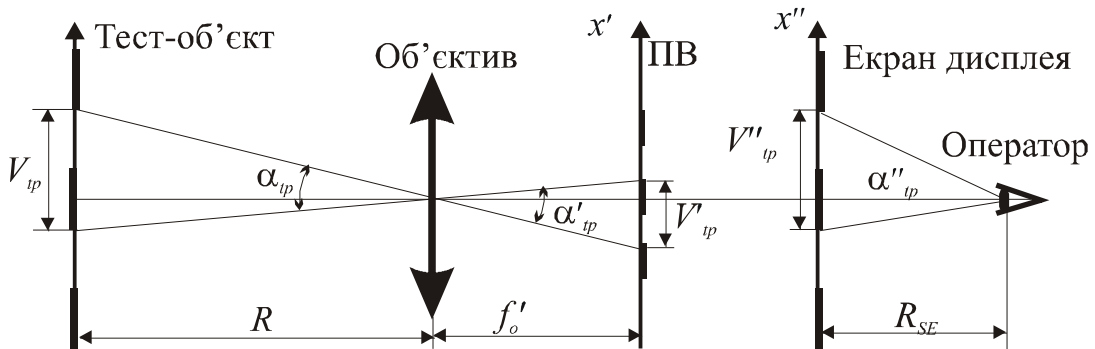


Рис. 2.7. Зв'язок між лінійними та кутовими просторовими частотами у просторі об'єкта, ПВ і відповідними просторовими частотами у просторі спостереження

2.7. Закони зорового сприйняття зображення

Зорове сприйняття – це процес цілісного відображення об’єктів, фонів, ситуацій, що виникають під час дії світлового поля на органи зору. Цей багаторівневий процес охоплює стадії виявлення, розпізнавання та ідентифікації.

Виявлення – виділення оператором об’єкта з фону шляхом встановлення лише наявності об’єкта у полі зору без оцінки його форми та ознак.

Розпізнавання – виділення оператором деяких ознак об’єкта і ототожнення його з еталоном, що зберігається у пам’яті.

Ідентифікація – виділення оператором істотних ознак об’єкта та віднесення його до певного класу. Часто стадії розпізнавання та ідентифікації розглядають як один процес розпізнавання.

В ТПСС спостерігач сприймає зображення об’єктів і фонів з екрана дисплея. Тому розробникам ТПСС важливо знати, як оператор сприймає зображення і наскільки воно має відрізнятися від реального, щоб оператор зміг найефективніше здійснити виявлення, розпізнавання та ідентифікацію.

В основі зорового сприйняття і прийняття рішення лежить оцінка (або сприйняття) трьох основних параметрів зображення: розмірів об’єкта, його яскравості і контрасту.

Останніми роками крім означених вище трьох стадій зорового сприйняття при дистанційному спостереженні розглядається також оцінка ситуації та загроз [1]. Але у практиці проєктування ТПСС опис цієї стадії наразі є відсутнім з огляду на складність його формалізації.

2.7.1. Основні характеристики процесу зорового сприйняття

Розглянемо спочатку тільки ті характеристики зорового сприйняття, які відіграють важливу роль під час проєктування ТПСС.

1. *Поле зору* має такі ділянки:

- *дуже хороше бачення* – діаметр $(1 - 2)^\circ$ у межах центральної ямки сітківки;
- *хороше бачення* – діаметр близько 9° у межах жовтої плями сітківки;
- *задовільне бачення* – 30° за кутом місця і 40° за азимутом.

Кутом хорошого бачення визначають розмір екрана дисплея ТПСС, який у більшості випадків не має перевищувати 9° (саме таке кутове поле зору в середньому забезпечує найменший час пошуку об'єкта). Задовільним баченням пояснюють формат кадру 4:3, прийнятий у телебаченні. Для нормальної зорової системи *відстань найкращого бачення* становить 250 мм.

2. *Діапазон яскравості зображення*, що сприймає оператор, знаходиться в межах від $3 \cdot 10^{-6}$ кд/м² до $3 \cdot 10^4$ кд/м².

3. *Спектральна чутливість* ока визначається кривою відносної видності та знаходиться у діапазоні від 0,38 мкм до 0,77 мкм (рис. 2.1). Максимум спектральної чутливості відповідає довжині хвилі випромінювання $\lambda_m = 0,55$ мкм (жовто-зелений колір).

4. *Пороговий контраст* $C_{v,th}$ – це найменший контраст, який сприймає зорова система. При цьому об'єкт розміром, що перевищує 1° , розміщують на фоні з яскравістю $L_{vb} = 100$ кд/м². Для нормальної зорової системи

$$C_{v,th} = \frac{L_{vt} - L_{vb}}{L_{vb}} = \frac{\Delta L_{th}}{L_{vb}} = 0,02 \dots 0,03, \quad (2.81)$$

де ΔL_{th} – порогова яскравість.

Обернену величину $1/C_{v,th}$ називають *контрастною чутливістю*.

Величина контрасту $C_{v,th}$ є функцією яскравості фону адаптації зорової системи і кутового розміру $\delta \xi_t''$ елемента виявлення розкладення зображення. Якщо яскравість фону $L_{sb} = 10$ кд/м², $C_{v,th}$ досягає найменших значень і з подальшим збільшенням L_{sb} мало змінюється. Залежність $C_{v,th}$ від $\delta \xi_t''$ пояснюється ефектом просторового інтегрування в зоровій системі (див. п. 2.7.3). Дослідження Блекуела показали, що $C_{v,th}$ різко зменшується зі збільшенням $\delta \xi_t''$ до $(10 - 20)'$ і далі змінюється неістотно. Мінімальне значення порогового контрасту $C_{v,th} = 0,027$ спостерігається, якщо розмір елемента зображення $\delta \xi_t'' = 12'$. Якщо розмір елемента зображення $\delta \xi_t'' = 1'$, що відповідає пороговому кутовому розділенню ока, то $C_{v,th} = 0,9$.

Для апроксимації функції порогового контрасту використовують різні моделі. Наприклад, формулу, запропоновану Шульцем [1]

$$C_{E,th}(\nu_x) = \frac{C_E}{\exp(-c_1\nu_x) - \exp(-c_2\nu_x)}, \quad (2.82)$$

де $C_E = 0,01033$ – константа; $c_1 = 0,1138^\circ$; ν_x – просторова частота, град^{-1} .

При розрахунках ТПСС зазвичай просторову частоту вимірюють у мрад^{-1} . Зважаючи на те, що $1 \text{ град}^{-1} = 0,01745 \text{ мрад}^{-1}$, постійні коефіцієнти у формулі (2.82) матимуть значення $c_1 = 1,986 \text{ мрад}$ і $c_2 = 5,673 \text{ мрад}$.

2.7.2. Модуляційна передавальна функція зорової системи

Загалом процес зорового сприйняття є суттєво нелінійним (з огляду принаймні на логарифмування сигналів яскравості). Але для спрощення обчислень при низьких контрастах зображення, процес зорового сприйняття розглядають як лінійний та інваріантний. Тоді для нього можна застосувати МПФ $M_E(\nu_x, \nu_y)$. Модуляційна передавальна функція зорової системи має максимум в області кутових просторових частот $0,25 \text{ мрад}^{-1}$.

На МПФ зорової системи суттєво впливають різні параметри органів зору. Основними з них є дифракція на входній зіниці, аберації кришталіка, кінцеві розміри та нерегулярне розташування на сітківці фоточутливих рецепторів (паличок та колбочок). Робота зорової системи також залежить від зовнішніх умов спостереження, наприклад, середньої яскравості екрана дисплея, тривалості спостереження тощо. Але розробники ТПСС зазвичай користуються спрощеними моделями. Часто апроксимація МПФ зорової системи не враховує навіть суттєві характеристики спостереження – просторовий шум, фонову освітленість, положення спостерігача відносно дисплея, час експонування тощо. На даний момент використовують значну кількість різних апроксимацій МПФ зорової системи, наприклад, апроксимацію Шульца [1]:

$$M_E(\nu_x) = 2,71[\exp(-0,11\nu_x) - \exp(-0,325\nu_x)]; \quad (2.83)$$

де ν_x – просторова частота, град^{-1} .

2.7.3. Просторове та часове інтегрування зорової системи

Дослідження законів зорового сприйняття показують, що об'єкти великих розмірів сприймаються за більш низької порогової яскравості, ніж

об'єкти малих розмірів. Причому ця порогова яскравість у визначених межах є обернено пропорційною кореню квадратному з площі об'єкта спостереження. Ця особливість зорового сприйняття є наслідком просторового інтегрування сигналу в зоровій системі [2].

Експериментально встановлено, що просторове інтегрування припиняється, якщо кутовий розмір об'єкта, за яким здійснюється спостереження перевищує $\xi'_{ti} = 11,6 \text{ мрад} \approx 40'$.

Із закону просторового інтегрування випливає, що відношення сигнал/шум SNR_E , яке сприймається зоровою системою з екрана ТПСС становить

$$SNR_E = SNR_S \left(\frac{\xi_t}{\alpha_D} \right), \quad (2.84)$$

де SNR_S – відношення сигналу від об'єкта до сигналу шуму в елементарній ділянці екрана; ξ_t і α_D – кутові розміри зображення об'єкта і пікселя ПВ відповідно.

Поряд з просторовим інтегруванням зоровій системі властива певна інерційність. Це дозволяє додавати кадри протягом певного часу t_E , який називають *часом інтегрування ока* або *постійною часу ока*. Вважають, що при спостереженні телевізійних або тепловізійних зображень постійна ока дорівнює 0,2 с.

Врахування інтегруючих властивостей зорової системи є важливим елементом проєктування при виборі кадрової частоти f_f . Це обумовлено тим, що протягом часу t_E в зоровій системі сигнали від детермінованого об'єкта і випадкового фону (шуму) додаються. При цьому відношення сигнал/шум, яке сприймає спостерігач, збільшується пропорційно до кореня квадратного з кількості незалежних кадрів, що вміщуються в інтервалі t_E :

$$SNR_E = SNR_S \sqrt{f_f t_E}. \quad (2.85)$$

2.7.4. Основи теорії сприйняття зображення на екрані дисплея

Суть дистанційного спостереження полягає в тому, що оператор виконує пошук відомого об'єкта з використанням зображення на екрані дисплея ТПСС. При цьому можна виділити дві основні стадії спостереження: пошук/виявлення, розпізнавання. Вважаючи ці стадії

незалежними можна використовувати єдину ймовірність сприйняття P_E , що визначає ймовірність вирішення поставленого завдання. Зазвичай вважають, що

$$P_E = P_d P_r, \quad (2.86)$$

де P_d і P_r – ймовірності виявлення та розпізнавання об'єкта відповідно.

Ймовірність сприйняття тепловізійного зображення є багатопараметричною функцією. Вона залежить від характеристик об'єкта спостереження (відношення сигнал/шум, контрасту, кутових розмірів, форми, розміщення, орієнтації і швидкості руху на екрані тощо); характеристик загального зображення на екрані дисплея (яскравості фону, щільності та складності завад, розмірів екрана); характеристик ТПСС (передавальної функції та пов'язаних із нею критеріїв просторового та енергетичного розділення, частоти кадрів, кількості рядків, кутових розмірів екрана, передачею сірої шкали градацій яскравості, динамічного діапазону); характеристик спостерігача (особливостей зорової системи, тренуваності, інтелекту). Це основні фактори, до яких можна було б додати інші. Отже формування більш-менш точної моделі сприйняття зображення є складною проблемою і релевантні результати можуть бути одержані тільки в ході натурних досліджень.

2.7.4.1. Ймовірність виявлення

Ймовірність виявлення P_d – це ймовірність виділення об'єкта на певному неоднорідному фоні і віднесення його до класу об'єктів, які мають потенційний інтерес.

Серед різних моделей зорового сприйняття зазвичай ймовірність виявлення P_d пов'язують з відношенням сигнал/шум SNR_E , яке сприймає зорова система оператора. Якщо застосовується модель виявлення методом одноразового відліку, то ймовірність виявлення P_d є ймовірністю того, що сума максимального сигналу від об'єкта спостереження u_s і випадкового значення шуму u_n перебільшує деяке порогове значення u_{th} . В разі розподілу шуму за нормальним законом із середньоквадратичним значенням σ_n , ймовірність виявлення дорівнює

$$P_d = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{SNR_E - SNR_{th}} \exp\left(-\frac{1}{2}z^2\right) dz, \quad (2.87)$$

де $SNR_E = \frac{u_s}{\sigma_n}$; $SNR_{th} = \frac{u_{th}}{\sigma_n}$; $z = \frac{u}{\sigma_n}$.

В табл. 2.2 [1] наведено значення відношення сигнал/шум SNR_E , яке сприймає оператор, за різних порогів зорового сприйняття SNR_{th} та різних ймовірностей правильного виявлення P_d . Наприклад, для порогу сприйняття $SNR_{th} = 3$ і ймовірності правильного виявлення $P_d = 0,9$ з табл. 2.2 знаходимо значення потрібного відношення сигналу до шуму $SNR_E = 4,3$. Розрахунки показують, що для забезпечення задовільної якості зображення доцільно вибирати SNR_{th} від 3,2 до 3,5.

Під час виявлення та розпізнавання об'єктів за допомогою ТПСС оператор розв'язує задачу з виявлення різниці яскравості в зображенні об'єкта і фону на екрані дисплея. Значення порогової різниці яскравості $\Delta L_{S,th}$ визначається пороговим контрастом $C_{E,th}(v_x)$ (2.82).

Таблиця 2.2

Значення відношення сигнал/шум SNR_E , яке сприймає оператор, за різних ймовірностей правильного виявлення P_d і порогів сприйняття SNR_{th}

SNR_{th}	P_d			
	0,8	0,9	0,95	0,99
1	1,8	2,3	2,6	3,3
2	2,8	3,3	3,6	4,3
3	3,8	4,3	4,6	5,3
4	4,8	5,3	5,6	6,3
5	5,8	6,3	6,6	7,3
6	6,8	7,3	7,6	8,3

2.7.4.2. Ймовірність розпізнавання

Ймовірність розпізнавання P_r – це ймовірність віднесення виявленого об'єкта до вузького класу з відомого набору об'єктів.

Численні експериментальні дослідження показали, що найкращою для практичного використання характеристикою якості бачення об'єкта за

допомогою ТПСС, є розділення штрихових мір, еквівалентних об'єкту [2]. Такий підхід є справедливим незалежно від природи різних дефектів зображення. При цьому припускають, що об'єкт характеризується критичним розміром l_{cr} , що визначається розміром деталей об'єкта, суттєвих для його бачення. У типовому випадку це мінімальний габаритний розмір проекції зображення об'єкта на площину, перпендикулярну лінії спостереження. Штрихова міра, еквівалентна об'єкту, – це одна з мір набору, в якому повна ширина набору пар штрихів дорівнює критичному розміру об'єкта, а довжина відповідає розміру об'єкта в напрямі, перпендикулярному до критичного (рис. 2.8).

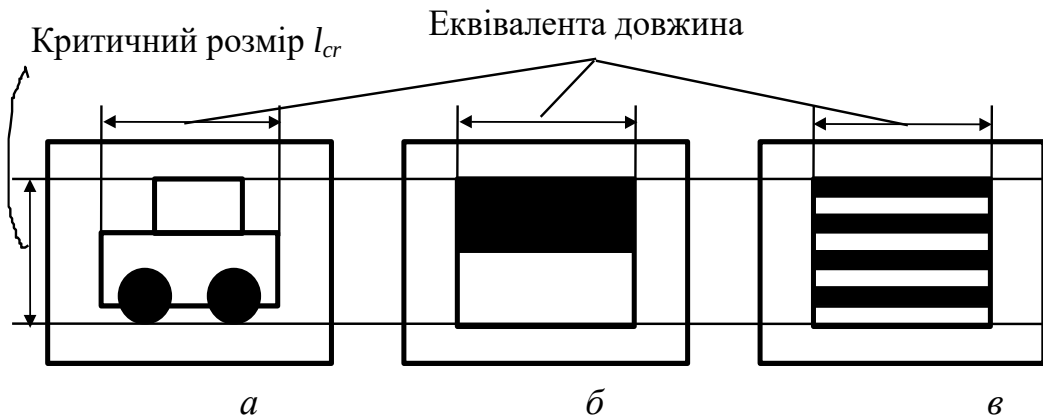


Рис. 2.8. Еквівалентні штрихові міри: *а* – зображення об'єкта; *б* – тест-об'єкт, еквівалентний виявленню; *в* – тест-об'єкт, еквівалентний розпізнаванню

Відповідно до теорії, що пов'язує розділення еквівалентної штрихової міри із баченням об'єкта, якість бачення об'єкта можна передбачити, якщо визначити максимальну частоту розділення еквівалентної міри, що має такий самий контраст яскравості ΔL_{th} і спостерігається за тих же умов, що й об'єкт. Ця теорія у трохи іншому вигляді була запропонована Джонсоном, який намагався знайти зв'язок характеристик зображення, що створено електронно-оптичним перетворювачем у реальних умовах, з об'єктивними лабораторними критеріями [2]. Джонсон визначив число штрихів, що розділяються, які відповідають критичному розміру об'єкта для восьми типів військових машин і людини, що стоїть. Широко відомі тепер критерії Джонсона, узагальнені за усіма класами об'єктів, і мають такі значення

числа штрихів, що розділяються, необхідних для забезпечення 50 %-ї ймовірності правильного рішення: у разі виявлення – $1,0 \pm 0,25$ штрихів; у разі розпізнавання – $4,0 \pm 0,8$ штрихів [2]. Ці критерії було отримано безпосередньо з експериментальних спостережень, вони справджуються тільки для зображення без растрової структури, наприклад, в електронно-оптичних перетворювачах.

Для растрового зображення маємо:

$$P_r = 1 - \exp[-0,018(N_l + 1)^2], \quad (2.88)$$

де $N_l = (7 - 13)$ – кількість рядків телевізійного растру у зображенні об'єкта.

Для впевненого розпізнавання із ймовірністю 50 % кількість штрихів, що розділяються, на критичний розмір об'єкта становить $4,0 \pm 0,8$. Це відповідає приблизно $(8 - 10)$ рядкам на об'єкт. Натурні дослідження ТПСС показують, що для забезпечення $P_r = 50\%$ потрібно $N_l = 4 \pm 1$, а для $P_r = 90\%$ потрібно $N_l = 6 \pm 1$.

2.7.4.3. Приклади застосування законів зорового сприйняття під час проєктування ТПСС

Приклад 2.7.1. Розрахуйте відношення сигнал/шум SNR_{Ed} , що сприймає оператор на екрані дисплея, необхідне для виявлення об'єкта на екрані дисплея з імовірністю $P_d = 50\%$ і 90% із пороговим значенням $SNR_{th} = 3,2$.

Розв'язання. 1. Ймовірність виявлення об'єкта залежно від відношення сигнал/шум SNR_{Ed} знайдемо за допомогою формули (2.87)

$$P_d = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{SNR_{Ed}-3,2} \exp\left(-\frac{1}{2}z^2\right) dz.$$

2. Подамо цей інтеграл у вигляді

$$P_d = \frac{1}{2} + \Phi(SNR_{Ed} - 3,2),$$

де $\Phi(\quad)$ – інтеграл імовірності (1.49). Із табл. 1.2 знаходимо потрібне значення аргументна $U = SNR_{Ed} - 3,2$ функції

$$\Phi(U) = P_d - \frac{1}{2}.$$

Для ймовірності $P_d = 50\%$ $\Phi(U) = 0$. Із табл. 1.2 знаходимо $U = 0$.

Тоді $SNR_{Ed} = 3,2$.

Для ймовірності $P_d = 90\%$ $\Phi(U) = 0,4$. Із табл. 1.2 знаходимо $U = 1,3$. Тоді $SNR_{Ed} = 4,5$.

Приклад 2.7.2. Визначте максимально допустиме кутове розділення ТПСС, що дозволяє розпізнати людину, яка перебуває на відстані 100 м від системи (вважати, що людина має розмір $0,5 \times 1,8 \text{ м}^2$).

Розв'язання. 1. Згідно з критерієм Джонсона для розпізнавання людини необхідно, щоб на її критичному розмірові $l_{cr} = 0,5 \text{ м}$ вміщувалося чотири періоди штрихової міри, тобто ТПСС повинна розрізнити елемент розміром

$$\delta V = \frac{0,5}{2 \cdot 4} = 0,0625 \text{ м}.$$

1. З геометричних співвідношень випливає, що ТПСС повинна мати кутове розділення $\delta\omega_s = \frac{\delta V}{R} = 0,625 \text{ мрад}$.

Задачі для самостійного розв'язання

Задача 2.1. Розрахуйте спектральну енергетичну світність у діапазоні від 8 мкм до 14 мкм для АЧТ, нагрітого до температур 6000 К і 300 К. Побудуйте графіки і порівняйте отримані результати.

Задача 2.2. Автомобіль з температурою поверхні $\nu_t = 5^\circ\text{C}$ і коефіцієнтом випромінювання $\varepsilon_t = 0,4$ міститься на снігу з температурою $\nu_b = -5^\circ\text{C}$ і коефіцієнтом випромінювання $\varepsilon_b = 0,85$. Знайдіть радіаційний контраст картини, яка спостерігається у спектральному діапазоні від 8 мкм до 14 мкм. Порівняйте отриманий результат з радіаційним контрастом об'єкта і фону, які випромінюють як АЧТ за тих же значень температур і у тому ж спектральному діапазоні.

Відповідь: $C_{e1} = -0,28$ («темний» об'єкт на «білому» фоні); $C_{e2} = 0,09$.

Задача 2.3. Об'єкт прямокутної форми розміром $3 \times 2 \text{ м}^2$ з температурою $T_t = 300 \text{ К}$ і коефіцієнтом випромінювання $\varepsilon_t = 0,6$ знаходиться на рівномірному фоні з температурою $T_b = 280 \text{ К}$ і коефіцієнтом випромінювання $\varepsilon_b = 0,7$. Об'єкт і фон є ламбертівськими джерелами випромінювання. Визначте просторовий спектр відносної інтегральної енергетичної яскравості такого об'єкта у діапазоні від 8 мкм до 14 мкм. Побудуйте графіки спектра уздовж осей ν_x, ν_y .

Відповідь: $\Delta \tilde{L}_e(\nu_x, \nu_y) = 31 \sin c(3\nu_x) \sin c(2\nu_y)$, Вт · ср⁻¹, де просторові частоти ν_x, ν_y виражені в м⁻¹.

Задача 2.4.* Чотири штрихова міра розміщена на рівномірному фоні з температурою $T_b = 300$ К і має період $\phi_{tp} = 2$ мрад. Знайдіть просторовий спектр інтегральної енергетичної світності такої міри у спектральному діапазоні від 8 мкм до 14 мкм, якщо її температурний контраст становить $\Delta T = T_t - T_b = 2$ °С, а коефіцієнти випромінювання об'єкта і фону дорівнюють $\varepsilon_t = \varepsilon_b = 0,97$. Побудуйте графік цього спектру уздовж осі ν_x .

Відповідь: $M_e(\nu_x, \nu_y) = 1,44 \cdot 10^{-2} \sin c(7\nu_y) \frac{\text{sinc}(8\nu_x)}{\cos(\pi\nu_x)}$, $\frac{\text{Вт} \cdot \text{мрад}^2}{\text{см}^2}$.

Задача 2.5.* Об'єкт становить $2N + 1$ «теплових» прямокутних штрихів розміром $V_t \times W_t$ з постійною відносною яскравістю I_{e0} . Відстань між штрихами уздовж осі x дорівнює V_t . Початок системи координат збігається з центром середньої лінії. Довести, що просторовий спектр такого об'єкта описується функцією

$$\tilde{L}_e(\nu_x, \nu_y) = I_{e0} V_t W_t (2N + 1) \sin c(W_t \nu_y) \frac{\sin c[2V_t(2N + 1)\nu_x]}{\cos(\pi V_t \nu_x)}.$$

Побудуйте графік нормованої функції $L_e(\nu_x, 0)/L_e(0, 0)$, якщо $V_t = 10$ мм і $N = 5$.

Задача 2.6. Випадковий розподіл яскравості випромінювання хмарності, яке спостерігається із Землі або із космосу, можна апроксимувати експоненціальною кореляційною функцією (без урахування постійної складової):

$$ACF(x, y) = \sigma_b^2 \exp \left[- \left(\frac{|x|}{x_b} + \frac{|y|}{y_b} \right) \right],$$

де σ_b^2 – дисперсія флуктуацій яскравості фону; x_b, y_b – інтервали кореляції фону. Довести, що спектр Вінера такого фону описується функцією

$$G_b(\nu_x, \nu_y) = \frac{4\sigma_b^2 x_b y_b}{(1 + 4\pi^2 x_b^2 \nu_x^2)(1 + 4\pi^2 y_b^2 \nu_y^2)}.$$

Задача 2.7. Об'єктив SCIRL 0,64/100 фірми Pelkington у межах поля зору для просторової частоти 25 мм⁻¹ має контраст $M_{o1} = 0,20$. Яке значення буде мати МПФ для просторових частот $0, 5, 10, \dots, 25$ мм⁻¹ у разі використання апроксимаційних функцій 2 і 3 з табл. 2.1 якщо $n = 1$? Зробіть

їх оцінку.

Відповідь:

$v'_x, \text{мм}^{-1}$	0	5	10	15	20	25
$1 - \frac{1 - M_{01}}{v'_{x1}} v'_x$	1	0,84	0,68	0,52	0,36	0,20
$\exp \left[- \left(a \frac{v'_x}{v'_{x1}} \right)^2 \right]$	1	0,94	0,77	0,56	0,36	0,20

Висновок: Колоколоподібна крива має дуже великі величини контрасту для $v'_x < v'_{x1}$. Вона може застосовуватися як апроксимація у випадку, коли $M_{01} > 0,6$

Задача 2.8. Функція розсіювання точки об'єктива становить рівномірний кружок, що світиться, радіусом r'_o . Визначте МПФ такого об'єктива і знайдіть значення просторової частоти, яке відповідає контрасту 0,5.

Відповідь: $M_o(v'_r) = \frac{2J_1(2\pi r'_o v'_r)}{2\pi r'_o v'_r}$; $v'_{\text{res}, M_o=0,5} = \frac{0,352}{r'_o}$.

Задача 2.9. Функція розсіювання точки об'єктива становить циліндр з радіусом основи $r'_o = 15$ мкм. Визначте МПФ і роздільну здатність такого об'єктива. Побудуйте графік МПФ.

Вказівка: Скористайтесь табличним інтегралом $\int_0^\infty \frac{1}{x} J_n^2(cx) dx = \frac{1}{2}$.

Відповідь: $M_o(v'_r) = \frac{2J_1(0,094v'_r)}{0,094v'_r}$; $v'_{\text{res}} = \frac{1}{\pi r'_o}$.

Задача 2.10. Установіть зв'язок між просторовими розділеннями v'^c_{res} , яке визначають формулою (2.48), і геометричною шумовою смугою GB ОС, що має МПФ у вигляді гасової функції 3 із табл. 2.1.

Відповідь: $v'^c_{\text{res}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{2\pi \cdot GB \cdot \ln \frac{1}{c_o}}$.

Задача 2.11. Визначте розмір чутливої площадки ПВ, яка узгоджується з об'єктивом, що має МПФ $M_o(v'_x) = 1 - 5,413\lambda v'_x$, виходячи з умови рівності контрастів МПФ об'єктива і приймача. Знайдіть значення просторової частоти, яка задовольняє цю умову. При цьому величина контрастів об'єктива і ПВ дорівнює 0,5, а сумарний контраст для визначення просторової частоти дорівнює 0,25.

Відповідь: $V_D = 65$ мкм; $\nu_{\text{res}} = 9,24$ мм⁻¹.

Задача 2.12. Визначте діапазон зміни еквівалентної шуму різниці температур мікроболометричної матриці U 3000, вихідні параметри якої наведено в задачі 2.12, якщо час інтегрування змінюється в межах від 1 мс до 10 мс.

Вказівка: Скористайтесь прикладом 2.4.1.

Відповідь: $NETD(t_i) = \sqrt{\frac{10}{t_i}} NETD(t_i = 10\text{мс});$

$$80\text{мК} \leq NETD \leq 253 \text{ мК}.$$

Задача 2.13. Тепловізійна система спостереження має одно елементний ПВ розміром $0,1 \times 0,1$ мм², об'єктив з фокусною відстанню 100 мм і полем зору $8^\circ \times 6^\circ$, а також дисплей з екраном розміром 16×12 см². Визначте оптимальну відстань між оператором і екраном дисплея, за якої найефективніше може працювати ТПСС.

Відповідь: 137 см.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ УЗАГАЛЬНЕНИХ ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВІЗОРІВ

3.1. Узагальнені характеристики тепловізорів

Узагальнені характеристики тепловізорів є мірою успішності виконання завдань, що стоять перед ТПСС, і враховують різноманітні тактико-технічні, експлуатаційні і техніко-економічні вимоги. У більшості випадків використовують такі групи загальних характеристик:

- показники та критерії якості зображення, сформовані ТПСС;
- тактико-технічні параметри і характеристики системи;
- показники ефективності досягнення мети, заради якої створено ТПСС;
- техніко-економічні показники.

Якість зображення в основному задають такі показники, як геометрична роздільна здатність або кутове і лінійне розділення, МПФ.

Тактико-технічні параметри і характеристики визначають можливість вирішення завдань, що стоять перед ТПСС, у різних умовах експлуатації. До цих показників відносять чутливість (порогову чутливість), динамічний діапазон яскравості, яку сприймає ТПСС, робочий спектральний діапазон, кутове поле зору, миттєве поле зору, формат зображення (кадру), число елементів розділення тощо. Ці показники визначають головні узагальнені характеристики ТПСС такі як еквівалента шуму різниці температур (ЕШРТ) і мінімальна роздільна різниця температур (MRPT).

Показники ефективності ТПСС відображають статистичний характер вирішення завдань, які стоять перед цими системами. До цих показників відносять, перш за все, максимальну дальність дії, виявлення, розпізнавання, ідентифікації або ймовірність виявлення, розпізнавання, ідентифікації.

До техніко-економічних показників можна віднести оціночну вартість системи, її технологічність, маса-габаритні параметри, час напрацювання на відмову, енергоспоживання тощо.

3.1.1. Загальні положення і визначення

Головними узагальненими показниками ефективності ТПСС є максимальна дальність виявлення (МДВ) і максимальна дальність розпізнавання (МДР) із заданими ймовірностями виявлення та розпізнавання. Ці характеристики залежать від просторової роздільної здатності; енергетичної роздільної здатності; функції передачі сигналу; передавальної функції; освітленості, еквівалентної шуму; МРРТ; спектрального робочого діапазону.

Максимальна дальність виявлення (Maximum Detectable Range, MDR) R_d – це максимальна дальність між стандартним тест-об'єктом і ТПСС, за якої тест-об'єкт виявляється оператором на екрані дисплея із заданою ймовірністю P_d у разі необмеженого часу спостереження.

Максимальна дальність розпізнавання (Maximum Recognizable Range, MRR) R_r – це максимальна дальність між стандартним тест-об'єктом і ТПСС, за якої тест-об'єкт розпізнається оператором на екрані дисплея із заданою ймовірністю P_r у разі необмеженого часу спостереження.

Якість зображення при дистанційному спостереженні визначається просторовою й енергетичною роздільними здатностями. *Просторова роздільна здатність* ТПСС характеризує можливість системи розрізняти (розділяти) мінімальні просторові розміри об'єктів або їх елементів. В основному вона обмежується дифракцією ОС, розмірами чутливої площадки (пікселя) і кроком МПВ, шириною частотної смуги пропускання електронного тракту, розділенням монітора. Кожну із підсистем ТПСС характеризує власна роздільна здатність. Так, роздільну здатність ОС оцінює критерій Релея або ФРТ. Роздільну здатність МПВ можна визначити кутовим розміром пікселя, електронного тракту – частотою Найквіста, дисплея – числом ТВ-ліній в розмірі растру.

Сучасний підхід до оцінки роздільної здатності ТПСС ґрунтується на теорії лінійної просторової фільтрації, у рамках якої процес спостереження розглядають як просторову фільтрацію об'єкта спостереження багато ланцюговим двовимірним фільтром. Граничне розділення визначають

просторовою частотою, на якій МПФ ТПСС зменшується до певного рівня, наприклад, до рівня 0,5.

Енергетична роздільна здатність (контрастна чутливість) характеризує можливість розділення (виявлення) сигналів від об'єктів великих розмірів, розміщених на фоні, за рахунок наявного температурного контрасту. Вона залежить від енергетичних характеристик ОС, чутливості ПВ, шумів системи. З врахуванням великих розмірів об'єктів ця характеристика не залежить від просторової роздільної здатності системи.

Чутливість визначається тим мінімальним рівнем сигналу, який може бути зареєстрований приймальною системою. Звичайно це такий сигнал, який формує на виході ПВ відношення сигнал/шум, що дорівнює одиниці. В результаті інтегрування сигналу в зоровій системі в ТПСС відношення сигнал/шум SNR_E , що сприймає оператор з екрана дисплея, може перевищувати відношення сигнал/шум SNR_S , яке створює система на екрані монітора. Тому навіть якщо значення SNR_S є меншим від одиниці на екрані монітора ТПСС формується задовільне за якістю зображення.

Максимальна дальність спостереження (МДС) – це максимальна дальність, на якій ТПСС забезпечує виявлення або розпізнавання об'єкта із заданою ймовірністю. Гранична дальність спостереження залежить одночасно як від просторового, так і від енергетичного розділення.

Для певного спрощення розрахунків і порівняння різних зображуючих систем між собою їх розділяють на системи, обмежені просторовим або енергетичним розділенням. Якщо ТПСС обмежена просторовим розділенням (контрастно обмежена система), то МДС R_m обмежується тільки розмірами об'єкта V_t і граничним кутовим розділенням $\delta\omega_s$, тобто

$$R_m = \frac{V_t}{2\delta\omega_s}. \quad (3.1)$$

У свою чергу, граничне (мінімальне) розділення обмежене дифракційною роздільною здатністю ОС, кроком структури МПВ, телевізійною роздільною здатністю дисплея. В ТПСС з вибіркою зазвичай мінімальне розділення обмежене частотою просторової дискретизації (або частотою Найквіста).

В іншому граничному випадку МДС обмежена енергетичною роздільною здатністю ТПСС. Ця ситуація виникає під час спостереження мало контрастних об'єктів великих розмірів, тобто коли кутовий розмір об'єкта значно перевищує кутове розділення системи:

$$\frac{V_t}{R} \gg \delta\omega_s. \quad (3.2)$$

Для таких систем головною характеристикою є відношення сигнал/шум, яке визначається на нульовій просторовій частоті як

$$SNR \cong \exp(-\kappa_A R) \frac{\Delta L}{L_n}, \quad (3.3)$$

де ΔL – абсолютний контраст об'єкта; L_n – яскравість, еквівалентна шумовому сигналу системи, приведена до площини об'єкта. У цьому випадку МДС необмежено зростає із збільшенням відношення сигнал/шум.

Таким чином, просторова роздільна здатність однозначно не визначає МДС або якість зображення, оскільки вона не враховує чутливість системи. Справді, мало контрастні об'єкти великих розмірів неможливо виявити на дальності, що забезпечує достатнє просторове розділення, якщо рівень інформативного сигналу нижче рівня шуму системи.

Функція передачі сигналу (Signal Transfer Function, SiTF) $u_s(L_t)$ – це залежність електричного сигналу на виході електронного блока від яскравості об'єкта спостереження.

Передавальна функція $H_s(\nu_x, \nu_y)$ характеризує поведінку ТПСС в області просторових частот. Її визначає залишковий контраст зображення синусоїдальної міри на екрані дисплея і контраст самої міри. Модуль передавальної функції називають *модуляційною передавальною функцією* (МПФ, Modulation Transfer Function, MTF) $M_s(\nu_x, \nu_y)$. МПФ залежить від просторових частот ν_x, ν_y і характеризує просторове розділення та якість зображення на екрані дисплея.

Освітленість, еквівалентна шуму (Noise Equivalent Irradiance) NEI – це освітленість у площині вхідної зіниці ОС, яка створює електричний сигнал u_s на виході ПВ, еквівалентний шумовому сигналу u_n , тобто

$$NEI = E_p \frac{u_n}{u_s}, \quad (3.4)$$

де E_p – освітленість вхідної зіниці, яка створює сигнал u_s .

Отже NEI визначає мінімальну виявлювану освітленість.

Еквівалентна шуму різниця температур (Noise Equivalent Temperature Difference) $NETD$ – це різниця температур між стандартним тест-об'єктом і фоном, що випромінюють як АЧТ, за якої відношення пікового значення сигналу на виході стандартного еталонного фільтра ТПСС, яка розглядає тест-об'єкт, до шуму дорівнює одиниці [12]. При цьому тест-об'єкт повинен мати кутові розміри $\xi_{tp,x} \times \xi_{tp,y}$, які у декілька разів перевищують кутовий розмір чутливої площадки ПВ $\alpha_D \times \beta_D$, щоб вилучити вплив просторового розділення на результати вимірювань (рис. 3.1, а). З метою ідентифікації результатів вимірювання (для вилучення впливу електронної системи) використовують стандартний еталонний фільтр з передавальною функцією

$$H_{f,tp}(f) = \left[1 + \left(\frac{f}{f_o} \right)^2 \right]^{-0,5}, \quad (3.5)$$

де $f_o = 1/2t_o$; t_o – час сканування (розкладення) одного елемента зображення.

Мінімальна виявлювальна різниця температур (Minimum Detectable Temperature Difference) $MDTD$ – це мінімальна різниця температур між тест-об'єктом та фоном, що випромінюють як АЧТ, яка потрібна для виявлення тест-об'єкта у разі необмеженого часу спостереження і заздалегідь відомого його розміщення на екрані. Під час вимірювання використовують тест-об'єкт, аналогічний до тест-об'єкта при вимірюванні $NETD$ (рис. 3.1, а).

Мінімальна роздільна різниця температур (MRPT, Minimum Resolvable Temperature Difference) $MRTD$ – це мінімальна різниця ефективних температур між смугами (штрихами) тест-об'єкта із заданою просторовою частотою та фоном, яка дозволяє візуально на екрані дисплея розділяти штрихи об'єкта.

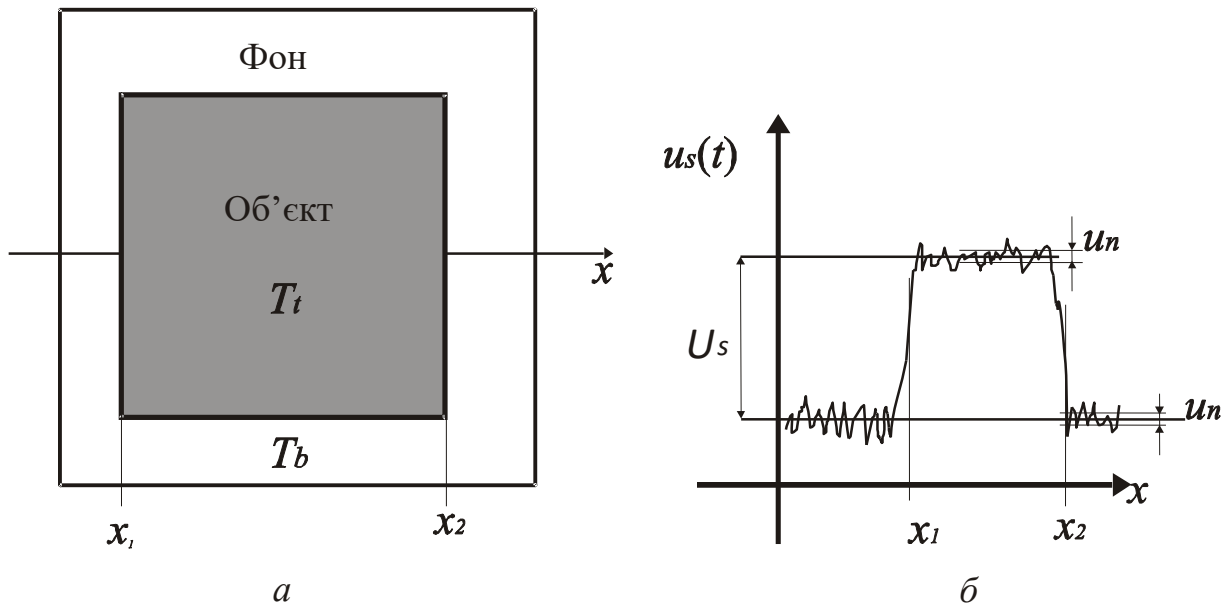


Рис. 3.1. Тест-об'єкт для визначення *NETD* (а) та вигляд сигналу на виході електронної системи (б)

Тест-об'єктом при цьому є чотири штрихова міра, у якої смуги та проміжки між ними мають однакову ширину $\xi_{tp,x} = \omega_{tp}$, а їх висота дорівнює $\xi_{tp,y} = 7\omega_{tp}$ (рис. 3.2). Смуги та проміжки випромінюють як АЧТ з різною, але постійною температурою (див. п. 3.2.4). Просторова частота $\nu_x = 1/2\omega_{tp}$ може бути виражена в лінійних або в кутових величинах (зазвичай в мм^{-1} , або в мрад^{-1}). Такий тест-об'єкт часто називають мірою Фуко.

Реальний контраст об'єкта і контраст його зображення на екрані не мають однозначного зв'язку, оскільки регулюванням яскравості і контрастності дисплея можна змінити контраст зображення. У той же час реальний контраст об'єкта залишається постійним і не залежить від характеристик ТПСС. Зі збільшенням контрасту зображення на екрані дисплея електронним способом одночасно збільшується і шумовий сигнал, у результаті чого сприйняття зображення об'єкта не покращується.

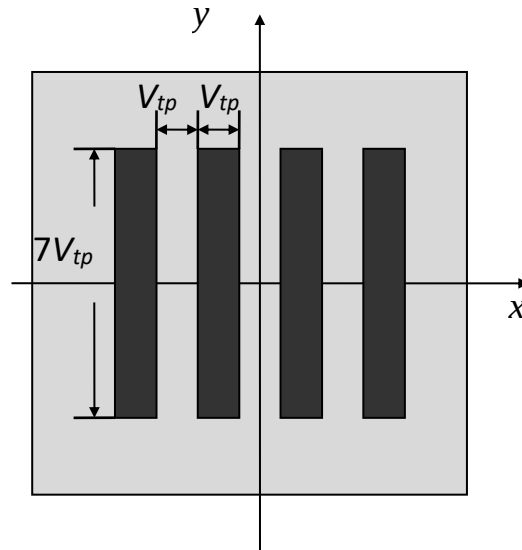


Рис. 3.2. Тест-об'єкт (міра Фуко) для визначення $MRTD(v_x)$, де просторова частота $v_x = 1 / 2V_{tp}$

Спектральний робочий діапазон ($\lambda_1 - \lambda_2$) визначають на рівні 0,1 відносної спектральної чутливості усієї ТПСС. Для об'єктів з температурами близько 300К яскравість у діапазоні від 8 мкм до 12 мкм є у десятки разів більшою, ніж у діапазоні від 3 мкм до 5 мкм. Як правило, корисний сигнал залежить від контрасту яскравості об'єкта і фону.

Підсумовуючи сказане можна зробити висновок, що ні просторове розділення, ні енергетичну чутливість не можна використовувати як єдиний параметр при оцінювання ефективності функціонування ТПСС.

3.2. Методи розрахунку узагальнених характеристик ТПСС

Розглянемо алгоритми розрахунку узагальнених характеристик ТПСС, які відіграють важливу роль при проєктуванні і використанні цих систем. До цих характеристик перш за все відносяться функція передачі сигналу, модуляційна передавальна функція, еквівалентна шуму різниця температур, мінімальна роздільна різниця температур.

3.2.1. Функція передачі сигналу

Для отримання функціональної залежності $u_s(L_t)$ розглянемо рис. 3.3.

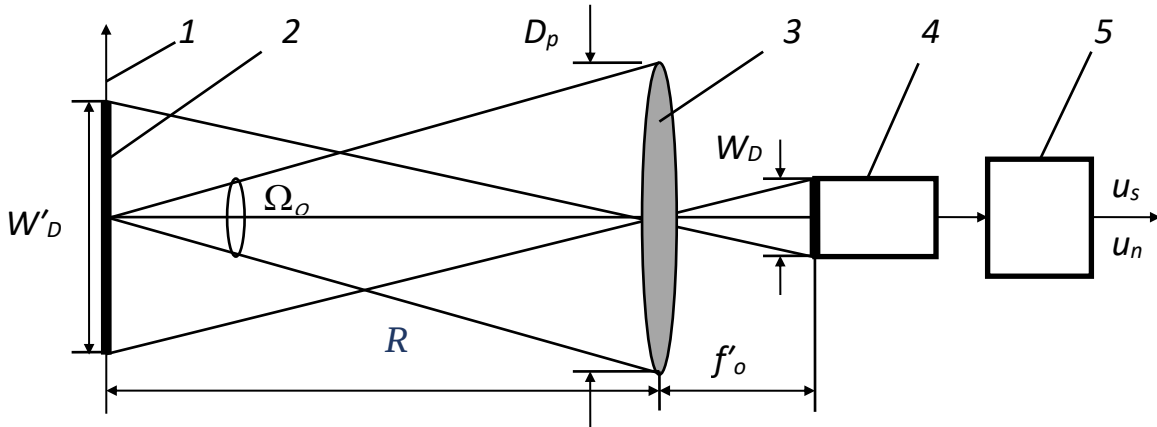


Рис. 3.3. До розрахунку функції передачі сигналу ТПСС:

1 – площина об'єкта випромінювання; 2 – миттєве лінійне поле зору;
3 – ОС; 4 – ПВ; 5 – відео підсилювач (еталонний фільтр)

Нехай об'єкт спостереження має рівномірну за площею спектральну яскравість $L_t(\lambda)$, а його кутові розміри $\xi_{\alpha} \times \xi_{\beta}$ значно перевищують миттєве поле зору ТПСС, розміщену на відстані R від об'єкта спостереження. Вважатимемо, що поверхня об'єкта випромінює за законом Ламберта.

Тоді спектральну яскравість поверхні об'єкта визначають за формулами (2.2) і (2.3) як

$$L_t(\lambda) = \frac{1}{\pi} \varepsilon_t(\lambda) M_\lambda(\lambda, T_t), \quad (3.6)$$

де $\varepsilon_t(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт випромінювання поверхні об'єкта; $M_\lambda(\lambda, T_t)$ – функція Планка.

Якщо поверхня об'єкта розміщена перпендикулярно до осі спостереження, то у вхідну зіницю ТПСС надходить спектральний потік випромінювання

$$\Phi_\lambda(\lambda) = \tau_A(\lambda) L_{\lambda t}(\lambda) A_t \Omega_o, \quad (3.7)$$

де $\tau_A(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери; A_t – площа об'єкта, що перебуває у межах миттєвого поля зору ТПСС; $\Omega_o = A_p / R^2$ – тілесний кут, у межах якого випромінювання від об'єкта надходить до вхідної зіниці ОС площею A_p .

Сигнал на виході ПВ із спектральною чутливістю $R_D(\lambda)$ дорівнюватиме

$$u_s = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_\lambda(\lambda) \tau_o(\lambda) R_D(\lambda) d\lambda = A_t \frac{A_p}{R^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) L_\lambda(\lambda) \tau_o(\lambda) R_D(\lambda) d\lambda. \quad (3.8)$$

При вимірюванні функції SiTF вважають, що тест-об'єкт розміщено на невеликій відстані від ТПСС (тобто $\tau_A(\lambda) \approx 1$), а спектральний коефіцієнт пропускання ОС у межах робочого спектрального діапазону має сталі середні значення τ_o . Тоді функція SiTF (3.8) ТПСС з урахуванням коефіцієнта підсилення електронного блока C_{El} та співвідношень $A_p = \pi D_o^2 / 4$ і $A_t / R^2 = A_D / f_o'^2$, яке випливає із рис. 3.3, набуде вигляду

$$u_s(L_t) = \frac{\pi}{4} C_{El} A_D \left(\frac{D_o}{f_o'} \right)^2 \tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_t(\lambda) R_D(\lambda) d\lambda. \quad (3.9)$$

Функція $u_s(L_t)$ має складний вигляд, який залежить, перш за все, від робочого спектрального діапазону та спектральної чутливості ПВ, що ускладнює вимірювання істинної яскравості об'єкта. Формула (3.9) не враховує спектральний склад електричного сигналу, який визначається системою сканування. Крім того, на величину сигналу u_s впливає коефіцієнт підсилення C_{El} та шуми системи.

3.2.2. Передавальна функція

Передавальну функцію можна застосовувати тільки до лінійних інваріантних систем (див. п. 1.4.5). Тепловізійні системи спостереження з невеликими контрастами яскравості у межах обмеженого поля зору можна вважати лінійними інваріантними системами. При цьому вважають, що об'єкт і фон випромінюють некогерентно, а кожен елемент узагальненої ТПСС має свою передавальну функцію та МПФ. Модуляційна передавальна функція ТПСС визначають добутком МПФ її окремих елементів: ОС, ПВ, електронного блока та дисплея. Для одновимірного випадку уздовж осі x , яка збігається з напрямом сканування, МПФ ТПСС дорівнює

$$M_s(v_x) = M_o(v_x) \cdot M_{Ds}(v_x) \cdot M_{Dt}(f) \cdot M_{El}(f) \cdot M_S(v_x), \quad (3.10)$$

де $M_o(v_x)$ – МПФ ОС, яку можна апроксимувати однією із формул із табл. 2.1;

$$M_{Ds}(v_x) = \sin c(\alpha_D v_x) \quad (3.11)$$

– просторова МПФ ПВ з прямокутною чутливою площадкою;

$$M_{Dt}(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + 4\pi^2 t_D^2 f^2}} \quad (3.12)$$

– часова МПФ ПВ, де t_D – постійна часу ПВ; $M_{El}(f)$ – МПФ електронного блока, яку можна описати функціями (2.65), (2.67), (2.68); $M_S(v_x)$ – МПФ дисплея, яку можна описати функцією (2.71).

У більшості випадків кутову просторову частоту v_x визначають у просторі предметів і вимірюють у мрад⁻¹. Зв'язок між просторовою частотою у просторі спостереження v_x'' і просторовою частотою у просторі предметів v_x визначають формулою (2.80). Зв'язок між просторовою v_x і часовою f частотами визначають співвідношенням (2.69), яке з урахуванням збільшення об'єктива β матиме вигляд

$$f = \frac{\alpha_D}{(1-\beta)t_o} v_x, \text{ Гц.} \quad (3.13)$$

Тоді МПФ усієї ТПСС добре апроксимується гаусовою функцією [2,8]

$$M_s(v_x) = \exp(-2\pi^2 r_s^2 v_x^2), \quad (3.14)$$

де r_s – радіус зображення точкового джерела випромінювання на екрані дисплея у мілірадіанах.

Із останнього виразу випливає, що ФРТ ТПСС можна записати як

$$h_s(\omega_x) = \int_{-\infty}^{\infty} M_s(v_x) \exp(2\pi\omega_x v_x) dv_x = \frac{1}{\sqrt{2\pi}r_s} \exp\left(-\frac{\omega_x^2}{2r_s^2}\right), \quad (3.15)$$

де ω_x – змінний кут поля зору, мрад.

У деяких випадках функцію (3.14) використовують лише у межах $0 \leq v_x \leq 1/\alpha_D$ або $0 \leq v_x \leq 1/2\alpha_D$. Частоту $v_{xc} = 1/\alpha_D$ називають *частотою зрізу*, за якої $M_{Ds}(v_{xc}) = \sin c(\alpha_D v_{xc}) = 0$. Частота $v_N = 1/2\alpha_D$ є частотою Найквіста.

3.2.3. Еквівалентна шуму різниця температур

Для отримання формули розрахунку $NETD$ скористаємося припущеннями і результатами, отриманими в п. 3.2.1. Також додатково зробимо ряд припущень [2, 4]:

1. Тест-об'єкт розміщено на незначній відстані від ТПСС. Тоді можна вважати, що випромінювання мало поглинається під час проходження через атмосферу, і в робочому спектральному діапазоні $\tau_A(\lambda) \approx 1$

2. Ефективну шумову смугу електронної системи визначають за формулою

$$\Delta f = \frac{1}{NEP_{\max}} \int_0^{\infty} NEP(f) |H_{f,tp}(f)|^2 df, \quad (3.16)$$

де $NEP(f)$ – спектральна щільність потужності шуму; $H_{f,tp}(f)$ – передавальна функція еталонного фільтра, яку визначають формулою (3.5).

3. Площинний тест-об'єкт має великий розмір і розміщений на рівномірному фоні. Різниця температур об'єкта і фону становить ΔT . Тест-об'єкт і фон випромінюють як АЧТ.

Оскільки об'єкт завжди міститься на фоні, то корисний сигнал виникає за наявності контрасту між об'єктом і фоном. Тоді

$$u_s = u_{st} - u_{sb}, \quad (3.17)$$

де u_{st} і u_{sb} – сигнали, утворені об'єктом і фоном відповідно.

Якщо об'єкт і фон випромінюють згідно із законом Ламберта (3.12), то формула (3.17) з урахуванням (3.6) набуде вигляду

$$\begin{aligned} u_s &= \frac{1}{\pi} A_t \frac{A_p}{R^2} \tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_D(\lambda) [M_\lambda(\lambda, T + \Delta T) - M_\lambda(\lambda, T)] d\lambda = \\ &= \frac{1}{\pi} A_t \frac{A_p}{R^2} \tau_o \cdot \Delta T \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_D(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda, \end{aligned} \quad (3.18)$$

де τ_o – середній коефіцієнт пропускання ОС.

Підставивши формулу (2.62) у (3.18) знайдемо відношення сигнал/шум на виході еталонного фільтра

$$SNR = \frac{u_s}{u_n} = \frac{1}{\pi} A_t \tau_o \frac{A_o}{d^2} \frac{\Delta T}{\sqrt{A_D \Delta f}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda. \quad (3.19)$$

Формулу для розрахунку $NETD$ знаходимо із (3.19), вважаючи, що $SNR = 1$.

Отже

$$NETD = \Delta T = \frac{\pi R^2 \sqrt{A_D \Delta f}}{A_t \tau_o A_p \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda}. \quad (3.20)$$

Отримана формула є найбільш загальною для розрахунку $NETD$. Запишемо цей вираз в іншому вигляді, користуючись рис. 3.3. Очевидно, що $A_p = \pi D_o^2 / 4$ і $A_t / R^2 = A_D / f_o'^2$. Тоді

$$NETD = \frac{4k_{eff}^2}{\tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}}. \quad (3.21)$$

Користуючись формулою (3.21), можна вказати наступні шляхи зменшення $NETD$:

1. Використання світлосильних об'єктивів з малим діафрагмовим числом $k_{eff} = f_o' / D_o$ і високим коефіцієнтом пропускання τ_o . Цей спосіб є найефективнішим, оскільки $NETD \sim k_{eff}^2$.

2. Використання ПВ з великою питомою виявлювальною здатністю $D^*(\lambda)$.

3. Зменшення ефективної шумової смуги Δf еталонного фільтра. Однак для отримання високого просторового розділення цю смугу потрібно збільшувати. Тому Δf обирають з компромісу між просторовим і температурним розділеннями.

4. З формули (3.21) також випливає, що $NETD \sim A_D^{-0,5}$, тобто збільшення площі чутливої площадки ПВ має призвести до зменшення $NETD$. Однак просторове розділення (миттєве поле зору) ТПСС відповідно до формули (1.1) $\delta\omega_s \sim V_D \sim A_D^{0,5}$. Тому площу ПВ, яка головним чином визначає просторове розділення, намагаються обрати мінімальною. Як

правило, вона обмежена абераціями ОС, і для спектральної області від 8 мкм до 14 мкм становить близько 17×17 мкм² [8].

У ТПСС з МПВ, крім шумів окремих пікселів, потрібно враховувати геометричний шум матриці. У зв'язку з цим для визначення $NETD$ розглядають такі складові:

1. $NETD_{th}$ обумовлена тепловим шумом Джонсона і $1/f$ – шумом (власними шумами);
2. $NETD_{ph}$ обумовлена радіаційним (фотонним) шумом і визначає теоретично мінімальне значення $NETD$;
3. $NETD_g$ обумовлена геометричним шумом.

Якщо домінують власні шуми ПВ, які визначаються паспортною питомою виявлювальною здатністю D^* , то для розрахунку $NETD$ використовують формули (3.20) або (3.21).

Можна зазначити, що параметр $NETD$ найповніше характеризує енергетичну чутливість ТПСС. Однак цей параметр має певні недоліки [2, 8]:

1. Формула (3.21) є справедливою тільки для об'єктів великих розмірів;
2. Параметр $NETD$ не враховує характеристики електронної системи обробки відеосигналу та дисплея;
3. Під час виведення формули для $NETD$ не був врахований оператор, який сприймає та аналізує зображення тест-об'єкта на екрані дисплея.

3.2.4. Мінімальна роздільна різниця температур

Як було сказано вище, найважливішими характеристиками ТПСС є просторове та температурне розділення. Для розрахунків бажано встановити функціональний зв'язок між ними. Такий зв'язок встановлюється з допомогою функції $MRTD(v_x)$, що визначає різницю температур між об'єктом та фоном, за якої можливо розділити оком на екрані дисплея зображення штрихової міри певної просторової частоти. Штрихові міри різних просторових частот за допомогою формул Колтмена [2, 8] можна перевести у розклад Фур'є структури об'єкта спостереження.

Теплову тест-міру зображено на рис. 3.2. Структура з 4-х штрихів з однаковими відстанями між ними та співвідношенням висоти до ширини 7:1 забезпечує певну періодичність в напрямі x і нескінчену протяжність штрихів у напрямі y .

Для описання тест-об'єкта використовують МПФ усієї ТПСС $M_s(v_x)$ згідно з (3.11). Оскільки $M_s(v_x)$ визначена для синусоїдальної міри, а тест-об'єкт для визначення $MRTD$ є прямокутною мірою, то треба ввести поправку на розклад Фур'є прямокутної міри. Із прикладу 1.3 випливає, що амплітуда 1-ї гармоніки прямокутного сигналу в $4/\pi$ разу є більшою, ніж амплітуда синусоїдального сигналу того ж періоду й амплітуди. Також слід врахувати, що зорова система реєструє середню яскравість прямокутного штриха на фоні. Середнє значення за півперіод 1-ї гармоніки прямокутного сигналу є в $2/\pi$ рази меншою за амплітуду (див. приклад 1.3). Звідси випливає, що МПФ ТПСС з урахуванням сприйняття тест-об'єкта оком набуде такого вигляду

$$M_{tp,E} = \frac{8}{\pi^2} M_s. \quad (3.22)$$

Урахування механізму сприйняття зоровою системою зображення здійснюється через співвідношення сигнал/шум на виході еталонного фільтра, для якого справедлива пропорційність

$$SNR_f \approx \frac{M_{tp,E} \Delta T}{NETD}, \quad (3.23)$$

де ΔT – температурний контраст. $NETD$ визначає шуми на виході еталонного фільтра з ефективною шумовою смугою Δf , а $M_{tp,E} \Delta T$ – сигнал з урахуванням роздільної здатності ТПСС.

При розрахунку відношення сигнал/шум потрібно зважати на відмінність ефективної шумової смуги ТПСС, що враховує спектр потужності шумів ПВ $NPS(f)$ та МПФ електронного тракту $M_{el}(f)$ і дисплея $M_s(f)$, від ефективної шумової смуги еталонного фільтра Δf . Тоді відношення сигнал/шум на екрані дисплея буде таким

$$SNR_S = \frac{M_{tp,E} \Delta T}{NETD} \left[\frac{\Delta f}{\int_0^{\infty} NPS(f) \cdot M_{El}^2(f) \cdot M_S^2(f) df} \right]^{0,5}. \quad (3.24)$$

Інтегруючи властивості зорової системи врахуємо зміною відношення сигнал/шум. При цьому вводять число SNR_r , яке гарантує із заданою ймовірністю розпізнавання тест-міри на зашумленому фоні.

Закони зорового сприйняття врахуємо таким чином:

1. Зорова система здійснює часове інтегрування, збільшуючи відношення сигнал/шум згідно з формулою (2.85) у $\sqrt{f_f t_E}$ разів, де f_f – частота кадрів; $t_E = 0,2$ с – постійна ока;

2. Зорова система здійснює просторове інтегрування за двома координатами відповідно до формули (2.84):

2.1. Під час інтегрування уздовж координати у відношення сигнал/шум, що сприймає зорова система, підвищується в

$$\left(\frac{\text{angle target size}}{\text{angle detector size}} \right)^{0,5} = \left(\frac{\xi_{tp}}{\beta_D} \right)^{0,5} \text{ разів};$$

2.2. Під час інтегрування уздовж координати x відношення сигнал/шум, що сприймає зорова система, підвищується у число разів. Це дорівнює кореню квадратному з відношення ефективних шумових смуг самої ТПСС та ТПСС з урахуванням МПФ ока $M_E(f)$, тобто в

$$\left[\frac{\int_0^{\infty} NPS(f) \cdot M_{El}^2(f) \cdot M_S^2(f) df}{\int_0^{\infty} NPS(f) \cdot M_{El}^2(f) \cdot M_S^2(f) \cdot M_E^2(f) df} \right]^{0,5} \text{ разів.}$$

Враховуючи всі зазначені фактори, відношення сигнал/шум, що сприймає оператор, дорівнюватиме

$$SNR_E = \frac{M_{tp,E} \Delta T}{NETD} \left[\frac{\Delta f}{\int_0^{\infty} NPS(f) \cdot M_{El}^2(f) \cdot M_S^2(f) \cdot M_E^2(f) df} \right]^{0,5} \times \\ \times (f_f t_E)^{0,5} \left(\frac{\xi_{tp}}{\beta_D} \right)^{0,5}. \quad (3.25)$$

Ймовірність виявлення зображення тест-об'єкта на екрані дисплея залежить від відношення сигнал/шум $SNR_E = SNR_r$, що сприймає зорова система оператора. Розв'язуючи рівняння (3.25) відносно ΔT , отримаємо загальну формулу для розрахунку $MRTD$:

$$SNR_E = SNR_r = \frac{\Delta T}{NETD} \frac{8}{\pi^2} M_s(\nu_x) \sqrt{\frac{f_f t_E 7 \omega_{tp}}{k_{\Delta f} \beta_D}}, \quad (3.26)$$

де

$$k_{\Delta f} = \frac{\int_0^{\infty} NPS(f) \cdot M_{El}^2(f) \cdot M_S^2(f) \cdot M_E^2(f) df}{\Delta f} \quad (3.27)$$

– коефіцієнт ширини смуги, що показує відмінність реальної смуги пропускання ТПСС з урахуванням зорового сприйняття від ефективної шумової смуги еталонного фільтра.

При цьому слід пам'ятати, що у формулі (3.26):

– кутовий розмір зображення об'єкта ξ_{tp}'' пов'язаний з кутовим розміром об'єкта ξ_{tp} у просторі предметів співвідношенням (2.79);

– просторова частота в МПФ дисплея та зорової системи пов'язані з часовою частотою співвідношеннями (2.80) і (3.13).

Для практичного розрахунку $MRTD$ отриману формулу (3.26) можна спростити, вважаючи що:

– електронний тракт і дисплей мають достатньо широкі ефективні шумові смуги пропускання порівняно із смугою ока, тобто $M_{El}(f) \approx 1$ і $M_S(f) \approx 1$, а шумовий сигнал ТПСС у межах цих смуг є «білим», тобто $NPS(f) \approx 1$;

– просторове інтегрування зорової системи уздовж координати сканування x здійснюється із узгодженою передавальною функцією, яка визначається розміром тест-об'єкта ξ''_{tp} , тобто

$$M_E(v_x) = \frac{\sin(\pi \xi''_{tp} v_x)}{\pi \xi''_{tp} v_x} = \text{sinc}(\xi''_{tp} v_x). \quad (3.28)$$

Тоді коефіцієнт ширини смуги (3.27) дорівнюватиме

$$k_{\Delta f} = \frac{\int_0^{\infty} \text{sinc}^2\left(\xi''_{tp} \frac{t_o}{\alpha_D} f\right) df}{\Delta f}. \quad (3.29)$$

З метою обчислення інтеграла у формулі (3.29) скористаємось табличним інтегралом:

$$\int_0^{\infty} \frac{\sin^2 bx}{x^2} dx = \frac{\pi}{2} |b|, \quad (3.30)$$

де $x = f$; $b = \pi \xi''_{tp} t_o / \alpha_D$. Тоді

$$k_{\Delta f} = \frac{\alpha_D}{2 \xi''_{tp} t_o \Delta f}. \quad (3.31)$$

Значення SNR_r , необхідне для розпізнавання (виявлення) штрихової міри є відомим [8]. Наприклад, якщо ймовірність розпізнавання має бути 0,9, то треба, щоб $SNR_r = 4,5$. Якщо підставити це числове значення в (3.26), то ΔT буде шуканою функцією $MRTD$ просторової частоти v_x .

Під час практичного застосування функції $MRTD(v_x)$ допускають, що у робочій смузі пропускання ТПСС шум є «білим». Тоді для $k_{\Delta f}$ справедливе співвідношення (3.31), яке за ширини штриха $\omega_{tp} = \xi''_{tp} / \Gamma_s = (2 \Gamma_s v_x)^{-1}$ має вигляд

$$k_{\Delta f} = \frac{\Gamma_s v_x \alpha_D}{t_o \Delta f}. \quad (3.32)$$

З урахуванням цього із співвідношення (3.26) отримаємо формулу для розрахунку МРРТ:

$$\Delta T = MRTD(v_x) = 0,66 \cdot SNR_r \cdot NETD \frac{\Gamma_s v_x}{M_s(v_x)} \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f t_o f_f t_E}}, \text{ К.} \quad (3.33)$$

Слід зазначити, що кутова просторова частота ν_x у формулі (3.33) визначена у просторі «дисплей – спостерігач».

Отримана формула (3.33) має деякі обмеження:

1. Формула (3.28) для МПФ ока справедлива для випадку, коли розмір зображення штриха міри ω''_{tp} перевищує кутове розділення зорової системи;
2. Просторове інтегрування зорової системи припиняється, якщо $7\omega''_{tp} > 40$ кутових мінут (див. п. 2.7.3).

Численні дослідження ТПСС свідчать про те, що розрахунок за формулою (3.33) дає хороші результати, які збігаються з експериментальними даними. Однак така узагальнена характеристика, як *MRTD*, має і певні недоліки. По-перше, вона не враховує реальну МПФ зорової системи. По-друге, формула для *MRTD* не враховує характеристики реальних об'єктів та фонів.

Проте формула (3.33) дозволяє проаналізувати вплив основних параметрів ТПСС на просторове і температурне розділення та дозволяє порівнювати різні ТПСС між собою.

Важливість функції *MRTD*(ν_x) як узагальненої характеристики ТПСС полягає у тому, що вона визначає температурну чутливість на низькій просторовій частоті (для великих об'єктів) і просторове розділення на високих частотах. Також *MRTD*(ν_x) дозволяє ефективно порівнювати ТПСС, тому що враховує всю систему в цілому, її шуми і сприйняття зображення оператором.

Оскільки МРРТ є функцією просторової частоти ν_x , параметрів ТПСС, а також *NETD*, то використовуючи залежність *MRTD*(ν_x), можна знайти просторову роздільну здатність системи ν_{res} . Для багатьох реальних систем роздільну здатність знаходять із рівняння $MRTD(\nu_{res}) = (0,3...0,7) NETD$ [13]. Функцію *MRTD*(ν_x) і параметр *NETD* визначають за температури фону $T_b = 300$ К

Однак МРРТ не враховує деякі істотні фактори, які впливають на її реальне значення [13]:

1. МРРТ визначає залежність температурного контрасту $\Delta T = T_t - T_b$ міри Фуко від її просторової частоти. Але ТПСС сприймає не температурний контраст ΔT , а контраст яскравості міри $\Delta L = L_t - L_b$. Згідно

із законом Стефана-Больцмана для ламбертовського джерела випромінювання маємо, що контраст яскравості міри дорівнює

$$\begin{aligned}\Delta L &= \frac{\sigma}{\pi} [T_t^4 - T_b^4] = \frac{\sigma}{\pi} [(T_b + \Delta T)^4 - T_b^4] = \\ &= \frac{\sigma}{\pi} [4T_b^3 \Delta T + 6T_b^2 \Delta T^2 + 4T_b \Delta T^3 + \Delta T^4],\end{aligned}\quad (3.34)$$

де $\sigma = 5,67023 \cdot 10^{-8}$ – стала Стефана-Больцмана, Вт $\cdot$ м⁻² $\cdot$ К⁻⁴.

Із цього виразу випливає, що температура фону T_b впливає на визначення МРРТ. Для малого температурного контрасту $\Delta T \ll T_b$ маємо

$$\Delta L \cong \frac{4\sigma}{\pi} T_b^3 \Delta T. \quad (3.35)$$

Звідси можна визначити температуру фону

$$T_{b0} = \sqrt[3]{\frac{\pi}{4\sigma}} = 240,1576, \quad (3.36)$$

для якої температурний контраст ΔT дорівнює контрасту яскравості ΔL у Вт/(ср $\cdot$ м²).

Інші складові в (3.34) вносять додаткову похибку у визначення МРРТ.

2. Сприйняття оператором зображення міри є нелінійним процесом, обумовленим такими основними чинниками:

2.1. Зорове відчуття залежить від логарифму освітленості сітківки ока;

2.2. При точковому освітленні рецептора (колбочки) світлове відчуття спостерігається і в сусідніх рецепторах (так званий ефект затримки). Через це зорова система реагує сильніше на зображення смуги прямокутної форми (по краях), ніж на смугу синусоїдальної форми.

3. Модуляційна передавальна функція зорового сприйняття залежить від кута поля зору кожного ока.

4. Розділення зображення штрихових мір залежить від суб'єктивних особливостей зорового сприйняття оператора.

5. Період і просторова частота міри Фуко не відповідають періоду і частоті просторової вибірки в МПВ. У багатьох випадках не враховується випадкове взаємне положення зображення міри і періодичної структури МПВ, тобто фазовий зсув.

6. Під час утворення зображення, яке має просторові частоти більші

за частоту Найквіста МПВ, виникає низка проблем з обробкою відеосигналу. Наприклад, при використанні мікросканування.

Більш узагальненою характеристикою, що поєднує енергетичне і просторове розділення ТПСС, є *мінімальна роздільна різниця яскравості* (МРРЯ, Minimum Resolvable Luminance Difference) $MRLD(v_x)$, яку можна визначити із (3.35) як

$$MRLD(v_x) = MRTD(v_x) \frac{4\sigma}{\pi} T_b^3. \quad (3.37)$$

У загальному випадку МРРЯ визначають як [13]

$$MRLD(v_x) = \frac{1}{\pi} \left[4\sigma T_b^3 \cdot MRTD(v_x) + \sigma T_b^4 (\varepsilon_t - \varepsilon_b) + \rho_t E_{0b} + E_{0s} (\rho_t - \rho_b) \right], \quad (3.38)$$

де $\varepsilon_t, \varepsilon_b$ і ρ_t, ρ_b – коефіцієнти випромінювання і відбиття поверхонь об'єкта і фону відповідно; E_{0b} – освітленість об'єкта фоном; E_{0s} – освітленість об'єкта і фону зовнішнім джерелом випромінювання.

3.2.5. Приклади розрахунку узагальнених характеристик ТПСС

Приклад 3.2.1. Оптико-електронна система тепловізора використовує МПВ, який має розмір пікселів $V_D \times W_D$. Модуляційну передавальну функцію системи визначають МПФ ОС і просторова МПФ ПВ. МПФ ОС описується лінійним наближенням 2 із табл. 2.1 за $n = 1$. Визначте МПФ ТПСС, що забезпечує контраст зображення C_s на просторовій частоті v_{res} , яка відповідає також рівності (узгодженню) МПФ ОС і ПВ.

Розв'язання. 1. Для лінійних інваріантних систем МПФ ТПСС визначаємо формулою (3.10), яку для умови прикладу можна записати у вигляді

$$M_s(v_x) = M_o(v_x) M_{Ds}(v_x),$$

де $M_o(v_x)$ – МПФ ОС; $M_{Ds}(v_x)$ – просторова МПФ ПВ.

2. Згідно з умовами прикладу МПФ ОС описують функцією

$$M_o(v_x) = 1 - \left(\frac{1 - M_{o1}}{v_{x1}} \right) v_x, \quad (3.39)$$

де ν_{x1} – просторова частота, яка відповідає зменшенню МПФ об'єктива до величини M_{o1} .

3. Просторова МПФ ПВ $M_{Ds}(\nu_x)$ визначається розмірами чутливої площадки пікселя $V_D \times W_D$. Для одновимірного випадку маємо

$$M_{Ds}(\nu_x) = \frac{\sin(\pi V_D \nu_x)}{\pi V_D \nu_x}. \quad (3.40)$$

Тоді результуючу МПФ ТПСС визначаємо функцією

$$M_s(\nu_x) = \left[1 - \left(\frac{1 - M_{o1}}{\nu_{x1}} \right) \nu_x \right] \frac{\sin(\pi V_D \nu_x)}{\pi V_D \nu_x}. \quad (3.41)$$

4. Під час узгодження МПФ об'єктива і ПВ часто застосовують принцип рівнозначності, згідно з яким об'єктив і ПВ однаково погіршують якість зображення. З математичної точки зору це означає, що (рис. 3.4)

$$M_o(\nu_x) = M_{Ds}(\nu_x) = C_0, \quad (3.42)$$

де C_0 – залишковий контраст.

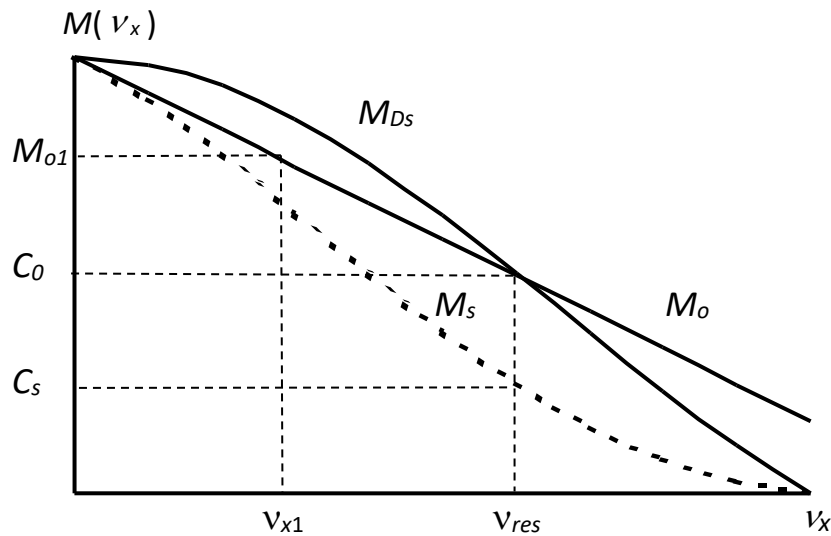


Рис. 3.4. Узгодження МПФ об'єктива $M_o(\nu_x)$ з МПФ ПВ $M_{Ds}(\nu_x)$

Якщо підставити МПФ об'єктива (3.39) і ПВ (3.40) у формулу (3.42), то отримаємо значення МПФ ТПСС для визначення роздільної здатності

$$M_s(\nu_{res}) = C_0^2 = C_s. \quad (3.43)$$

Система рівнянь (3.42) і (3.43) означає, що узгодження аберцій об'єктива з розмірами пікселя ПВ відбувається за певного значення

контрасту C_s зображення на екрані дисплея, який відповідає просторовій роздільній здатності v_{res} .

5. Установимо зв'язок між параметрами об'єктива і ПВ за заданих значень просторового розділення v_{res} і контрасту зображення C_s . Із системи рівнянь (3.43) з урахуванням функцій (3.39) і (3.40) маємо

$$1 - \left(\frac{1 - M_{o1}}{v_{x1}} \right) v_{\text{res}} = C_0 = \sqrt{C_s}; \quad \frac{\sin(\pi V_D v_{\text{res}})}{\pi V_D v_{\text{res}}} = C_0 = \sqrt{C_s}, \quad (3.44)$$

звідки

$$v_{1x} = \frac{1 - M_{o1}}{1 - \sqrt{C_s}} v_{\text{res}}; \quad (3.45)$$

$$V_D = \frac{1}{v_{\text{res}}} F(\sqrt{C_s}), \quad (3.46)$$

де $F(\)$ – функція, обернена до функції $\sin(\pi x)/\pi x$.

Отримані формули (3.45) і (3.46) дозволяють визначити розмір пікселя ПВ V_D і роздільну здатність об'єктива v_{x1} при контрасті зображення M_{o1} , які забезпечують просторове розділення v_{res} ТПСС при контрасті зображення C_s .

6. Підставимо вирази (3.45) і (3.46) у формулу (3.41) і отримаємо МПФ ТПСС:

$$M_s(v_x) = \left[1 - \left(\frac{1 - \sqrt{C_s}}{v_{\text{res}}} \right) v_x \right] \frac{\sin \left(\pi F(\sqrt{C_s}) \frac{v_x}{v_{\text{res}}} \right)}{\pi F(\sqrt{C_s}) \frac{v_x}{v_{\text{res}}}}.$$

Приклад 3.2.2. Визначте максимальну просторову роздільну здатність і мінімальне кутове розділення контрастно обмеженої ТПСС, яка має параметри:

- об'єктив – фокусна відстань $f'_o = 60$ мм, діафрагмове число $k_o = 1$;
- ПВ – мікроболометрична матриця формату $p_D \times q_D = 320 \times 240$ з розміром пікселя $V_D \times W_D = 51 \times 51$ мкм²;

– дисплей – розмір екрана $V_S \times W_S = 8 \times 6 \text{ см}^2$, а оператор перебуває на відстані $R_{SE} = 25 \text{ см}$ від екрана.

Розв'язання. 1. Просторову роздільну здатність ТПСС визначимо із рівняння

$$M_s(v_x) = C_{E,th}(v_x), \quad (3.47)$$

де $M_s(v_x)$ – МПФ системи, яку будемо апроксимувати функцією (3.14); $C_{E,th}(v_x)$ – пороговий контраст зорового сприйняття зображення, який будемо апроксимувати функцією (2.82). При цьому просторова частота v_x визначається у просторі «дисплей – оператор» і має розмірність мрад⁻¹.

2. Тепловізійна система спостереження матиме максимальну роздільну здатність (мінімальне кутове розділення), коли об'єкти – дифракційно обмежена система, а електронний тракт і дисплей не вносять додаткових спотворень у зображення об'єкта. У цьому випадку МПФ системи буде визначатись кутовими розмірами пікселя МПВ α_D, β_D .

У прикладі 2.2 [8] показано, що для апроксимації (3.14) $r_s = 0,282\alpha_D$, де

$$\alpha_D = \frac{V_D}{f'_o} = \frac{51}{60} = 0,85 \text{ мрад}.$$

Тоді $r_s = 0,24 \text{ мрад}$.

3. Визначимо кутове збільшення ТПСС із рис. 3.5 як

$$\Gamma_s = \frac{\text{tg}\omega_{Sy}}{\text{tg}\omega_{Dy}}, \quad (4.48)$$

де $2\omega_{Sy}$ – кутовий розмір екрана дисплея; $2\omega_{Dy}$ – кутовий розмір МПВ уздовж осі у.

Із рис. 3.5 знаходимо, що

$$\text{tg}\omega_{Sy} = \frac{W_S}{R_{SE}} = \frac{3}{25} = 0,12.$$

$$\text{tg}\omega_{Dy} = \frac{l_{Dy}}{2f'_o} = \frac{240 \cdot 51 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 60} = 0,1.$$

Тоді система «ТПСС – оператор» матиме кутове збільшення $\Gamma_s = 1,2^\times$.

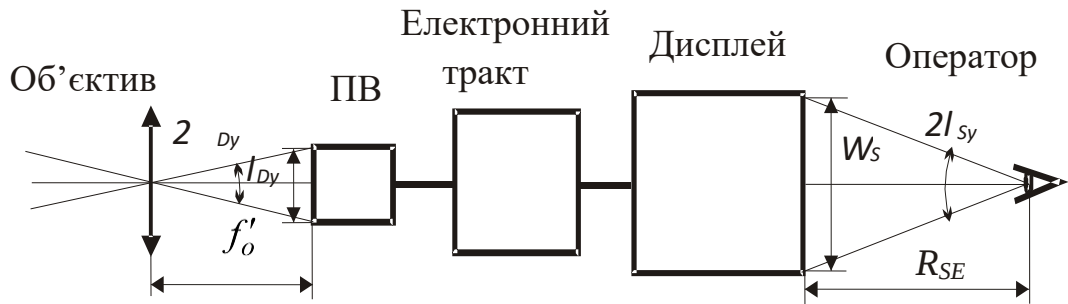


Рис. 3.5. До визначення кутового збільшення системи «ТПСС – оператор»

4. Рівняння (3.47) з урахуванням кутового збільшення та формул (2.80) і (2.82) запишемо у вигляді

$$M_s(\Gamma_s v_x) = C_{E,th}(v_x)$$

або

$$\exp(-1,137 v_x^2) = \frac{0,01033}{\exp(-1,986 v_x) - \exp(-5,673 v_x)}.$$

Розв'язком цього трансцендентного рівняння є $v_{x,max} = v_{res} = 1,47 \text{ мрад}^{-1}$. Мінімальне кутове розділення розрахуємо за формулою

$$\delta\omega_s = \frac{1}{2v_{res}} = 0,34 \text{ мрад} = 1,17 \text{ кут. мін.}$$

Приклад 3.2.3. Тепловізор «Рубін-2», призначений для вимірювання температурних полів віддалених об'єктів, має такі основні паспортні дані:

$NETD = 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$; поле зору $20^\circ \times 15^\circ$; час огляду 60 с; ПВ – одно елементний InSb-приймач розміром $0,3 \times 0,3 \text{ мм}^2$; число рядків сканування 150. Знайдіть функцію передачі сигналу цього тепловізора в діапазоні від 50°C до 100°C .

Розв'язання. 1. Функція передачі сигналу визначається формулою (3.9), яка для ТПСС з урахуванням (3.6) матиме вигляд

$$u_s(T_t) = \frac{1}{4} C_{El} \left(\frac{D_o}{f'_o} \right)^2 A_D \tau_o \varepsilon_t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_D(\lambda) M_\lambda(\lambda, T_t) d\lambda, \quad (3.49)$$

де $C_{El} = 4 \cdot 10^4$ – коефіцієнт підсилення відео підсилювача (обирається з урахуванням вимірювального пристрою); $A_D = 9 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ – площа чутливого

елемента ПВ; $\varepsilon_t = 1$ – коефіцієнт випромінювання поверхні об'єкта.

2. Фізичну світлосилу об'єктива визначимо з формули (3.21) для *NETD*:

$$\tau_o \frac{1}{k_{eff}^2} = \tau_o \left(\frac{D_o}{f'_o} \right)^2 = \frac{4}{NETD \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}},$$

де $NETD = 0,1$ К – еквівалентна шуму різниця температур; Δf – ефективна шумова смуга ВПС, яку визначають формулою (1.12):

$$\Delta f = \frac{2\omega_{ox} 2\omega_{oy} f_f}{2\alpha_D \beta_D \eta_{sc}},$$

де $2\omega_{ox} \times 2\omega_{oy} = 20^\circ \times 15^\circ$ – кутове поле зору; $f_f = 1/60$ Гц – частота кадрів; $\alpha_D = \beta_D = 2\omega_{oy}/q = 15/150 = 0,1^\circ$ – кутовий розмір чутливої площадки ПВ; $\eta_{sc} = 0,64$ – коефіцієнт розгортки. Тоді $\Delta f = 390,6$ Гц.

Обчислимо інтеграл у знаменнику. Для фотонного приймача із InSb маємо [8]:

$$D^*(\lambda) = \begin{cases} \frac{\lambda}{\lambda_2} D^*(\lambda_2), & \text{якщо } 0 \leq \lambda \leq \lambda_2; \\ 0, & \text{якщо } \lambda > \lambda_2, \end{cases} \quad (3.50)$$

де $D^*(\lambda_2) = 8 \cdot 10^{10}$ см·Гц^{0,5}·Вт⁻¹ – питома виявлювальна здатність ПВ; робочий спектральний діапазон $\lambda_1 \dots \lambda_2 = 3 \dots 5,5$ мкм.

Для ТПСС справедливе співвідношення [8]:

$$I = \int_3^{5,5} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda \approx \frac{D^*(\lambda_2) c_2}{\lambda_2 T^2} \int_3^{5,5} M_\lambda(\lambda, T) d\lambda.$$

Використовуючи формулу Планка (2.3), обчислимо інтегральну світність АЧТ за температури $T = 300$ К:

$$\int_3^{5,5} M_\lambda(\lambda, T = 300\text{K}) d\lambda = 1,09 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/см}^2.$$

Тоді $I = 2,54 \cdot 10^6$ Гц^{0,5}·см⁻¹·К⁻¹. Підставляючи вихідні параметри у розрахункову формулу, маємо $\tau_o \left(\frac{D_o}{f'_o} \right)^2 = 0,01$.

3. Спектральну чутливість фотонного ПВ визначають формулою (3.50), де $R_{D\max} = 10^4$ В/Вт – максимальне значення спектральної чутливості ПВ за $\lambda_2 = 5,5$ мкм.

4. Підставляючи отримані параметри у розрахункову формулу (3.49), маємо

$$u_s(T_t) = 164 \cdot \int_3^{5,5} \lambda M_\lambda(\lambda, T_t) d\lambda.$$

Графік функції передачі сигналу SiTF $u_s(v_t) = u_s(T_t = v_t + 273)$ зображено на рис. 3.6.

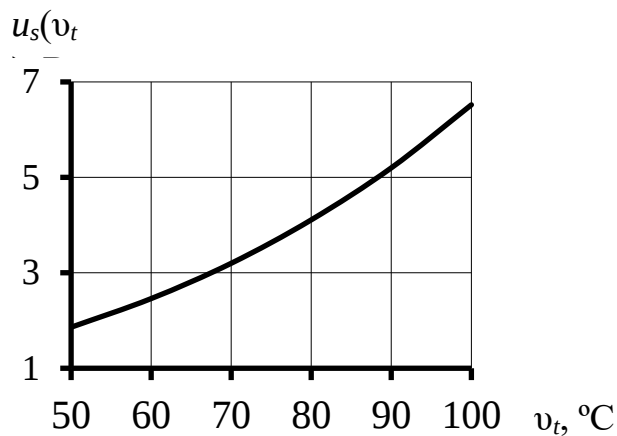


Рис. 3.6. До розв'язання прикладу 3.2.3: функція передачі сигналу SiTF тепловізора «Рубін-2»

Приклад 3.2.4. Розрахуйте $NETD$ і $MRTD$ для ТПСС, яка має такі параметри: кутове поле зору $2\omega_x \times 2\omega_y = 8^\circ \times 6^\circ$; діафрагмове число $k_{eff} = 2$; середній коефіцієнт пропускання оптики $\tau_o = 0,6$; ПВ служить КРТ-лінійка з 128 елементами розміром $V_D \times W_D = 50 \times 50$ мкм², відстань між якими 0,1 мм, і питомою виявлювальною здатністю $D^*(\lambda_2) = 3 \cdot 10^{10}$ см·Гц^{0,5}·Вт⁻¹, який працює у спектральному діапазоні $\lambda_1 \dots \lambda_2 = 8 \dots 12$ мкм; сканування – паралельне черезрядкове з ефективністю $\eta_{sc} = 0,64$ і частотою $f_f = 25$ Гц; число активних рядків розкладу $q_a = 256$. Температура об'єкта 300 К.

Розв'язання. 1. Еквівалентну шуму різницю температур розрахуємо за формулою (3.21):

$$NETD = \frac{4k_{eff}^2}{\tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}},$$

де $k_{eff} = 2$; $\tau_o = 0,6$; $A_D = V_D \times W_D = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$ – площа чутливого елемента ПВ.

2. Ефективну шумову смугу визначимо за формулою (1.13)

$$\Delta f = \frac{2\omega_{ox} 2\omega_{oy} f_f}{2q_D \alpha_D \beta_D \eta_{sc}},$$

де $\frac{2\omega_{ox} 2\omega_{oy}}{\alpha_D \beta_D} = p_a q_a = \left(\frac{2\omega_{ox}}{2\omega_{oy}} q_a \right) q_a = \frac{8}{6} 256^2 = 87\,380$ – число елементів

розкладу тепловізійного зображення. Тоді $\Delta f = 13,3 \text{ кГц}$.

3. Обчислюємо інтеграл за методикою, викладеною у прикладі 3.2.3:

$$I = \int_8^{12} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda}{\partial T} d\lambda = \frac{c_2 D^*(\lambda_2)}{\lambda_2 T_t^2} \int_8^{12} M_\lambda(\lambda, T_t) d\lambda.$$

Із табл. 3.6 [8] знаходимо інтеграл:

$$\int_8^{12} M_\lambda(\lambda, T_t = 300 \text{ К}) d\lambda = 12,1 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/см}^2.$$

Тоді $I = 4,84 \cdot 10^6 \sqrt{\text{Гц}} / (\text{см} \cdot \text{К})$.

4. Підставляючи вихідні дані у розрахункову формулу, маємо $NETD = 0,13 \text{ К}$.

5. Мінімальну роздільну різницю температур розрахуємо за формулою (3.33), яку з урахуванням прикладу 3.8.1 [8] ($SNR_r = 4,5$ за $P_d = 0,9$), формули $\Delta f t_o = 0,5$ для збільшення ТПСС $\Gamma_s = 1$ напишемо у такому вигляді:

$$\Delta T = MRTD(v_x) = 4,2 \cdot NETD \frac{v_x}{M_s(v_x)} \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{f_f t_E}}, \text{ К},$$

де $f_f = 25 \text{ Гц}$; $t_E = 0,2 \text{ с}$.

6. Кутовий розмір чутливого елемента ПВ (миттєвого поля зору) визначимо за формулою (1.1):

$$\alpha_D = \beta_D = \frac{V_D}{f'_o},$$

де фокусну відстань об'єктива визначаємо із формули:

$$f'_o = \frac{l_{Dy}}{2 \operatorname{tg} \omega_{oy}},$$

де $l_{Dy} = 128 \cdot 0,1 = 12,8$ мм – розмір лінійки ПВ (лінійне поле зору у просторі зображення об'єктива). Тоді $f'_o = 122,1$ мм, а $\alpha_D = \beta_D = 0,4$ мрад.

7. Нехай МПФ тепловізора визначається кутовим розміром чутливого елемента ПВ. Тоді згідно з (2.65)

$$M_s(v_x) = M_{Ds}(v_x) = \operatorname{sinc}(\alpha_D v_x).$$

8. Підставляючи вихідні дані в розрахункову формулу, маємо:

$$MRTD(v_x) = 0,1 \frac{v_x}{\operatorname{sinc}(\alpha_D v_x)} = \frac{0,1 \pi \alpha_D v_x^2}{\sin(\pi \alpha_D v_x)}.$$

Графік цієї функції подано на рис. 3.7.

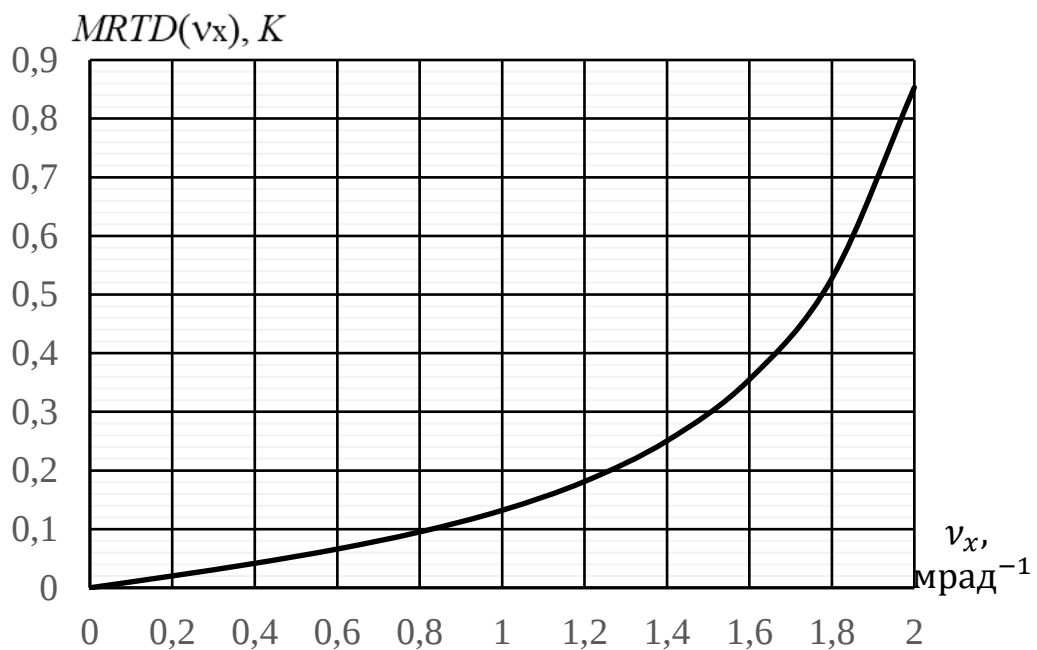


Рис. 3.7. До розв'язання прикладу 3.2.4: $MRTD(v_x)$ тепловізора

Задачі для самостійного розв'язання

Задача 3.1. Для апроксимації ФРТ ІЧ об'єктива запропоновано функцію

$$PSF(x', y') = \begin{cases} \cos^2\left(\frac{\pi x'}{2 r'_o}\right) \cos^2\left(\frac{\pi y'}{2 r'_o}\right), & \text{якщо } |x'|, |y'| \leq r'_o; \\ 0 & \text{в інших випадках.} \end{cases}$$

Визначте МПФ такого об'єктива, користуючись табличними інтегралами

$$\int e^{ax} \cos^2 x dx = \frac{e^{ax}}{a^2 + 4} \left(a \cdot \cos^2 x + \sin 2x + \frac{2}{a} \right), \quad a \neq 0$$

$$\text{і } \int \cos^2 x dx = \frac{x}{2} + \frac{\sin 2x}{4}.$$

$$\text{Відповідь: } M_o(v'_x, v'_y) = \frac{\sin c(2\pi r'_o v'_x)}{(1 - 4r'^2_o v'^2_x)} \frac{\sin c(2\pi r'_o v'_y)}{(1 - 4r'^2_o v'^2_y)}.$$

Задача 3.2*. Установіть зв'язок між просторовими розділеннями v_{res}^c , яке визначають із рівняння $M_s(v_{\text{res}}^c) = C_0$, і геометричною шумовою смугою GB ОС, що має МПФ у вигляді гасової функції 3 із табл. 2.1.

$$\text{Відповідь: } v_{\text{res}}^c = \frac{1}{\pi} \sqrt{2\pi \cdot GB \cdot \ln \frac{1}{C_0}}.$$

Задача 3.3. Визначте питому виявлювальну здатність мікроболометричної матриці U 3000, яка для температури тест-об'єкта 300 К, має такі параметри:

- період матриці $V_D \times W_D = 51 \times 51 \text{ мкм}^2$;
- коефіцієнт заповнення $k_{Dff} = 0,5$;
- еквівалентна шуму різниця температур $NETD = 0,08 \text{ К}$;
- постійна часу $t_D = 25 \text{ мс}$;
- робочий спектральний діапазон $\lambda_1 \dots \lambda_2 = 8 \dots 14 \text{ мкм}$.

Вказівка: Скористайтесь прикладом 2.5.1.

Відповідь: $D_{th}^* = 3,73 \cdot 10^8 \frac{\text{см} \sqrt{\text{Гц}}}{\text{Вт}}$.

Задача 3.4. Який формат кадру можна реалізувати ТПСС з різними одно елементними ПВ, якщо частота кадрів $f_f = 30 \text{ Гц}$, формат кадру $k_f = 4/3$, ефективність сканування $\eta_{sc} = 0,6$?

Відповідь: 3 (1.2), (1.5) і (1.13) за $t_o = \pi t_D$ впливає, що $p^2 = \frac{k_f \eta_{sc}}{f_f \pi t_D}$.

ПВ	t_D	Формат $p \times q$	Робоча температура T_D , К
Термоелемент	10 мс	1×1	300
Піромодуль	2 мс	2×2	300
PbSe	50 мкс	13×9	77
HgCdTe	0,1 мкс	291×218	77

Задача 3.5. Розрахуйте SNR_{Ed} у разі виявлення об'єкта на екрані дисплея з імовірністю $P_d = 50$ і 90% при пороговому значенні $SNR_{th} = 3,5$.

Відповідь: 3,5; 4,8.

Задача 3.6. Знайдіть фокусну відстань об'єктива ТПСС, який дозволяє розпізнати автомобіль розміром $3 \times 2 \text{ м}^2$, розміщений на відстані 1 км від тепловізора. Роздільна здатність тепловізора визначається чутливою площадкою ПВ розміром $50 \times 50 \text{ мкм}^2$.

Відповідь: 200 мм.

Задача 3.7. Тепловізійна система спостереження має об'єктив з фокусною відстанню 200 мм і МПВ з розміром чутливої площадки $20 \times 20 \text{ мкм}^2$. Визначте максимальну відстань, на якій оператор може розпізнати людину, якщо роздільна здатність системи визначається розмірами пікселя МПВ (вважати, що людина має розмір $0,5 \times 1,8 \text{ м}^2$).

Відповідь: $R = f_o' \frac{V_t}{8V_D} = 625 \text{ м}$.

РОЗДІЛ 4. ОСНОВИ ПРОЄКТУВАННЯ КЛАСИЧНИХ ТЕПЛОВІЗОРІВ

4.1. Класичний енергетичний розрахунок ТПСС

Методи енергетичних розрахунків ТПСС є дуже добре опрацьованими та стандартизованими [1, 8, 14]. У загальному вигляді їх можна звести до такого алгоритму:

- отримання узагальненого енергетичного рівняння або нерівності, яке встановлює у загальному вигляді зв'язок між корисним сигналом, шумом і завадами. В цьому рівнянні фактично відображено алгоритм роботи ТПСС з урахуванням структури системи та критерію якості її роботи;
- представлення корисного сигналу, шуму і завад, що входять в узагальнене рівняння, у вигляді функцій параметрів і характеристик об'єкта спостереження, фону, атмосфери, ТПСС, оператора;
- розв'язання узагальненого рівняння відносно одного або сукупності декількох параметрів, які входять до цього рівняння, або заданого критерію якості ТПСС;
- вибір і розрахунок інших параметрів, а також перевірка виконання умов, заданих на першому етапі розрахунків.

Завданням спрощеного енергетичного розрахунку ТПСС є визначення параметрів системи, за яких на виході ПВ забезпечується достатнє для вирішення поточної задачі відношення сигнал/шум SNR . Зазвичай це завдання зводиться до розрахунку порогової чутливості і дальності дії ТПСС за заданих параметрів (аналіз) або до знаходження значення цих параметрів, якщо задана дальність дії або порогова чутливість (синтез). Розглянемо спочатку задачу аналізу, а потім задачу синтезу ТПСС.

Під *дальністю дії* ТПСС будемо розуміти ту найбільшу дальність до об'єкта спостереження, за якої величина потоку випромінювання від об'єкта забезпечує задане відношення сигнал/шум SNR_d на виході системи.

Розглянемо два випадки, які зустрічаються під час спрощеного енергетичного розрахунку [8]:

1. Об'єкт спостереження проєктується на фон, що не випромінює.

2. Об'єкт спостереження проектується на фон, що рівномірно випромінює.

У будь-якому з указаних випадків вихідними для енергетичного розрахунку ТПСС є дані, які характеризують об'єкт, фон, атмосферу, ОС і ПВ. Ці дані було розглянуто в розділах 2 і 3.

4.1.1. Розрахунок дальності дії ТПСС у разі відсутності фону

Перший етап енергетичного розрахунку зводиться до визначення величини потоку випромінювання від об'єкта, який надходить на чутливу площадку ПВ.

Оскільки спектральний склад потоку від об'єкта в загальному випадку описується довільною функцією спектральної щільності, а на шляху розповсюдження він зазнає селективного ослаблення в атмосфері й ОС, то доцільно усі процедури отримання залежностей виконувати стосовно монохроматичного потоку з наступним переходом до інтегральних величин.

Монохроматичний потік випромінювання, що надходить до вхідної зіниці ТПСС від об'єкта, визначають як

$$\Phi_{\lambda p}(\lambda) = \Phi_{\lambda t}(\lambda) \tau_A(\lambda) = \tau_A(\lambda) I_t(\lambda) \Omega_o = L_t(\lambda) \tau_A(\lambda) A_t \Omega_o, \quad (4.1)$$

де $\tau_A(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери; $I_t(\lambda)$ і $L_t(\lambda)$ – спектральна сила випромінювання та яскравість об'єкта відповідно; $\Omega_o = \frac{A_p}{R^2}$ – тілесний кут, у межах якого випромінювання поширюється від об'єкта до системи (рис. 3.3); A_p – площа вхідної зіниці ОС; R – відстань між ТПСС і об'єктом.

Якщо поверхня об'єкта утворює кут α з віссю візування, то величина потоку, що надходить до ПВ дорівнюватиме

$$d\Phi_t(\lambda) = \Phi_{\lambda t}(\lambda) \tau_A(\lambda) \tau_o(\lambda) d\lambda = L_t(\lambda) \frac{A_p A_t \cos \alpha}{R^2} \tau_A(\lambda) \tau_o(\lambda) d\lambda, \quad (4.2)$$

де $\tau_o(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт пропускання ОС.

Ефективний інтегральний потік випромінювання, що надходить до ПВ, може бути розрахований інтегруванням за усіма довжинами хвиль з урахуванням відносної спектральної чутливості ПВ

$R_{Dn}(\lambda) = R_D(\lambda) / R_{D,\max}$, тобто

$$\Phi_{eff} = \int_0^{\infty} \Phi_{\lambda t}(\lambda) \tau_A(\lambda) \tau_o(\lambda) R_{Dn}(\lambda) d\lambda = k_{Dr} \Phi_t, \quad (4.3)$$

де

$$\Phi_t = \int_0^{\infty} \Phi_{\lambda t}(\lambda) d\lambda = \frac{A_p A_t \cos \alpha}{R^2} \int_0^{\infty} L_t(\lambda) d\lambda = \frac{A_p A_t \cos \alpha}{R^2} L_t \quad (4.4)$$

– інтегральний потік, що створює об'єкт у межах тілесного кута Ω_o ; L_t – інтегральна яскравість об'єкта без урахування її ослаблення в атмосфері та ОС;

$$k_{Dr} = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_{\lambda t}(\lambda) \tau_A(\lambda) \tau_o(\lambda) R_{Dn}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{\lambda t}(\lambda) d\lambda} \quad (4.5)$$

– коефіцієнт використання ПВ за реальним випромінювачем з урахуванням ослаблення випромінювання атмосферою та ОС.

Другий етап енергетичного розрахунку передбачає безпосереднє визначення дальності дії.

Для того, щоб на виході ТПСС виділити сигнал від об'єкта на фоні шуму, ефективна величина потоку випромінювання від об'єкта має в задане число разів m_d перевищувати ефективну величину порогового потоку ПВ NEP_{eff} :

$$\Phi_{eff} \geq m_d NEP_{eff} \quad (4.6)$$

або

$$\Phi_t k_{Dr} \geq SNR_d NEP \cdot k_{D,tp}, \quad (4.7)$$

де NEP – пороговий потік ПВ за еталонним випромінювачем; $m_d = SNR_d$ – відношення сигнал/шум, яке залежить від ймовірності виявлення об'єкта; $k_{D,tp}$ – коефіцієнт використання ПВ за еталонним випромінювачем, який можна виразити аналогічно (4.5)

$$k_{D,tp} = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_{\lambda,tp}(\lambda) R_{Dn}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{\lambda,tp}(\lambda) d\lambda}, \quad (4.8)$$

де $\Phi_{\lambda,tp}(\lambda)$ – спектральний потік еталонного випромінювача.

Із формули (4.7) знаходимо, що

$$\Phi_t = I_t \Omega_o = I_t \frac{A_p}{R^2} = SNR_d NEP \frac{k_{D,tp}}{k_{Dr}}, \quad (4.9)$$

де I_t – інтегральна сила випромінювання об'єкта.

Пороговий потік у загальному випадку можна подати як

$$NEP = NEP^1 k_{Df}(f), \quad (4.10)$$

де NEP^1 – пороговий потік в одиничній смузі пропускання відео підсилювача на еталонній частоті модуляції $f_{m,tp}$;

$$k_{Df}(f) = \sqrt{\frac{f_{m,tp}}{f_m} \Delta f}, \quad (4.11)$$

де f_m – частота модуляції; Δf – смуга пропускання відео підсилювача.

Із формули (4.9) з урахуванням (4.10) знаходимо, що

$$R_n = \sqrt{\frac{I_t A_p}{SNR_d NEP^1 k_{Df}} \frac{k_{Dr}}{k_{D,tp}}}. \quad (4.12)$$

4.1.2. Розрахунок дальності дії ТПСС у разі спостереження об'єкта на рівномірному фоні

У випадку наявності фону для розрахунку дальності дії ТПСС можна використати формулу (4.12) з деякими уточненнями. Уточнення зумовлені як постійною освітленістю ПВ, так і наявністю деякого рівня фону, на якому має бути виявлено об'єкт.

Наявність постійної освітленості спричиняє погіршення порогової чутливості ПВ, тобто зростання порогового потоку

$$NEP_b = NEP^1 k_{Db}(f), \quad (4.13)$$

де k_{Db} – коефіцієнт, який характеризує збільшення порогового потоку ПВ через постійну фонову освітленість. Як правило, цей коефіцієнт визначають експериментальним шляхом або за паспортними даними ПВ.

Величину постійної освітленості, зумовлену рівномірним фоном, можна розрахувати таким чином. Потік випромінювання фону, який бере участь у формуванні освітленості ПВ, дорівнює

$$\Phi_b = I_b \Omega_o = L_b A_b \frac{A_p}{R^2} = L_b A_p \Omega_s, \quad (4.14)$$

де $I_b = L_b A_b$ – сила випромінювання фону у напрямі ТПСС; L_b – яскравість фону; A_b – площа фону, обмежена полем зору системи; $\Omega_s = \frac{A_b}{R^2}$ – тілесний кут поля зору системи.

За аналогією з виразом (4.3) визначимо ефективний потік випромінювання фону, який надходить до ПВ,

$$\Phi_{b,eff} = k_{Dr,b} \Phi_b = L_b A_p \Omega_s k_{Dr,b}, \quad (4.15)$$

де $k_{Dr,b}$ – коефіцієнт використання потоку випромінювання фону ПВ, який визначається аналогічно до формули (4.3).

За наявності об'єкта в полі зору ТПСС до ПВ надходитиме потік випромінювання у вигляді двох складових: потоку від об'єкта і потоку від тієї частини фону в полі зору, яка не екранується об'єктом.

Ефективну величину потоку випромінювання від об'єкта, який надходить до ПВ і визначається формулою (4.3), запишемо у вигляді

$$\Phi_{t,eff} = k_{Dr,t} \Phi_t. \quad (4.16)$$

Ефективний потік від фону з урахуванням екранування об'єктом визначають як

$$\Phi'_{b,eff} = k_{Dr,b} \Phi_b = L_b A_p k_{Dr,b} (\Omega_s - \Omega_t), \quad (4.17)$$

де $\Omega_t = A_t / R^2$ – тілесний кут об'єкта.

Сумарна величина ефективного потоку випромінювання за наявності об'єкта у полі зору ТПСС становитиме

$$\Phi_{\Sigma,eff} = \Phi_{t,eff} + \Phi'_{b,eff} = k_{Dr,t} \Phi_t + L_b A_p k_{Dr,b} (\Omega_s - \Omega_t). \quad (4.18)$$

При виявленні об'єкта на фоні ТПСС має реагувати не на повний

потік випромінювання від об'єкта $\Phi_{\Sigma,eff}$, а на його перевищення над рівнем потоку випромінювання від фону, тобто

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{eff} &= \Phi_{\Sigma,eff} - \Phi_{b,eff} = k_{Dr,t}\Phi_t + L_b A_p k_{Dr,b}(\Omega_s - \Omega_t) - \\ &- L_b A_p k_{Dr,b}\Omega_s = k_{Dr,t}\Phi_t - k_{Dr,b}L_b A_p \Omega_t. \end{aligned} \quad (4.19)$$

Зробимо заміну в (4.19):

$$\Phi_t = L_t \frac{A_t A_p}{R^2}; \quad \Omega_t = \frac{A_t}{R^2}. \quad (4.20)$$

Тоді

$$\Delta\Phi_{eff} = \frac{A_t A_p}{R^2} (L_t k_{Dr,t} - L_b k_{Dr,b}). \quad (4.21)$$

Останній вираз визначає ефективну величину перевищення випромінювання від об'єкта над рівнем фону, за якої мають розраховуватись основні параметри ТПСС.

З урахуванням (4.13) і (4.21) формула (4.12) набуде вигляду

$$R_n = \sqrt{\frac{A_t A_p (L_t k_{Dr,t} - L_b k_{Dr,b})}{SNR_d NEP^1 k_{Db} k_{Df} k_{D,tp}}}. \quad (4.22)$$

4.2. Синтез оптичної системи ТПСС

У цьому підрозділі розглянемо тільки ті етапи проектування, завдання яких легко вирішити на основі простих аналітичних формул без додаткових обчислювальних засобів.

4.2.1. Забезпечення температурного та просторового розділення

Просторова та температурна роздільні здатності є взаємно пов'язаними. На рис. 4.1 ці характеристики показані для одиночної германієвої лінзи [4]. Як величина просторової роздільної здатності на лівій осі ординат використаний кут $\delta\omega_s$, що розділяється на об'єкті, який зумовлений абераційним зображенням осьової точки якщо $\beta' = 0$. На правій осі ординат показано еквівалентна шуму різницю температур $NETD$, що

визначається рівнянням (3.21), коли лінза фокусує зображення на одно елементний ПВ із кадмій-ртуть-телуру з площею пікселя $V_D \times W_D = 0,15 \times 0,15 \text{ мм}^2$, який працює у спектральному діапазоні від 8 мкм до 12 мкм за еквівалентної шумової смуги пропускання відео підсилювача 1 МГц.

Із рис. 4.1 видно, що характерні параметри ТПСС $NETD < 1 \text{ К}$ та $\delta\omega_s < 1 \text{ мрад}$ не забезпечуються однією германієвою лінзою. Тому такий взаємно-зворотний характер просторового та температурного розділень вимагає шукати компромісні рішення під час вибору параметрів ТПСС.

Виходячи з умови використання ТПСС та доцільності, обирається ПВ, а ОС може бути задана такими параметрами: робочий спектральний діапазон, фокусна відстань, діаметр входної зіниці та мінімальне кутове розділення. В основу синтезу ОС покладено рівняння (3.21) для визначення еквівалентної шуму різниці температур.

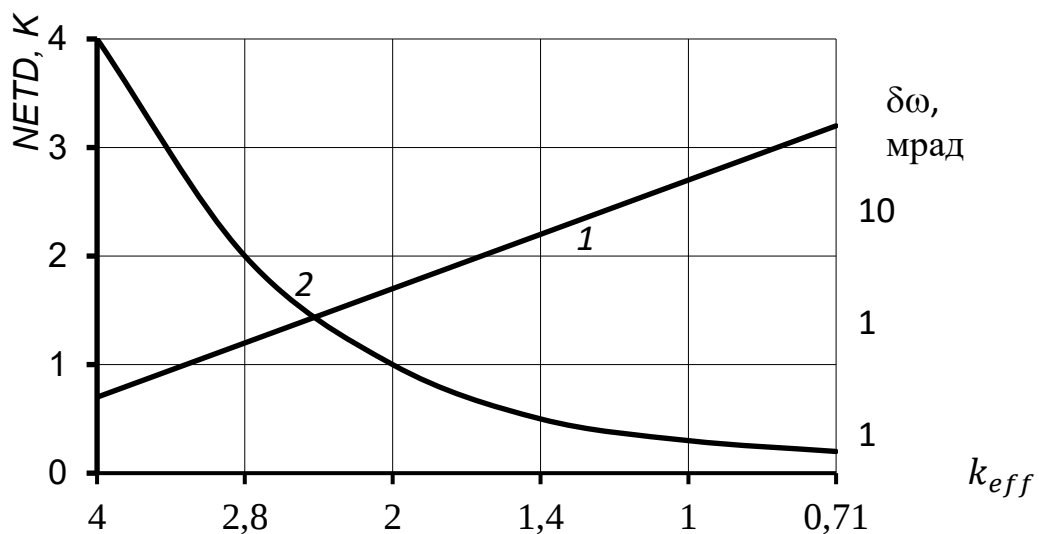


Рис. 4.1. Просторове $\delta\omega$ і температурне $NETD$ розділення ТПСС, що має об'єктив з однієї лінзи «кращого» вигляду із германію: 1 – вплив кружка розсіювання лінзи; 2 – еквівалентна шуму різниця температур $NETD$ (300 К)

Перший етап проектування полягає у виборі оптимального робочого спектрального діапазону на основі критерію максимального температурного розділення:

$$MD = \max \left\{ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \varepsilon_t(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_t)}{\partial T} D^*(\lambda) d\lambda \right\}, \frac{\sqrt{\Gamma_{\Pi}}}{K \cdot \text{см}}. \quad (4.23)$$

При цьому спектральна світність фону не враховується.

Другий етап полягає в перевірці можливостей реалізації потрібної ОС. Усі параметри ОС у формулі (3.21), що впливають на температурну роздільну здатність, об'єднані у коефіцієнти

$$OS = \frac{\tau_o}{k_{eff}^2}. \quad (4.24)$$

З рівнянь (3.21) та (4.24) випливає вимога, яку висувають до ОС

$$OS > \frac{4}{NETD \cdot MD} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}}. \quad (4.25)$$

У табл. 4.1 наведено значення коефіцієнта OS для різних об'єктів, які використовуються в ТПСС. Чим менше ефективне діафрагмове число k_{eff} , тим більше буде коштувати об'єкт. Якщо значення OS не задовольняє умову (4.25), тоді потрібне температурне розділення може бути досягнуте при використанні іншого ПВ з більш високою питомою виявлювальною здатністю, для якої значення MD повинно перераховуватись по-новому.

Третім етапом буде вибір фокусної відстані об'єктива. Для заданого кутового розділення $\delta\omega_s$ має виконуватись умова

$$f'_o \geq \frac{\max\{V_D, W_D\}}{\delta\omega_s (1 - \beta')}. \quad (4.26)$$

Як *четвертий етап* пропонується аналіз технологічних можливостей виготовлення даної ОС. При цьому потрібний діаметр об'єктива оцінюють за формулою

$$D_o \geq f'_o \sqrt{\frac{OS}{\tau_o}}. \quad (4.27)$$

Це співвідношення випливає з (4.24). Середній коефіцієнт пропускання ОС τ_o може бути визначений, виходячи з оптичної схеми об'єктива (лінзовий, дзеркально-лінзовий або дзеркальний). Якщо D_o набуває значень, які технологічно не виконуються, необхідне температурне розділення може бути досягнуте за рахунок вибору іншого ПВ з більш високою виявлювальною здатністю.

Таблиця 4.1

Розроблені інфрачервоні об'єктиви k_{eff}/f'_o з просторовим розділенням M_{o1}/v'_{x1} у точці на осі і параметром OS

Виробник	k_{eff}/f'_o , мм	M_{o1}/v'_{x1} , мм ⁻¹	OS
Research Optical Systems	0,62/75	0,65/10	2,08
Pilkington	0,64/100	0,20/25	1,95
Research Optical Systems	0,68/100	0,75/10	1,73
	0,70/33	0,73/10	1,63
	0,73/51	0,70/10	1,50
Dallmeyer	0,80/50	0,90/5	1,10
	0,95/130	0,65/7,5	1,00
«Qvant», Kyiv	0,85/120	0,5/24	0,97
	1,0/60	0,5/34	0,65
Pilkington	1,3/200	0,35/25	0,47
AGEMA	1,2/65	0,5/13	0,42
Zeiss Jena	1,2/86	0,5/12	0,38

На *n'ятому етапі* уточнюються дані щодо просторового розділення. Для випадку, коли МПФ ОС та ПВ мають однаковий контраст, рівний 0,5, на одній і тій самій просторовій частоті, кутове розділення ТПСС визначають за формулою, мрад:

$$\delta\omega_{0,5} = \frac{1,66V_D}{f'_o}. \quad (4.28)$$

Кутове розділення $\delta\omega_{0,5}$ відповідає ОС з контрастом 0,5. Формула (4.28) отримана у прикладі 3.4.2 [8]. Фокусна відстань і діаметр входної зіниці ОС мають обиратися більшими, ніж граничні, що необхідно для забезпечення температурного розділення у разі зображення позаосьових точок поля зору.

4.2.2. Поле зору

Поле зору ТПСС визначається розміром ПВ, ОС, системою розгортки та телескопічною насадкою (за наявності). Якщо в ТПСС встановлено об'єктив з фокусною відстанню f'_o і МПВ, то поле зору системи розраховують за формулами

$$2\omega_{sx} = 2\arctg \frac{l_{Dx}}{2f'_o}; \quad 2\omega_{sy} = 2\arctg \frac{l_{Dy}}{2f'_o}, \quad (4.29)$$

де $l_{Dx} \times l_{Dy}$ – розмір МПВ.

За наявності оптико-механічної розгортки поле зору визначається параметрами сканування, які залежать від типу розгортки [4]. Якщо плоске дзеркало системи розгортки відхиляється на кут $\pm\omega_{sc}$, то поле зору системи визначають як

$$2\omega_s = 4\omega_{sc}. \quad (4.30)$$

У деяких ТПСС використовують насадку у вигляді телескопа Кеплера, кутове збільшення якого визначається фокусними відстанями компонентів: $\Gamma_{ts} = f'_1 / f'_2$. Тоді ефективне значення фокусної відстані ОС збільшується у Γ_{ts} разів, а поле зору зменшується у Γ_{ts} разів.

4.3. Модель ТПСС з фотонним МПВ

Однією з важливих проблем, яку необхідно розв'язувати під час розробки моделі ТПСС з фотонним МПВ, є неоднорідність чутливих елементів (пікселів) матриці за чутливістю і темновим зарядом. Ця неоднорідність проявляється у вигляді фіксованого просторового шуму, який обмежує якість вихідного зображення нескануючої системи.

4.3.1. Модель сигналу

Для ідеалізованої не скануючої ТПСС кожен елемент розкладення простору об'єктів відображається об'єктивом на відповідний піксель МПВ. У кожному пікселі МПВ генерується заряд, пропорційний кількості фотонів, що надходить від об'єкта. Число фотоелектронів, накопичених у ij -му пікселі за час кадру t_f у першому наближенні визначають за формулою як

$$N_{t,ij} = \frac{\pi\tau_A\tau_o\eta_D t_f A_D \cos \varepsilon_{ij}}{4k_{eff}^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_t(\lambda) L_{\lambda t}(\lambda, T_{ij}) R_{Dn}(\lambda) d\lambda, \quad (4.31)$$

де τ_A – коефіцієнт пропускання атмосфери; τ_o – коефіцієнт пропускання

об'єктива; η_D – максимальне значення квантової ефективності ПВ у робочому спектральному діапазоні $\lambda_1 \dots \lambda_2$; A_D – площа чутливої площадки пікселя; ε_{ij} – кут падіння променів на ij -ий піксель; k_{eff} – діафрагмове число об'єктива; $\varepsilon_t(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт випромінювання поверхні об'єкта; $R_{Dn}(\lambda)$ – відносна спектральна чутливість ПВ; $L_{\lambda t}(\lambda, T_{ij})$ – спектральна яскравість ij -го елемента розкладення об'єкта в одиницях фотон/(с·см³·ср), яка визначається формулою Планка як

$$L_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{2c}{\lambda^4 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}, \frac{\text{фотон}}{\text{с} \cdot \text{см}^3 \cdot \text{ср}}. \quad (4.32)$$

На кожному пікселі матриці крім корисного сигналу накопичується також і темновий заряд, значення якого в загальному випадку змінюється від пікселя до пікселя. Сумарну кількість накопичених в ij -му пікселі електронів визначають як

$$N_{ij} = N_{t,ij} + N_{n,ij}, \quad (4.33)$$

де $N_{n,ij}$ – темновий заряд, який накопичується за час формування кадру.

Електричний сигнал на виході пікселя дорівнює

$$u_{s,ij} = N_{D,ij} R_{D,ij}, \quad (4.34)$$

де $R_{D,ij}$ – електронна чутливість ПВ, мкВ/електрон.

4.3.2. Модель шуму

Фотонні МПВ мають два типи шумів: часовий і просторовий [8]. *Часовий шум* (TN, time noise) проявляється у вихідному зображенні у вигляді «зображень» пікселів, некорельованих від кадру до кадру. TN-шум МПВ можна визначити рівномірним опроміненням матриці і вимірюванням у послідовних кадрах відгуків кожного пікселя. За результатами вимірювань розраховують статистичні та енергетичні параметри шуму кожного окремого пікселя й осереднюють параметри шуму для усієї матриці в цілому.

Дисперсія TN-шуму окремого пікселя визначається часовою дисперсією сумарного числа накопичених електронів

$$\sigma_{tn,ij}^2 = \overline{(N_{ij} - \bar{N}_{ij})^2} = \overline{N_{ij}^2} - \bar{N}_{ij}^2. \quad (4.35)$$

Риска над символами означає усереднення у часі. У загальному випадку дисперсію TN-шуму слід розглядати як суму двох складових

$$\sigma_{tn,ij}^2 = \sigma_{ph,ij}^2 + \sigma_{el,ij}^2, \quad (4.36)$$

де $\sigma_{ph,ij}^2$ – дисперсія TN-шуму, зумовлена флуктуаціями числа падаючих фотонів; $\sigma_{el,ij}^2$ – дисперсія адитивного шуму, зумовлена переносом заряду, підсилювачем та електронікою керування.

Оскільки значення TN-шуму є специфічним для кожного конкретного пікселя, то для узагальненої характеристики TN-шуму матриці використовують його просторове усереднення за усіма пікселями. Тоді середнє значення TN-шуму на виході матриці може бути подане у вигляді

$$\sigma_{Dut}^2 = \overline{\langle (u_{ij} - \bar{u}_{ij})^2 \rangle} = \overline{\langle u_{ij}^2 \rangle} - \langle \bar{u}_{ij}^2 \rangle, \quad (4.37)$$

де кутові дужки означають операцію усереднення TN-шуму по усьому полю матриці.

Просторовий шум (SN, special noise), який іноді називають *геометричним шумом*, проявляється у вигляді довільного образу (паттерна), який постійно видно в зображенні. SN-шум оцінюють як частку середнього за простором значення вихідного сигналу у разі рівномірної освітленості матриці [14]. Цю частку називають неоднорідністю і визначають формулою

$$V_{Ds,ij} = \frac{\sigma_{Dus}}{\langle \bar{u}_{ij} \rangle}. \quad (4.38)$$

Дисперсія результуючого шуму є сумою дисперсій TN-шуму і SN-шуму:

$$\sigma_{Du}^2 = \sigma_{Dut}^2 + \sigma_{Dus}^2. \quad (4.39)$$

Відомі чотири основні джерела SN-шуму [8]: різні нелінійності пікселів; шуми пікселів типу 1/f; матричні шуми типу 1/f; спектральні неоднорідності квантової ефективності. Результуюча дія різних джерел SN-шуму зумовлює неоднорідність чутливості і темнового заряду (зсуву) окремих детекторних каналів. У результаті на вихідному зображенні ТПСС утворюється фіксована картина у вигляді віртуальних світлих і темних ділянок.

Неоднорідність чутливості входить у результуючий SN-шум як множник, тобто як мультиплікативна складова цього шуму. Неоднорідність зсуву впливає на вихідний сигнал матриці як і адитивний TN-шум, але на відміну від останнього, цей шум має кореляційну залежність у часі і просторі. Неоднорідність зсуву входить у результуючий SN-шум як його адитивна складова.

Таким чином, у загальному вигляді паттерн TN-шуму на виході МПВ може бути описаний матрицею коефіцієнтів

$$V_{Ds,ij} = \langle R_D \rangle (\delta R_{D,ij} N_0 + \delta N_{n,ij} \langle N_n \rangle), \quad (4.40)$$

де $\langle R_D \rangle$, $\langle N_n \rangle$ – середнє за матрицею значення чутливості і темнового заряду відповідно; $\delta R_{D,ij}$, $\delta N_{n,ij}$ – відносна неоднорідність чутливості і темнового заряду відповідно; N_0 – рівномірний потік фотонів, що освітлює усі пікселі матриці, рівний середньому значенню потоку фотонів від ділянки спостереження.

Параметри $\langle R_D \rangle$, $\langle N_n \rangle$, $\delta R_{D,ij}$, $\delta N_{n,ij}$ – це паспортні характеристики матриці, які використовують як вихідні дані під час моделювання МПВ.

4.3.3. Відношення сигнал/шум

Критерії оцінки якості зображення були розглянуті у п. 3.1. Більшість із них залежать від відношення сигнал/шум SNR_D на виході ПВ. Тому моделювання ТПСС з МПВ доцільно здійснювати на основі аналізу величини SNR_D на виході ПВ.

Для зображення в цілому відношення сигнал/шум на виході МПВ може бути визначено як

$$SNR_D = \frac{\langle \bar{u}_{ij} \rangle}{\sigma_{Du}}, \quad (4.41)$$

де усереднення сигналу здійснюється як у часі, так і у просторі, а шум розглядається як сума часового і просторового шуму.

З урахуванням допущення, що функція передачі сигналу кожного пікселя має лінійний характер, а число утворених фотоелектронів

визначається законом Пуассона, відношення сигнал/шум на виході МПВ (4.41) можна подати у вигляді

$$SNR_D = \frac{\langle \bar{N}_{ij} \rangle}{\sqrt{\langle \sigma_{n,ij} \rangle^2 + \langle \bar{N}_{ij} \rangle + V_{Ds}^2 \langle \bar{N}_{ij} \rangle^2}}. \quad (4.42)$$

Із (4.42) випливає, що для МПВ існують три енергетичні режими роботи:

1. Режим обмеження темновим TN-шумом. Реалізується у тому випадку, коли TN-шум темнового заряду перевищує інші складові результуючого шуму. Із (4.42) знаходимо, що для цього режиму відношення сигнал/шум лінійно залежить від числа сигнальних електронів $\langle \bar{N}_{ij} \rangle$.

2. Режим обмеження шумом фону. Реалізується тоді, коли число сигнальних електронів $\langle \bar{N}_{ij} \rangle$ перевищує інші складові у знаменнику (4.42). У цьому випадку відношення сигнал/шум є пропорційним $\sqrt{\langle \bar{N}_{ij} \rangle}$.

3. Режим обмеження просторовим шумом. Реалізується у тому випадку, коли в знаменнику (4.42) складова $V_{Ds}^2 \langle \bar{N}_{ij} \rangle^2$ є більшою за інші складові. Тоді відношення сигнал/шум не залежить від $\langle \bar{N}_{ij} \rangle$.

4.4. Приклади проєктування класичних тепловізорів

Приклад 4.4.1. Вибір ПВ ТПСС без урахування його постійної часу відбувається таким чином, щоб вимоги до ОС були по можливості простішими. У зв'язку з цим величина MD з (4.23) максимізується. Розгляньте можливість використання КРТ-приймачів і мікроболометрів з метою отримання тепловізійного зображення у вікнах прозорості атмосфери від 3 мкм до 5 мкм і від 8 мкм до 14 мкм. Середня температура об'єкта спостереження 100 °С.

Розв'язання. 1. Порівняємо обидва приймачі за параметром MD з (4.23):

$$MD = \max \left\{ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \varepsilon_t(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} D^*(\lambda) d\lambda \right\}, \frac{\sqrt{\Gamma_{\Pi}}}{K \cdot \text{см}}.$$

2. Обираємо вихідні параметри у формулі (4.23):

– питома виявлювальна здатність мікроболометрів:

$$D^*(\lambda) = D_{th}^* = 10^8 \text{ см}\sqrt{\Gamma_{\Pi}}/\text{ВТ},$$

питома виявлювальна здатність КРТ-приймачів;

$$D^*(\lambda_2 = 5/12 \text{ мкм}) = 2 \cdot 10^{10} \text{ см}\sqrt{\Gamma_{\Pi}}/\text{ВТ};$$

– середній коефіцієнт пропускання атмосфери $\tau_{A3}^5 = \tau_{A8}^{12} = \tau_A$;

– коефіцієнт випромінювання об'єкта $\varepsilon_{t3}^5 = \varepsilon_{t8}^{12} = \varepsilon_t$.

3. Розраховуємо параметр MD , використовуючи табл. 4.2.

Для мікроболометрів

$$MD = \tau_A \varepsilon_t D_{th}^* \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_{\lambda}}{\partial T} d\lambda,$$

або

$$Z_{p3}^5 = \frac{MD}{\tau_A \varepsilon_t} = 10^8 \cdot 123 \cdot 10^{-6} = 1,23 \cdot 10^4 \frac{\sqrt{\Gamma_{\Pi}}}{\text{К} \cdot \text{см}};$$

$$Z_{p8}^{12} = \frac{MD}{\tau_A \varepsilon_t} = 10^8 \cdot 346 \cdot 10^{-6} = 3,46 \cdot 10^4 \frac{\sqrt{\Gamma_{\Pi}}}{\text{К} \cdot \text{см}}.$$

Для КРТ-приймача з прикладу (3.2.3) маємо

$$MD = \tau_A \varepsilon_t \frac{D^*(\lambda_2) c_2}{T^2 \lambda_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda}(\lambda, T) d\lambda,$$

або

$$Z_{Hg3}^5 = \frac{MD}{\tau_A \varepsilon_t} = \frac{2 \cdot 10^{10} \cdot 14388}{373^2 \cdot 5} \cdot 5,09 \cdot 10^{-3} = 1,81 \cdot 10^6 \frac{\sqrt{\Gamma_{\Pi}}}{\text{К} \cdot \text{см}};$$

$$Z_{Hg8}^{12} = \frac{MD}{\tau_A \varepsilon_t} = \frac{2 \cdot 10^{10} \cdot 14388}{373^2 \cdot 12} \cdot 31,9 \cdot 10^{-3} = 5,5 \cdot 10^6 \frac{\sqrt{\Gamma_{\Pi}}}{\text{К} \cdot \text{см}}.$$

4. Порівняння.

У зв'язку з високою виявлювальною здатністю фотонні ПВ мають параметр MD на 2 порядки вищий, ніж мікроболометрів. Проте під час вибору того чи іншого ПВ необхідно враховувати їх вартість та складність системи охолодження, а також час інтегрування (накопичення), що особливо важливо для МПВ.

Таблиця 4.2

Інтегральна та диференціальна енергетичні світності АЧТ [8]

$M_{\lambda_1}^{\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda}(\lambda, T) d\lambda, \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$								
Діапазон $\lambda_1 \dots \lambda_2$, мкм	Температура T , К							
	270	280	290	300	310	373	500	750
3...5	0,175	0,270	0,403	0,585	0,833	5,09	52,6	580
8...12	7,03	8,35	10,2	12,1	14,2	31,9	91,1	273
8...13	8,78	10,6	12,6	14,8	17,2	37,8	105	307
8...14	10,4	12,5	14,7	17,3	20,0	42,9	116	334
0...∞	30,1	34,8	40,1	45,9	52,4	110	354	1793

$I_2 = \frac{\partial M_{\lambda_1}^{\lambda_2}}{\partial T} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_{\lambda}(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda, \text{ мкВт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$								
Діапазон $\lambda_1 \dots \lambda_2$, мкм	Температура T , К							
	270	280	290	300	310	373	500	750
3...5	7,79	11,2	15,6	21,3	28,4	123	738	3822
8...12	141	159	178	198	218	346	574	848
8...13	169	190	211	233	256	397	644	936
8...14	193	216	239	263	287	439	699	1003
0...∞	446	498	553	612	675	1176	2834	9565

$I_3 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda M_{\lambda}(\lambda, T) d\lambda, \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мкм}$								
Діапазон $\lambda_1 \dots \lambda_2$, мкм	Температура T , К							
	270	280	290	300	310	373	500	750
3...5	0,795	1,21	1,80	2,61	3,70	22,1	220	2318
8...12	70,7	85,6	102	121	141	315	888	2632
8...13	92,6	111		132	180	389	1057	3053
8...14	115	136	161	188	217	457	1209	3412

Приклад 4.3.2. Тепловізор PROBEYE TVS-200 фірми AVIO має ПВ у вигляді 10-елементної лінійки із InSb, який працює у спектральному діапазоні від 3 мкм до 5,4 мкм і охолоджується холодильником Джоуля–

Томсона. Розмір чутливої площадки 80×80 мкм². Розгортка зображення здійснюється десятигранним дзеркальним барабаном із змінним нахилом граней як у горизонтальному, так і у вертикальному напрямках, забезпечуючи при цьому 155×100 елементів розкладення. Частота кадрів 25 Гц. Які фокусну відстань, діаметр вхідної зіниці і роздільну здатність повинен мати об'єктив, якщо відстань від тепловізора до об'єкта розміром 22×22 см² становить 100 м? Тепловізор забезпечує температурну роздільну здатність 0,1 К за температури об'єкта 330 К.

Розв'язання. 1. Система розгортки визначає ефективну шумову смугу згідно з (1.13)

$$\Delta f = \frac{2\omega_x 2\omega_y f_f}{2q_D \alpha_D \beta_D \eta_{sc}},$$

де $\frac{2\omega_{ox} 2\omega_{oy}}{\alpha_D \beta_D} = 155 \times 100$; $q_D = 10$. Розгортки з дзеркальним барабаном мають досить високу ефективність. Нехай $\eta_{sc} = 0,76$. Шумова смуга при цьому дорівнює 25,5 кГц.

2. Вимоги до об'єктива знайдемо із формул (4.23) – (4.29). Передусім потрібно визначити величину MD (див. приклад 4.3.1 для фотонного приймача). Типова величина для ПВ із InSb

$D^*(\lambda_2 = 5,4 \text{ мкм}) = 7 \cdot 10^{10} \text{ см} \sqrt{\text{Гц}}/\text{Вт}$. Звідси знаходимо величину MD :

$$MD = \tau_A \varepsilon_t \frac{c_2 D^*(\lambda_2)}{\lambda_2 T^2} \int_3^{5,4} M_\lambda(\lambda, T) d\lambda = 3,06 \cdot 10^6 \frac{\sqrt{\text{Гц}}}{\text{К} \cdot \text{см}}$$

за $\tau_A = \varepsilon_t = 1$ для температури об'єкта 57 °С.

3. Для забезпечення заданого температурного розділення $\delta T = 0,1$ К має виконуватись умова

$$OS > \frac{4}{\delta T \cdot MD} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}} = \frac{4}{0,1 \cdot 3,06 \cdot 10^6} \sqrt{\frac{25500}{80 \cdot 80 \cdot 10^{-8}}} = 0,26.$$

Найменша фокусна відстань визначається згідно розміром чутливої площадки ПВ $V_D = 80$ мкм та кутовим розділенням $\delta\omega = 22/10^4 = 2,2$ мрад: $f'_o \geq 36,5$ мм. Відповідно до проспекту вона дорівнює 38 мм. Діаметр вхідної зіниці знаходимо за формулою (4.27) за умови, що $\tau_o = 0,85$.

$$D_o \geq f'_o \sqrt{\frac{OS}{\tau_o}} = 21 \text{ см.}$$

Кутове розділення при контрасті 0,5 знаходимо за формулою (4.28): $\delta\omega_{0,5} = 3,5$ мрад. Це розділення визначено для простору об'єктів.

4. Кутове поле зору визначається параметрами розгортки зображення: $V = 0,22 \cdot 155 = 34,1$ м, $W = 0,22 \cdot 100 = 22$ м. Тоді

$$2\omega_o = 2\arctg \sqrt{\frac{34,1^2 + 22^2}{4 \cdot 100^2}} \approx 23^\circ.$$

4.5. Методи розрахунку максимальної дальності виявлення і розпізнавання ТПСС

Як відмічалось раніше, ТПСС призначені для виявлення та розпізнавання об'єктів на граничній дальності. Тому основними характеристиками ТПСС є МДВ R_d і МДР R_r .

Під час проєктування ТПСС використовують два підходи:

- визначають ймовірність виявлення P_d і ймовірність розпізнавання P_r за заданої дальності R до об'єкта;
- визначають МДВ R_d і МДР R_r у разі заданої ймовірності P_d і P_r .

Другий підхід є більш ефективним, оскільки дозволяє безпосередньо визначати (аналізувати) дальність дії ТПСС.

У цьому підрозділі розглянуто і проаналізовано різні методи розрахунку максимальної дальності дії (МДД) ТПСС.

4.5.1. Стандарт НАТО для розрахунку максимальної дальності дії ТПСС

У 1995 році організація Північноатлантичної Договору (НАТО) прийняла угоду 4347 про стандартизацію для сухопутних сил «Визначення номінальних характеристик статичної дальності для систем інфрачервоного спостереження» [9]. У стандарті НАТО 4347 визначено статичні

характеристики дальності дії ТПСС у разі відсутності пошуку, коли об'єкт знаходиться в полі зору системи, а оператор має необмежений час для виявлення об'єкта. Стандарт стосується тільки тих ТПСС, які відповідають характеристикам мінімально роздільної різниці температур $MRTD$ і застосовується для наземних цілей. Використовуються спектральні діапазони від 3 мкм до 5 мкм, від 8 мкм до 14 мкм або частина цих діапазонів.

Країни, що беруть участь в угоді за стандартом 4347, дали згоду використовувати такі визначення дальності дії:

- номінальна статична дальність виявлення, км;
- номінальна статична дальність розпізнавання, км;
- номінальна статична дальність ідентифікації, км.

Для кожної дальності слід указувати умови пропускання атмосфери (хороші чи обмежені), поле зору системи (у градусах або мілірадіанах), а також спосіб отримання МРРТ (вимірювання або розрахунок). Залежно від типу системи може застосовуватись одна або дві з наведених вище видів дальності.

Номінальні значення статичної дальності для ТПСС визначаються на основі усередненої $MRTD$ і за таких умов:

- розмір об'єкта – $V_t \times W_t = 2,3 \times 2,3 \text{ м}^2$;
- температурний контраст між об'єктом і заднім фоном (відносно температури АЧТ в 288 К) – $\Delta T_o = 2 \text{ К}$;
- коефіцієнт пропускання атмосфери в межах робочого спектрального діапазону визначається законом Бугера (2.20):

$$\tau_A(R) = \exp(-\kappa_A R), \quad (4.43)$$

де R – дальність, км; $\kappa_A = 0,2 \text{ км}^{-1}$ – показник ослаблення для сприятливих умов пропускання атмосфери; $\kappa_A = 1,0 \text{ км}^{-1}$ – показник ослаблення для обмежених умов пропускання атмосфери;

- критерії розділення для ймовірності 50 %:
- виявлення – 1 лінійна пара/об'єкт;
- розпізнавання – 3 лінійні пари/об'єкт;
- ідентифікація – 6 лінійних пар/об'єкт.

Зміна початкового температурного контрасту ΔT_o між об'єктом і

заднім фоном унаслідок ослаблення випромінювання в атмосфері враховується як

$$\Delta T(R) = \Delta T_o \exp(-\kappa_A R). \quad (4.44)$$

Для врахування експонентного зменшення коефіцієнта пропускання атмосфери на графіку $\ln[\Delta T(R)]$ наносять дві похилі лінії для різних коефіцієнтів ослаблення. Відповідні номінальні статичні відстані містяться на перетинанні графіків $\ln[\Delta T(R)]$ і відповідних функцій $\ln[MRTD(\nu_x)]$.

Стандарт НАТО 4347 досить чітко і відносно просто визначає дальність дії ТПСС, однак у ньому не визначена процедура одержання функції $MRTD(\nu_x)$. Це було головною причиною, наприклад, що змусила Данію не ратифікувати цей стандарт.

На сучасному етапі розвитку оптико-електронного приладобудування дуже важливо, щоб створювані нові прилади і системи відповідали міжнародним стандартам. У зв'язку з цим автори пропонують як МДД ТПСС використовувати розв'язок рівняння

$$\Delta T_o \exp(-\kappa_A R) = MRTD(\nu_x). \quad (4.45)$$

Це рівняння ґрунтується на стандарті НАТО 4347 і методу розрахунку МДД ТПСС, запропонованому у підручнику [8]. У рівнянні (4.45) просторову частоту ν_x визначають відповідно до стандарту НАТО 4347 у такий спосіб:

- для розрахунку МДВ цілі R_d , мрад⁻¹:

$$\nu_{xd} = \frac{R_d}{V_t}; \quad (4.46)$$

- для розрахунку МДР цілі R_r , мрад⁻¹:

$$\nu_{xr} = \frac{3R_r}{V_t}; \quad (4.47)$$

- для розрахунку максимальної дальності ідентифікації R_i , мрад⁻¹:

$$\nu_{xi} = \frac{6R_i}{V_t}, \quad (4.48)$$

де V_t – критичний (найменший) розмір цілі. При цьому функція $MRTD(\nu_x)$

може бути розрахована за формулою (3.33). Після підстановки (3.33) в (4.45) отримаємо рівняння для розрахунку МДД ТПСС

$$\Delta T_0 \exp(-\kappa_A R) = 0,66 SNR_r NETD \frac{\Gamma_s \nu_x}{M_s(\nu_x)} \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f t_o f_f t_E}}. \quad (4.49)$$

4.5.2. Загальне рівняння для розрахунку максимальної дальності дії ТПСС

Рівняння (4.49) для розрахунку МДД ТПСС має кілька істотних недоліків:

1) просторові частоти, зумовлені співвідношеннями (4.46) – (4.44), справедливі тільки для 50 %-ої ймовірності виявлення, розпізнавання та ідентифікації відповідно;

2) відношення сигнал/шум SNR_r є функцією ймовірності виявлення штриха еквівалентної міри Фуко.

У зв'язку з цим застосування рівняння (4.49) обмежене тільки 50 %-ю ймовірністю.

Для растрового зображення в монографії [2] запропоновано емпіричну формулу для обчислення ймовірності розпізнавання об'єкта

$$P_r = 1 - \exp\left[-0,018(N_l + 1)^2\right], \quad (4.50)$$

де N_l – число рядків (елементів розкладення) уздовж критичного розміру об'єкта. З формули (4.50) легко визначити кількість рядків, що відповідає заданій ймовірності розпізнавання

$$N_l = 7,45 \sqrt{-\ln(1 - P_r)} - 1. \quad (4.51)$$

Наприклад, для ймовірності розпізнавання $P_r = 50\%$ число рядків становить $N_l = 6$ або три пари ліній/об'єкт, що відповідає стандарту НАТО 4347. Для ймовірності розпізнавання $P_r = 90\%$ число рядків $N_l = 10$. Відповідно до стандарту НАТО 4347 для виявлення цілі потрібна одна пара рядків на критичний розмір об'єкта, тобто $N_l = 2$. Тоді з формули (4.50) випливає, що виявлення цілі відповідає її розпізнаванню з ймовірністю $P_r = 15\%$.

Просторова частота тест-об'єкта, що відповідає ймовірності

розпізнавання P_r , становить

$$v_{xr} = \frac{N_l R_r}{2V_t} = \frac{R_r}{2V_t} \left[7,45 \sqrt{-\ln(1 - P_r)} - 1 \right], \quad (4.52)$$

де $V_t = l_{cr}$ – критичний розмір об'єкта.

Одержимо формулу для розрахунку $MRTD(v_x)$, що враховувала б залежність просторової частоти розпізнавання v_{xr} і відношення сигнал/шум SNR_r від ймовірності розпізнавання P_r . Для цього визначимо з формули (3.33) температурний контраст тест-об'єкта як

$$\Delta T = MRTD(v_x) = \frac{0,466 SNR(P_r) NETD}{M_s(v_x)} \sqrt{\frac{k_{\Delta f} \beta_D}{f_f t_E \omega_{tp}}}. \quad (4.53)$$

З урахуванням співвідношень

$$k_{\Delta f} = \frac{v_x \alpha_D}{t_o \Delta f} \text{ і } \omega_{tp} = \frac{1}{2v_x}, \quad (4.54)$$

отриманих раніше в п. 3.2.4 формулу (4.49) перепишемо у вигляді

$$MRTD(v_x) = \frac{0,66 SNR(P_r) NETD v_x}{M_s(v_x)} \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f t_o f_f t_E}}. \quad (4.55)$$

Після підстановки (3.21) в (4.55) отримаємо

$$MRTD(v_x) = \frac{0,66 SNR(P_r) v_x}{M_s(v_x)} \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{A_D t_o f_f t_E}} \frac{4k_{eff}^2}{\tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda}. \quad (4.56)$$

Із рис. 3.3 випливає, що для об'єктів, що перебувають на великій відстані від ТПСС ($R \gg f'_o$), справедливе співвідношення

$$4k_{eff}^2 = \frac{\pi A_D}{A_p A_t} R^2, \quad (4.57)$$

де A_p – площа вхідної зіниці об'єктива.

З урахуванням співвідношення (4.57) рівняння (4.55) запишемо у вигляді

$$MRTD(v_x) = \frac{0,66 SNR(P_r) v_x}{M_s(v_x)} \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{A_D t_o f_f t_E}} \frac{\pi A_D R^2}{A_p A_t} \frac{1}{\tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda}. \quad (4.58)$$

Підставимо тепер (4.58) у вихідне рівняння (4.55) з урахуванням (4.51) і подамо його у вигляді

$$\frac{R_r^3 \exp(\kappa_A R_r)}{M_s(v_{xr})} = \frac{0,965 \Delta T_0 V_t A_p A_t \tau_o}{\text{SNR}(P_r) \left[7,45 \sqrt{-\ln(1-P_r)} - 1 \right]} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{t_o f_f t_E}{A_D \alpha_D \beta_D}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda. \quad (4.59)$$

Отримане рівняння (4.59) дозволяє розрахувати МДР об'єкта із заданою ймовірністю P_r . Права частина цього рівняння не залежить від дальності розпізнавання і має стале значення, що спрощує розв'язання цього рівняння.

4.5.3. Розрахунок максимальної дальності розпізнавання ТПСС, обмежених контрастом і шумами

Для розпізнавання об'єкта необхідно, щоб уздовж його критичного розміру l_{cr} розміщувалось N_r пар штрихів, тобто

$$l_{cr} = 2N_r \delta V, \quad (4.60)$$

де N_r визначається конкретним критерієм розпізнавання.

Для двовимірної моделі зображення, в якій інформація про об'єкт спостереження зосереджена по усій площі об'єкта, критичний розмір розраховують за формулою

$$l_{cr} = \sqrt{V_t W_t}. \quad (4.61)$$

Згідно з критерієм Джонсона для розпізнавання об'єктів військового призначення потрібно, щоб $N_r = 4 \pm 1$. Цей критерій був розроблений для систем з великим відношенням сигнал/шум, які створюють безрастрове зображення та обмежені контрастом. Отже критерій Джонсона буде справедливим тільки для контрастно обмежених систем.

Роселл і Вільсон продовжили роботи Джонсона з розпізнавання об'єктів для ТПСС, обмежених шумами [2]. Для оцінки ефективності таких систем було введено мінімальну роздільну різницю температур $MRTD$, яка є пороговим значенням відношення сигнал/шум як функція просторової частоти.

Вплив атмосфери на розпізнавання об'єктів будемо враховувати у вигляді зменшення температурного контрасту згідно із законом Бугера-Ламберта (4.44).

Розглянемо дві методики розрахунку МДР для ТПСС, обмежені контрастом і шумами.

4.5.3.1. Контрастно обмежені системи

Для визначення МДР використаємо критерій Джонсона (4.60) і МПФ ТПСС у вигляді (3.14). Ймовірність розпізнавання і час виконання задачі спостереження залежать від смуги пропускання просторових частот ТПСС. Ця смуга пропускання $\Delta\nu_x \approx \nu_{x,\max}$ визначається в точці перетину МПФ системи і порогового контрасту зорової системи оператора. Для апроксимації порогового контрасту зорової системи скористаємося функцією (2.82). Тоді рівняння для визначення максимальної просторової частоти $\nu_{x,\max}$, яку пропускає контрастно обмежена система, має вигляд

$$M_s(\nu_x) = C_{E,th}(\nu_x), \quad (4.62)$$

де МПФ ТПСС $M_s(\nu_x)$ визначається функцією (4.15), а пороговий контраст зорової системи $C_{E,th}(\nu_x)$ – функцією (2.82).

З іншого боку, просторову частоту у просторі «дисплей – оператор», виражену в кутових одиницях, визначають з урахуванням (4.60) як

$$\nu_{x,\max} = \frac{R_r}{2\delta V |\Gamma_s|} = \frac{N_r R_r}{l_{cr} |\Gamma_s|}, \quad (4.63)$$

де $|\Gamma_s|$ – кутове збільшення ТПСС.

Звідси

$$R_r = \frac{\nu_{x,\max} l_{cr} |\Gamma_s|}{N_r}. \quad (4.64)$$

Число пар штрихів N_r , що розміщуються у критичному розмірі l_{cr} , для просторової частоти $\nu_{x,\max}$ визначається як

$$N_r = \frac{\nu_{x,\max} l_{cr} |\Gamma_s|}{R_r}. \quad (4.65)$$

Для визначення числа N_r у роботі [15] використана залежність ймовірності розпізнавання P_r від N_r у вигляді

$$P_r = \frac{(N_r / N_D)^k}{1 + (N_r / N_D)^k}, \quad (4.66)$$

де $k = 2,7 + 0,7(N_r / N_D)$; N_D – число пар штрихів згідно з критерієм Джонсона, який забезпечує ймовірність розпізнавання $P_r = 50 \%$.

4.5.3.2. Системи, обмежені шумом

Модель на основі системи, обмеженої шумом, широко застосовують у дослідженні ТПСС військового призначення [15]. Для визначення МДР використаємо критерій Джонсона (4.60) і мінімальну роздільну різницю температур, яку описують функцією (3.33), де просторова частота визначається в кутових одиницях у просторі об'єктів $v_x = N_r R / l_{cr}$.

Рівняння для розрахунку МРД ґрунтується на законі Бугера-Ламберта (4.45):

$$\begin{aligned} \Delta T_0 \cdot \exp(-\kappa_A R) &= MRTD \left(v_x = \frac{N_r R}{l_{cr}} \right) = \\ &= 0,66 SNR_E NETD \frac{N_r R}{l_{cr}} \frac{1}{M_s \left(\frac{N_r R}{l_{cr}} \right)} \sqrt{\frac{2\alpha_D \beta_D}{f_f t_E}}. \end{aligned} \quad (4.67)$$

Величина відношення сигнал/шум SNR_E , що сприймає оператор, визначає ймовірність розпізнавання зображення об'єкта P_r . Вона може бути розрахована за формулою [15]

$$P_r = \frac{(SNR_E)^k}{1 + (SNR_E)^k}, \quad (4.68)$$

де $k = 2,7 + 0,7 SNR_E$.

Формули (4.66) і (4.68) мають однакову функціональну залежність. На рис. 4.2 зображено залежність ймовірності розпізнавання від відношення сигнал/шум SNR_E (або від числа N_r / N_D), а в табл. 4.3 наведено числові значення функції (4.66) (або функції (4.68)).

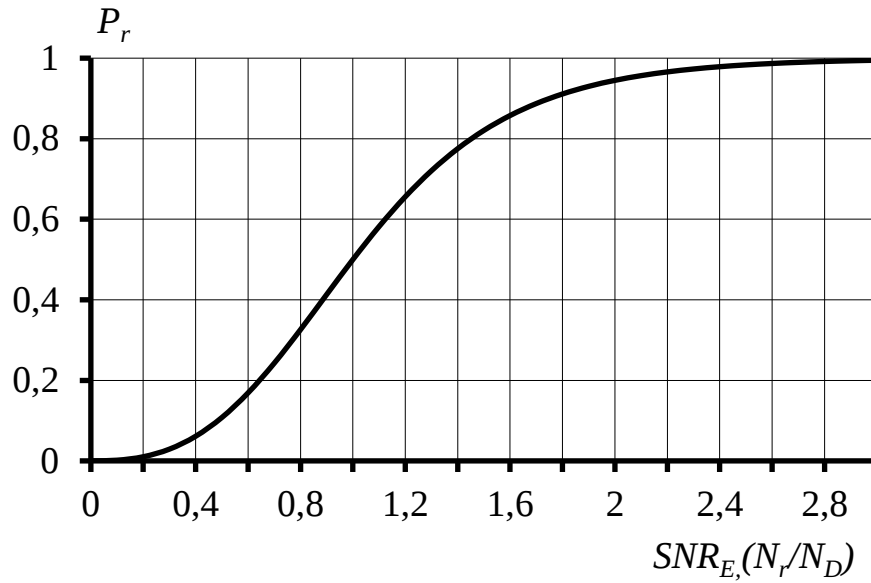


Рис. 4.2. Залежність ймовірності розпізнавання P_r від відношення сигнал/шум SNR_E (або від числа N_r / N_D)

Таблиця 4.3

**Залежність ймовірності розпізнавання P_r
від відношення сигнал/шум SNR_E (або від числа N_r / N_D)**

SNR_E (N_r / N_D)	P_r	SNR_E (N_r / N_D)	P_r	SNR_E (N_r / N_D)	P_r
0	0,000	1,0	0,500	2,0	0,945
0,1	0,002	1,1	0,582	2,1	0,957
0,2	0,010	1,2	0,656	2,2	0,966
0,3	0,029	1,3	0,721	2,3	0,973
0,4	0,061	1,4	0,776	2,4	0,979
0,5	0,108	1,5	0,821	2,5	0,983
0,6	0,169	1,6	0,858	2,6	0,987
0,7	0,243	1,7	0,887	2,7	0,990
0,8	0,326	1,8	0,911	2,8	0,992
0,9	0,413	1,9	0,930	2,9	0,994

У загальному випадку ймовірність розпізнавання об'єкта з урахуванням числа штрихів N_r і відношення сигнал/шум SNR_E може бути записана у вигляді

$$P_r = P_{r,N} P_{r,SNR}, \quad (4.69)$$

де $P_{r,N}$ – ймовірність, що розраховується за формулою (4.66), а $P_{r,SNR}$ – за формулою (4.68).

Максимальна дальність розпізнавання є розв'язком рівняння (4.69), в якому відношення сигнал/шум SNR_E розраховують за формулою (4.68), а число штрихів N_r – за формулою (4.66) у разі заданої ймовірності розпізнавання P_r .

4.5.4. Метод розрахунку граничної МДР

Отримані рівняння (4.64) і (4.67) дозволяють розрахувати МДР для контрастно обмежених систем і систем, що обмежені шумами, відповідно.

Розглянемо метод розрахунку граничної МДР для ТПСС, в якій використано мікроболометричний МПВ U3000 фірми Boeing, який має такі параметри: розмір пікселя $V_D \times W_D = 51 \times 51$ мкм²; формат кадру $p_D \times q_D = 320 \times 240$.

ТПСС використовує об'єктив, який має такі параметри: фокусну відстань $f'_o = 60$ мм; діафрагмове число $k_o = 1$; інтегральний коефіцієнт пропускання $\tau_o = 0,85$. Частота кадрів $f_f = 50$ Гц. Дисплей має розміри екрана $V_S \times W_S = 8 \times 6$ см², а оператор перебуває на відстані $R_{SE} = 25$ см від екрана.

ТПСС спостерігає об'єкт розміром $V_t \times W_t = 2,3 \times 2,3$ м², розташований на рівномірному фоні з ефективною температурою $T_b = 288$ К і має температурний контраст $\Delta T = 2$ К. Коефіцієнт ослаблення атмосфери $\kappa_A = 0,2$ км⁻¹. Ймовірність розпізнавання об'єкта $P_r = 0,9$.

Вихідним для розрахунку МДР контрастно обмеженої системи є рівняння (4.66), в якому кутову просторову частоту ν_x визначають у просторі «дисплей – оператор». МДР є розв'язком рівняння (4.69), в якому відношення сигнал/шум SNR_E розраховують за формулою (4.68), а число штрихів N_r – за формулою (4.66) за заданої ймовірності розпізнавання P_r .

Використаємо результати прикладу 3.2.2, згідно яких ТПСС має кружок розсіювання $r_s=0,24$ мрад, кутове збільшення $\Gamma_s=1,2^\times$ і максимальну просторову частоту $=1,47$ мрад⁻¹.

МДР розраховуватимемо за формулою (4.64), де кількість штрихів уздовж критичного розміру об'єкта знаходимо із табл. 4.3 для ймовірності розпізнавання $P_r = 0,9$: $N_r / N_D = 1,75$. Звідки $N_r = 7$.

Тоді

$$R_r = \frac{1,46 \cdot 10^3 \cdot 2,3 \cdot 1,2}{7} = 580 \text{ м.}$$

При розрахунку МДР систем, обмежених шумом, як базове використовуємо рівняння (4.67). В ньому для ТПСС відомими є: $\Delta T_0 = 2$ К, $\kappa_A = 0,2$ км⁻¹, $NETD = 0,08$ К, $N_r = 7$, $l_{cr} = 2,3$ м, $\alpha_D \beta_D = 0,72$ мрад², $f_f = 50$ Гц, $t_E = 0,2$ с.

Відношення сигнал/шум SNR_E , що сприймає оператор, знаходимо із табл. 4.3: якщо $P_r = 0,9$, то $SNR_E = 1,75$.

МПФ ТПСС у просторі об'єктів спостереження визначаємо функцією

$$M_s \left(v_x = \frac{N_r R}{l_{cr}} \right) = \exp \left[-2\pi^2 r_s^2 \left(\frac{N_r R}{l_{cr}} \right)^2 \right] = \exp(-5,16 R^2),$$

де R – дальність, км.

Підставимо вихідні дані в рівняння (4.67):

$$2 \exp(-0,2R) = 0,66 \cdot 1,75 \cdot 0,08 \frac{7R}{2,3} \frac{1}{\exp(-5,16R^2)} \sqrt{\frac{2 \cdot 0,36}{50 \cdot 0,2}}.$$

Після обчислень отримаємо трансцендентне рівняння, км⁻¹:

$$\frac{1}{R} \exp(-5,16R^2 - 0,2R) = 0,0377.$$

Розв'язком цього рівняння є МДР $R_r = 800$ м.

Виконаємо аналіз отриманих числових значень МДР ТПСС для контрастно обмеженої системи $R_r = 580$ м і для системи, що обмежена шумами $R_r = 800$ м. Менша із них $R_r = 580$ м і визначає реальну МДР. Це означає, що ТПСС працює в режимі контрастно обмеженої системи. При

цьому доречно уточнити реальну ймовірність розпізнавання за формулою (4.69).

Розглянемо залежність МДР від розмірів об'єкта $V_t = W_t = l_{cr}$ за умови збереження незмінними інших параметрів у формулі (4.63). Залежність $R_r(l_{cr})$ для контрастно обмежених систем зображена на рис. 4.3. Аналіз цієї залежності свідчить: якщо розмір об'єкта становить від 0 до 3,2 м, ТПСС працює як контрастно обмежена система, а якщо $l_{cr} > 3,2$ м – працює в режимі обмеження шумами. Потрібно також враховувати незначне збільшення МДР для системи, що працює в режимі обмеження шумами. Це видно з рівняння (4.67).

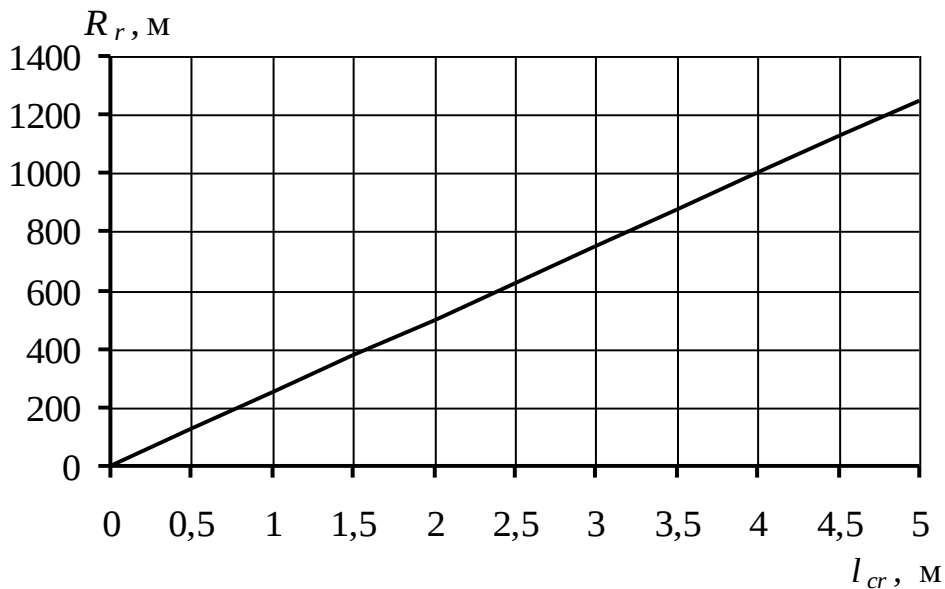


Рис. 4.3. Залежність МДР від розміру об'єкта спостереження

Розглянемо тепер залежність МДР від температурного контрасту між об'єктом і фоном $\Delta T_0 = T_t - T_b$ за умови збереження незмінними інших параметрів у рівнянні (4.67). Залежність $R_r(\Delta T_0)$ для системи, обмеженої шумами, зображено на рис. 4.4. Проаналізувавши цю залежність, побачимо: якщо температурний контраст становить від 0 до 0,25 К, ТПСС працює в режимі обмеження шумами, а якщо $\Delta T_0 > 0,25$ К – працює як контрастно обмежена система.

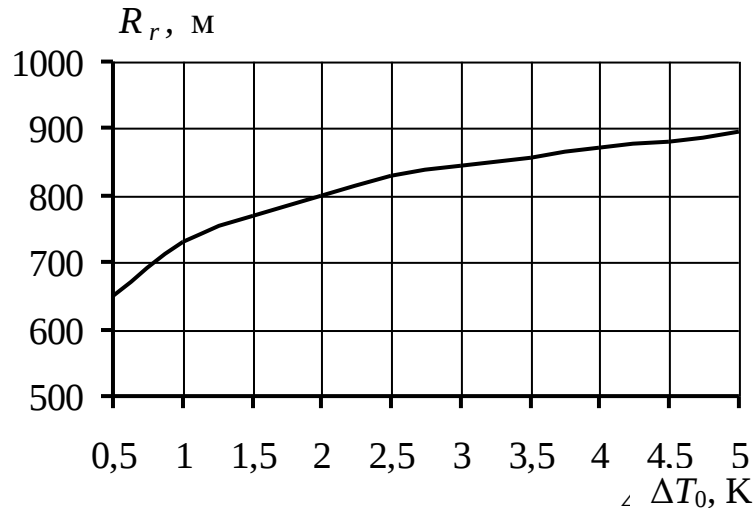


Рис. 4.4. Залежність МДР від температурного контрасту об'єкта спостереження

Таким чином, залежно від умов спостереження ТПСС може працювати або в режимі обмеження шумами, або як контрастно обмежена система. Для визначення МДР потрібно розглядати роботу ТПСС як контрастно обмежену і як систему, обмежену шумами. Менша із отриманих МДР і визначає реальну дальність. Для збільшення МДР потрібно підвищувати просторову і енергетичну роздільну здатність окремих елементів ТПСС.

4.5.5. Ймовірність розрізнення цілі контрастно обмеженою тепловізійною системою безпілотного літального апарату

4.5.5.1. Особливості ТПСС для дронів

З початку двадцять першого століття тепловізори знайшли широке застосування в аерокосмічній промисловості [16–18]. Більшість сучасних безпілотних літальних апаратів (БПЛА, дронів) оснащені тепловізійними камерами, що дозволяє їх використання цілодобово в складних погодних умовах [1, 17]. Дрони також масово застосовуються у військовій справі, в першу чергу для ведення повітряної розвідки – як тактичної, так і стратегічної, а також для нанесення вогневих ударів по наземним цілям [16, 17]. Основними споживчими характеристиками таких ТПСС є просторове і

температурне розділення, максимальні дальності виявлення і розпізнавання цілі, або відповідні ймовірності [8, 9]. Ці характеристики обмежені просторовим або енергетичним розділенням [8]. Дослідженню ТПСС, основними компонентами яких є об'єкти і приймач випромінювання, присвячено значну кількість наукових праць [19 - 23]. В той же час практично відсутні дослідження по розробці методів і алгоритмів визначення ймовірності виконання поставленого завдання по розрізненню цілей (виявленню, розпізнаванню і ідентифікації) в залежності від дальності до цілі. Ці ймовірності обмежені контрастом зображення або шумами ТПСС. В основі цих складних методів лежить розрахунок відношення сигнал/шум на виході МПВ з урахуванням характеристик об'єкта спостереження, відстані між ціллю і тепловізором, а також температурної чутливості ТПСС і законів зорового сприйняття [7, 8, 9]. Однак, ці методи не дозволяють оперативно розрахувати ймовірності виявлення, розпізнавання або ідентифікації цілі для довільно заданій відстані до цілі.

Метою цього підрозділу є розробка більш досконалих методу і алгоритму розрахунку ймовірності виявлення, розпізнавання і ідентифікації об'єкта (цілі) ТПСС на заданій відстані до цілі, на основі критерію Джонсона і порогового контрасту сприйняття оператором зображення на екрані дисплея.

4.5.5.2. Контрастно обмежені тепловізори

Контрастно обмежені ТПСС були розглянуті у підрозділі 4.5.3.1. В цьому підрозділі дослідимо можливості таких систем виявляти, розпізнавати і ідентифікувати об'єкти спостереження в залежності від характеристик систем і умов спостереження. Якість тепловізійного зображення залежить від його розділення. Для ТПСС використовують різні види розділення: просторове, енергетичне, поляризаційне, спектральне, часове. Для більшості ТПСС важливо забезпечити необхідне просторове й енергетичне розділення.

Просторова частота $\nu_{x,\max}$, за якої МПФ ТПСС зменшується до певного рівня, наприклад до значення порогового контрасту, що сприймається оператором, часто служить мірою просторового розділення. За таку

просторову частоту можна прийняти частоту Найквіста ν_N , яка дорівнює половині частоти просторової вибірки, що здійснюється в ТПСС з МПВ.

Під час моделювання ТПСС використовують різні моделі, в яких враховують як просторову, так і енергетичну роздільну здатність системи. Широкого розповсюдження набули такі моделі [24–27]:

1. Модель для контрастно обмежених систем, яка враховує пропускання атмосфери без спотворень зображення.

2. Стандартна модель для систем, обмежених шумами, яка враховує пропускання атмосфери без спотворень зображення.

В основному при розрахунках ТПСС враховують дві порогові чутливості: порогову чутливість зорової системи оператора і порогову чутливість МПВ.

Тепловізійна система спостереження створює зображення об'єкта, наприклад штрихової міри, на екрані дисплея з певним контрастом, який сприймає спостерігач (оператор). Зорова система спостерігача має певний пороговий контраст, який залежить від просторової частоти ν_x зображення міри. Зі збільшенням просторової частоти зображення міри, контраст зображення між світлими і темними смугами зменшується. На певній просторовій частоті $\nu_{x,\max}$ смуги в зображенні не спостерігаються. Ця максимальна просторова частота $\nu_{x,\max,c}$ у зображенні і характеризує граничне просторове розділення ТПСС, тобто система «ТПСС – оператор» пропускає просторові частоти тільки в межах від 0 до $\nu_{x,\max,c}$ (рис. 4.5). Тому ТПСС, які працюють у даній ситуації, називають контрастно обмеженими.

Верхня крива описує МПФ M_s ТПСС. Просторову частоту визначають у точці перетину графіків МПФ M_s і порогового контрасту $C_{E,th}$ сприйняття зображення оператором. Під час роботи такої системи об'єкт спостереження розрізняється тільки в тому випадку, коли його контраст перевищує порогове значення. Істотно, що в даній ситуації відношення сигнал/шум на виході системи вважається достатньо великим, а тому обмеження просторового розділення визначаються тільки низьким контрастом.

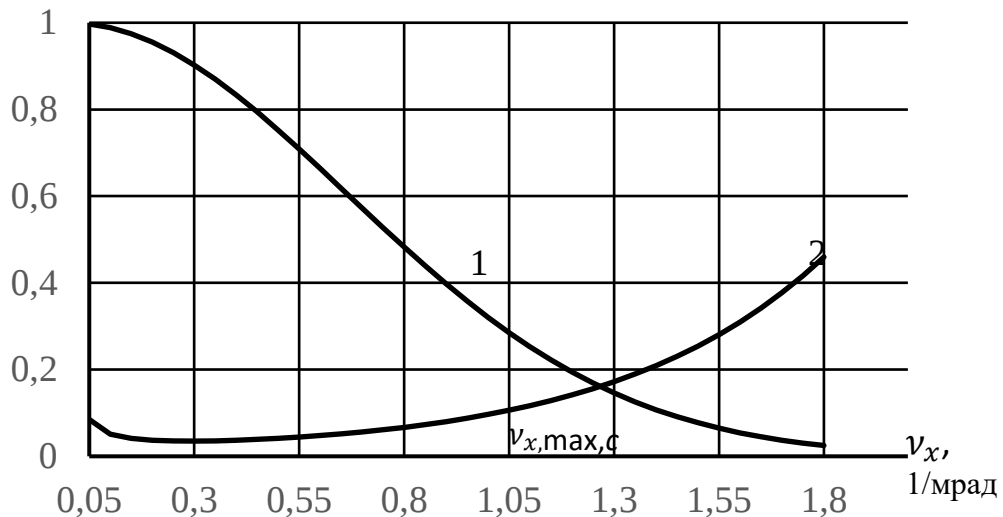


Рис.4.5. До визначення максимальної смуги пропускання контрасто обмеженої ТПСС: 1 – МПФ ТПСС; 2 - пороговий контраст сприйняття зображення оператором

4.5.5.3. Критерій Джонсона для оцінки ефективності ТПСС

Дослідження ефективності (performance) ІЧ систем спостереження тривають вже понад 60 років. Одним з провідних наукових центрів в цій галузі є відділ досліджень і розробок армії США, результати роботи якого використовуються більшістю експертів з ІЧ систем у світі. Були розроблені моделі тепловізорів, які виконували завдання виявлення, розпізнавання та ідентифікація тактичних цілей на полі бою. Найголовніше, що військові користувачі цих моделей розуміють як метрики, передбачені моделями, співвідносяться з тим, як працюватимуть системи на полі бою.

Основну гіпотезу для моделей приладів нічного бачення запропонував Джонсон у 1958 році [19, 28]. Згідно цієї моделі здатність спостерігача виявляти, визначати орієнтацію, розпізнавати та ідентифікувати військові цілі, що знаходяться на певному фоні, залежить від того, наскільки добре він може розрізняти штрихові смуги міри Фуко з різними просторовими частотами і тим самим температурним контрастом ΔT , що і ціль, відносно фону

$$\Delta T = T_t - T_b, \quad (4.72)$$

де T_t і T_b – температура поверхні цілі і фону відповідно

Подальший розвиток моделювання ТПСС полягав у створенні простої

у використанні моделі, яка враховує характеристики тест-об'єкта у вигляді штрихової міри Фуко (розміри, температурний контраст, просторова частота міри), ослаблення випромінювання від цілі в атмосфері, параметри оптичної системи (діаметр входної зіниці, фокусна відстань і коефіцієнт пропускання), приймача випромінювання (розмір пікселів, розмір матриці, питома виявлювальна здатність), електронної системи обробки сигналів МПВ; дисплей і закони зорового сприйняття оператором тепловізійного зображення з екрану дисплея. З цією метою було використано, як показано раніше, мінімально роздільну різницю температур як функцію просторової частоти міри Фуко. Такий підхід дозволив порівнювати результати спостереження фонові цільові обстановки в польових умовах з лабораторними вимірюваннями характеристик тепловізорів. Розроблена модель дозволила аналізувати і оптимізувати ТПСС різного призначення і, в перше чергу, тепловізійні приціли.

Модель ТПСС для розрізнення цілі, яка використовує концепцію Джонсона і порогового контрасту, наведена на рис. 4.6.

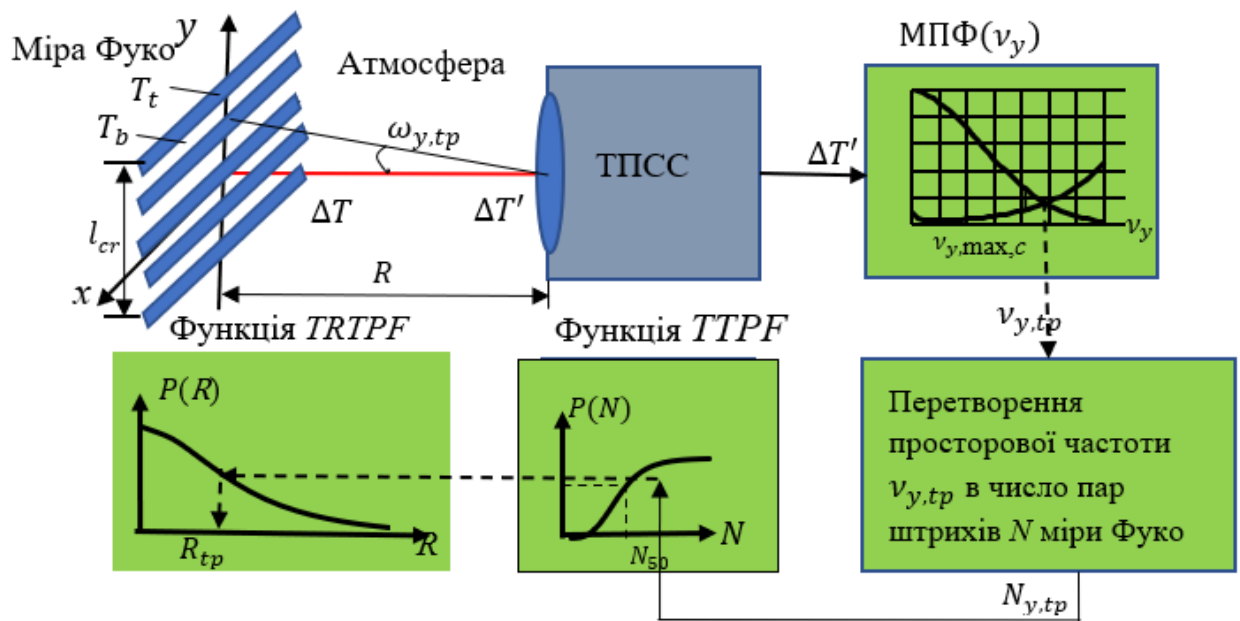


Рис. 4.6. Модель ТПСС для прогнозування виконання завдання спостереження, яка використовує концепцію Джонсона і пороговий контраст

Температурний контраст цілі ΔT зменшується за рахунок ослаблення випромінювання в атмосфері, тобто

$$\Delta T' = \Delta T \tau_A(R), \quad (4.73)$$

де $\tau_A(R)$ – інтегральний коефіцієнт пропускання атмосфери; R – відстань між ціллю і ТПСС.

Різниця температур ΔT відповідає просторовій частоті $\nu_{y,tp}$ міри, що спостерігає ТПСС, яка залежить від критичного розміру цілі l_{cr} і відстані R . Число штрихів (періодів) міри Фуко, які розташовані уздовж критичного розміру цілі l_{cr} , визначаються за формулою

$$N[\text{періодів}] = \nu_{y,tp} \left[\frac{\text{періодів}}{\text{мрад}} \right] l_{cr}[\text{мрад}]. \quad (4.74)$$

В залежності від відстані R число періодів міри Фуко, які розташовані уздовж критичного розміру цілі l_{cr} , визначимо за формулою

$$N = \nu_{y,tp} \frac{l_{cr}}{R}, \quad (4.75)$$

де l_{cr} вимірюється в метрах, R - в кілометрах.

Число штрихів N будемо використовувати для визначення ймовірності виконання завдання по спостереженню за ціллю. На рис. 4.6 показано вплив поглинання випромінювання в атмосфері на температурний контраст цілі ΔT , що призводить до його зменшення до величини $\Delta T'$ в площині вхідної зіниці об'єктива тепловізора. Важливим є те, що при цьому для контрастно обмежених ТПСС, температурний контраст в тепловізійному зображенні тест-об'єкта на екрані дисплея залишається незмінним. В точці перетину графіків функцій $M_s(\nu_y)$ і $C_{E,th}(\nu_y)$ визначаємо просторову частоту $\nu_{y,tp}$, а потім за формулою (4.75) розраховуємо максимальне число періодів міри Фуко N , що розрізняються уздовж критичного розміру цілі l_{cr} .

Ймовірність виконання завдання спостереження (виявлення, орієнтація, розпізнавання, ідентифікація). визначаємо за допомогою цільової функції передачі ймовірності $TTPF$ (Target Transfer Probability Function), яка розраховується за формулою [1, 22, 28]

$$P(N) = \frac{\left(\frac{N}{N_D}\right)^k}{1 + \left(\frac{N}{N_D}\right)^k}, \quad (4.76)$$

де P – ймовірність виконання певного завдання спостереження; N – число пар штрихів міри Фуко, що розміщуються уздовж критичного розміру цілі; N_D – число пар штрихів згідно з критерієм Джонсона, яке забезпечує ймовірність виконання певного завдання спостереження $P = 50 \%$;

$$k = 2,7 + 0,7 \left(\frac{N}{N_D} \right).$$

Ця функція була отримана в результаті великої кількості експериментальних польових досліджень. Наприклад, для ймовірності 50% виконання різних завдань по спостереження за ціллю середнє число періодів міри Фуко наведено в табл. 4.4 [1].

Таблиця 4.4

Число періодів (пар штрихів) міри N_{50} уздовж критичного розміру цілі для 50-відсоткової ймовірності виконання завдання спостереження (критерій Джонсона)

Завдання для спостереження	Число періодів міри	
	НАТО [9]	Монографія [1]
Виявлення	1,0	1,0
Орієнтація	-	2,5
Розпізнавання	3,0	4,0
Ідентифікація	6,0	8,0

Ймовірність виконання певної задачі спостереження (виявлення, розпізнавання або ідентифікація) визначається за допомогою цільової функції передачі ймовірності TTRF і обирається із таблиці 4.5 для ймовірності відповідного рівня $P(N_{50})=50\%$ [1].

Таблиця 4.5

Критерії дискримінації з використанням підходу Джонсона

Задача спостереження	Призначення	1-D періодів уздовж критичного розміру N_{50}	2-D періодів уздовж критичного розміру N_{50}
Виявлення	Ціль військового призначення присутня	1,0	0,75
Розпізнавання	Клас розпізнавання, до якого належить ціль (танк, вантажівка або бронетехніка)	4,0	3,0
Ідентифікація	Конкретний тип цілі (танк М1А, танк Т62, танк Т72 тощо)	8,0	6,0

Ймовірність виявлення, розпізнавання або ідентифікації потім визначається за допомогою $TTPF$ як [1]

$$P(N) = \frac{\left(\frac{N}{N_{50}}\right)^{2,7+0,7\left(\frac{N}{N_{50}}\right)}}{1+\left(\frac{N}{N_{50}}\right)^{2,7+0,7\left(\frac{N}{N_{50}}\right)}}. \quad (4.77)$$

Графік функції (4.77) наведено на рис. 4.7.

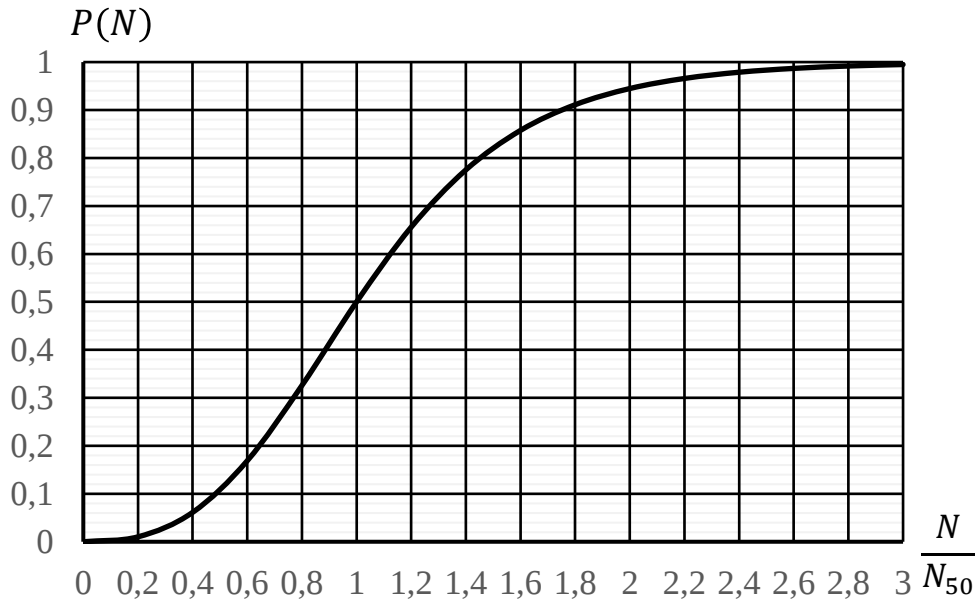


Рис. 4.7. Цільова функція передачі ймовірності $TTPF$

Аналогічно цільовій функції передачі ймовірності $TTPF$ можна ввести нову функцію передачі ймовірності по дальності до цілі (Target Rang Transfer Probability Function) $TRTPF$. Із системи рівнянь (4.74), (4.75) і (4.77) отримуємо функцію $P(R)$, яка має вигляд

$$P(R) = \frac{\left(\frac{R_{50}}{R}\right)^{2,7+0,7\left(\frac{R_{50}}{R}\right)}}{1+\left(\frac{R_{50}}{R}\right)^{2,7+0,7\left(\frac{R_{50}}{R}\right)}}, \quad (4.78)$$

де R_{50} – відстань від ТПСС до цілі, при якій виконується певне завдання спостереження з ймовірністю 50% згідно критерію Джонсона.

На рис. 4.8 наведено графік функції (4.70).

Для отриманої ймовірності $P(R)$ із графіка, що наведений на рис. 4.8, визначаємо відношення $\frac{R_{50}}{R}$.

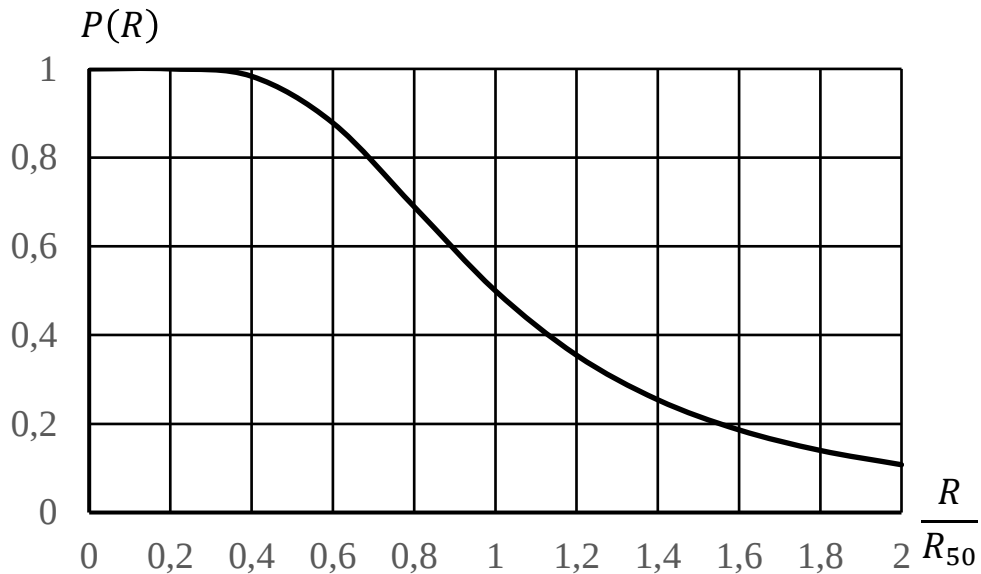


Рис. 4.8. Функція *TRTPF*: залежність ймовірності виконання завдання спостереження $P(R)$ від відстані R між ціллю і ТПСС

4.5.5.4. Модуляційна передавальна функція ТПСС

Мета цього підрозділу полягає в розробці методу визначення МПФ ТПСС, до складу якого входять об'єктив, мікроболометрична матриця, електронна система і дисплей, що дозволить оптимізувати характеристики тепловізора для вирішення конкретної задачі спостереження.

Спрощена функціональна схема ТПСС наведена на рис. 4.9. ІЧ випромінювання від об'єкта спостереження ослаблюється в атмосфері і надходить до входної зіниці об'єктива. Об'єктив формує ІЧ зображення об'єкта і фону на чутливій поверхні мікроболометричної матриці (МБМ). Електричний відеосигнал з МБМ обробляється електронною системою і надходить по каналу зв'язку на пульт керування дроном дисплей, якого формує на екрані зображення об'єкта у видимій області спектра.

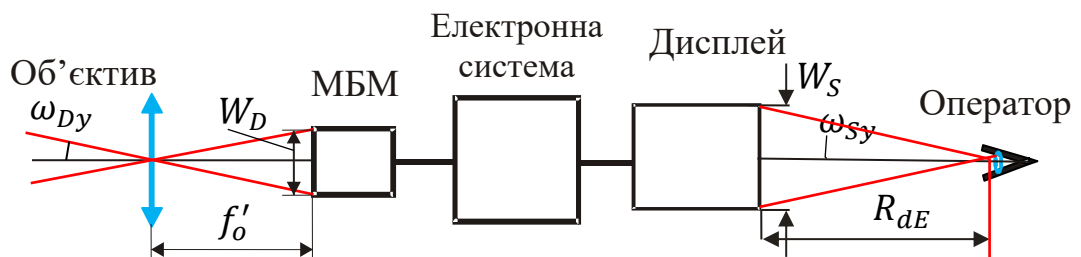


Рис. 4.9. Функціональна схема ТПСС

Аналогічно підходу, викладеному в третьому розділі, математичну модель ТПСС будемо розглядати в області частот (просторових і часових), вважаючи що вона є лінійною інваріантною системою. При цьому будемо вважати, що об'єкт і фон випромінюють некогерентно, а кожен елемент ТПСС має свою модуляційну передавальну функцію. За цих умов МПФ ТПСС M_s визначається добутком МПФ її окремих елементів: об'єктива, МБМ, електронного блока та дисплея (формула (3.10)). Для одновимірного випадку маємо

$$M_s(v_y) = M_o(v_y)M_{Ds}(v_y)M_{Dt}(t)M_{El}(t)M_s(v_y), \quad (4.79)$$

де $M_o(v_x)$, $M_{Ds}(v_x)M_{Dt}(t)$, $M_{El}(t)$ і $M_s(v_x)$ – МПФ об'єктива, МБМ, електронного блока і дисплея відповідно.

Високоякісні об'єктиви без центрального екранування з діаметром вхідної зіниці D_{po} можна розглядати як дифракційно обмежені, МПФ яких визначається функцією [8]

$$M_o(v_x) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} (\arccos x - x\sqrt{1-x^2}), & \text{якщо } 0 \leq x \leq 1; \\ 0, & \text{якщо } x > 1, \end{cases} \quad (4.80)$$

де $x = \lambda \frac{f'_o}{D_{po}} v_x$.

Графік МПФ дифракційно обмеженого об'єктива наведено на рис. 4.10.

Для спрощення математичних перетворень апроксимуємо доволі складну функцію (4.80) лінійною функцією

$$M_o(v_x) = \begin{cases} 1 - 1,218x, & \text{якщо } 0 \leq x \leq 0,821; \\ 0, & \text{якщо } x > 0,821. \end{cases} \quad (4.81)$$

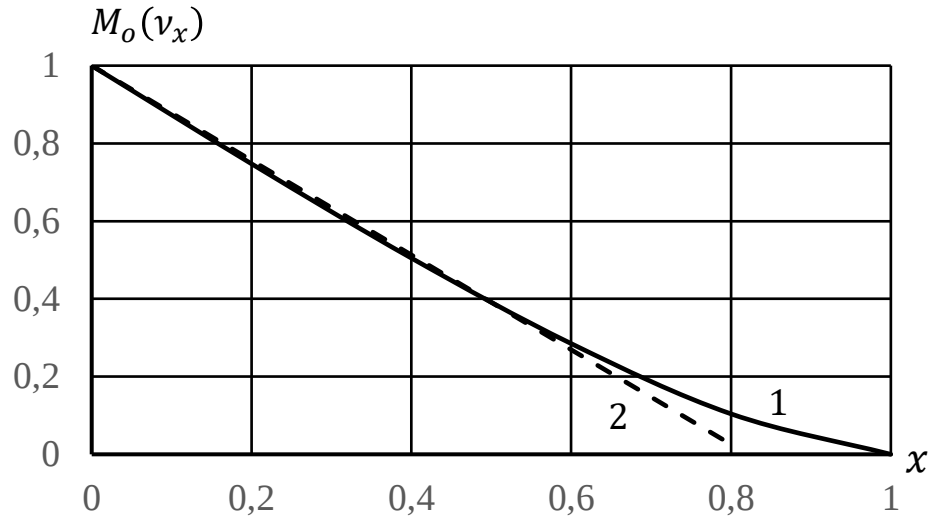


Рис. 4.10. МПФ дифракційно обмеженого об'єктива (графік 1) та її лінійна апроксимація (4.81) (графік 2)

Одновимірною просторовою МПФ мікроболометричної матриці апроксимується функцією [20]

$$M_{Ds}(v_y) = \text{sinc}(W_D v_y) \text{sinc}(w_D v_y), \quad (4.82)$$

де W_D – період матричної структури; w_D – розмір чутливої площадки пікселя.

Часова МПФ МБМ як просторовий фільтр низьких частот апроксимується функцією [8]

$$M_{Dt} = \frac{1}{\sqrt{1 + 4\pi^2 t_D^2 f^2}}, \quad (4.83)$$

де t_D – стала часу мікроболометра.

МПФ електронного блоку $M_{El}(t)$ моделюється фільтрами Баттерворта n -порядку [8]. Сучасні електронні блоки мають $M_{El}(f) \approx 1$ [28].

МПФ дисплея апроксимується функцією, аналогічною МПФ МБМ, тобто

$$M_d(v_y) = \text{sinc}(W_d v_y) \text{sinc}(w_d v_y). \quad (4.84)$$

Із наведеної на рис. 4.9 узагальненої схеми ТПСС видно, що МПФ об'єктива і МБМ визначаються в задній фокальній площині об'єктива, а МПФ дисплея – в площині екрана дисплея. Слід також відзначити, що у більшості випадків просторову частоту v_y визначають у просторі предметів і вимірюють у мрад^{-1} . Крім того, часові МПФ МБМ і електронного блоку

залежать від часової частоти f .

Зв'язок між кутовою просторовою ν_{ya} і часовою f частотами визначають співвідношенням [4]

$$f = \frac{\beta_D}{t_o} \nu_{ya}, \text{ Гц}, \quad (4.85)$$

де β_D – кутовий розмір пікселя матриці; t_o – час формування сигналу одним пікселем.

Зв'язок між кутовою просторовою частотою у просторі спостереження ν''_{ya} і просторі предметів ν_{ya} було встановлено в п. 2.6 за допомогою співвідношень (2.78) – (2.80).

Подамо МПФ окремих складових ТПСС у вигляді функцій, які залежать від кутової просторової частоти в просторі об'єкта (рис. 2.7).

МПФ об'єктива визначимо із функції (4.81), де $x = \lambda \frac{\nu_{ya}}{D_{po}}$. Тоді

$$M_o(\nu_{ya}) = \begin{cases} 1 - 1,218\lambda \frac{\nu_{ya}}{D_{po}}, & \text{якщо } 0 \leq \nu_{ya} \leq 0,821 \frac{D_{po}}{\lambda}; \\ 0, & \text{якщо } \nu_{ya} > 0,821 \frac{D_{po}}{\lambda}. \end{cases} \quad (4.86)$$

Просторову МПФ МБМ визначимо із функції (4.82), яку подамо у вигляді

$$M_{Ds}(\nu_{xa}) = \text{sinc}\left(\frac{w_D}{f'_o} \nu_{ya}\right) \text{sinc}\left(\frac{w_D}{f'_o} \nu_{ya}\right). \quad (4.87)$$

Часову МПФ МБМ визначимо із функції (4.83), яка з урахуванням співвідношення (4.85) набуде вигляду

$$M_{Dt}(\nu_{ya}) = \left[1 + 4\pi^2 \left(\frac{t_D}{t_o}\right)^2 \left(\frac{w_D}{f'_o}\right)^2 \nu_{ya}^2 \right]^{-0,5}. \quad (4.88)$$

МПФ дисплея визначимо із функції (4.84), яка з урахуванням співвідношення (2.78) матиме вигляд

$$M_d(\nu_{xa}) = \text{sinc}\left(\frac{v_d}{f'_o \beta_{el}} \nu_{ya}\right) \text{sinc}\left(\frac{v_d}{f'_o \beta_{el}} \nu_{ya}\right). \quad (4.89)$$

Розглянемо приклад розрахунку МПФ ТПСС, яка має такі характеристики:

- Об'єктив – фокусна відстань $f'_o = 70$ мм, діаметр вхідної зіниці $D_{op} = 70$ мм.

- МБМ – розмір пікселя $V_D = 17$ мкм, розмір чутливої площадки $v_D = 14$ мкм, розмір матриці $X_D = 6,8$ мм, постійна часу $t_D = 10$ мс,

частота кадрів $f_f = 50$ Гц.

- Дисплей – розмір пікселя $V_d = 17$ мкм, розмір кольорової групи пікселя $v_D = 15$ мкм, розмір екрана $X_d = 9,6$ мм.

На рис. 4.11 наведені модуляційні передавальні функції окремих складових ТПСС і його результуюча МПФ (4.79).

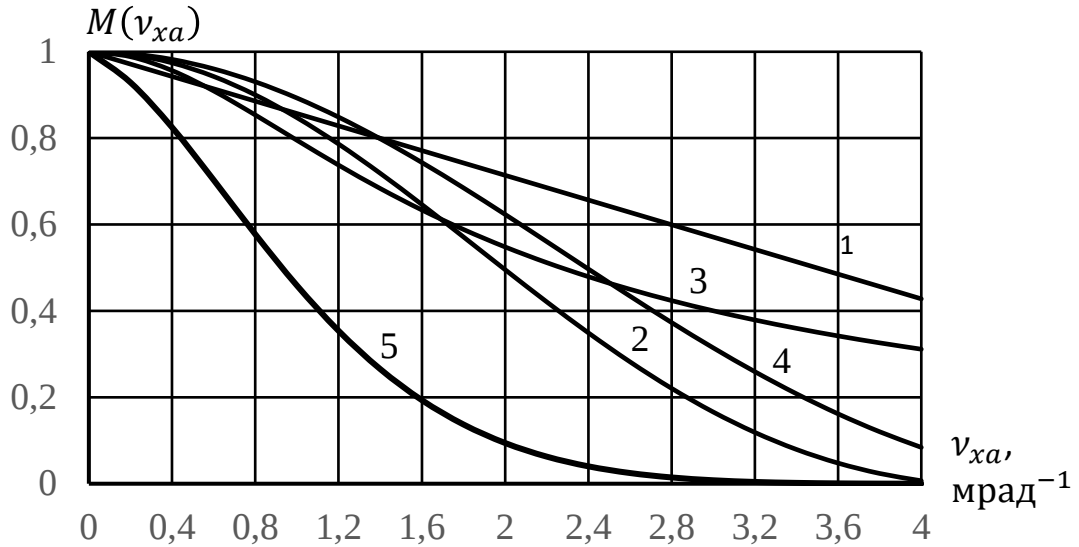


Рис. 4.11. Модуляційні передавальні функції ТПСС: 1 – МПФ об'єктива, 2 – просторова МПФ МБМ, 3 – часова МПФ МБМ, 4 – МПФ дисплея, 5 – результуюча МПФ ТПСС

Аналіз функцій (4.78), (4.86) – (4.89) і їх графіків показує, що:

1. МПФ окремих складових визначаються в різних місцях ТПСС: об'єктива і МБМ – в задній фокальній площині об'єктива; дисплея – в площині екрана дисплея. Часова МПФ залежить від часової частоти. При визначенні результуючою МПФ ТПСС необхідно, щоб усі МПФ складових каналу розглядались в певній площині або просторі. Для зручності практичного застосування пропонується МПФ усіх складових розглядати в просторі «об'єкт спостереження–ТПСС» як функції кутової просторової частоти.

2. Найбільш впливовим фактором погіршення результуючої МПФ ТПСС $M_s(v_x)$ є просторова МПФ МБМ $M_{Ds}(v_{xa})$, яка визначається розміром пікселя. На частоті Найквіста $v_N = 2$ мрад⁻¹ відбувається зниження контрасту за рахунок МБМ до 28%, дифракційно обмеженого об'єктива - до 71%, дисплея - до 62%. За цих умов результуюча МПФ ТПСС

набуває значення $M_s(v_N) = 0,095$.

3. Результируюча МПФ ТПСС добре апроксимується гаусовою функцією [8]

$$M_{s,ap}(v_{xa}) = \exp(-2\pi^2 r_{sa}^2 v_x^2), \quad (4.90)$$

де r_{sa} – кутовий радіус зображення точкового джерела випромінювання, яке спостерігає оператор на екрані дисплея, мрад.

Отже доцільно розглядати МПФ тепловізора в просторі «об’єкт спостереження – ТПСС», що дозволяє розраховувати кутову роздільну здатність контрастно обмеженого ТПСС. Отримані аналітичні вирази МПФ окремих компонентів дозволяють оптимізувати характеристики ТПСС для вирішення конкретної задачі спостереження.

4.5.5.5. Пороговий контраст сприйняття тепловізійного зображення

Можливість передбачити ймовірність виявлення, розпізнавання або ідентифікації цілі як функція контрасту зображення залежить від того, наскільки добре сприймає зображення зорова система спостерігача. Здатність зорової системи до сприйняття визначається пороговою функцією контрасту (CTF, contrast threshold function). Зображення спостерігається на дисплеях, які працюють із обмеженою частотою кадрів, і через обмеження сенсора часто виникає шум дисплея. Це обумовлює вимогу визначити CTF ока без врахування шуму. Такий підхід до моделі CTF застосовується до будь-яких систем візуалізації незалежно від того, чи сприймають ці системи візуалізації видиме або інфрачервоне випромінювання за умови, що система зображення створює відтінки сірого зображення, яке бачить людське око. Останніми роками набуває все більшого розповсюдження метрика ТТР (Targeting Task Performance). Вона більш повно описує перетворення сигналів в ТПСС ніж критерії Джонсона і базується на функції CTF.

В монографії [1] розглянута порогова функція контрасту неозброєного ока, який спостерігає синусоїдальний малюнок на ідеальному дисплеї великих розмірів, в якому відсутні шуми. Для визначення порогового контрасту зображення CTF за допомогою комп’ютера синтезується тест-об’єкт у вигляді синусоїдального розподілу яскравості екрану, який є функцією кута

θ_h з амплітудою L_a і середньою яскравістю L_0 (рис. 4.12).

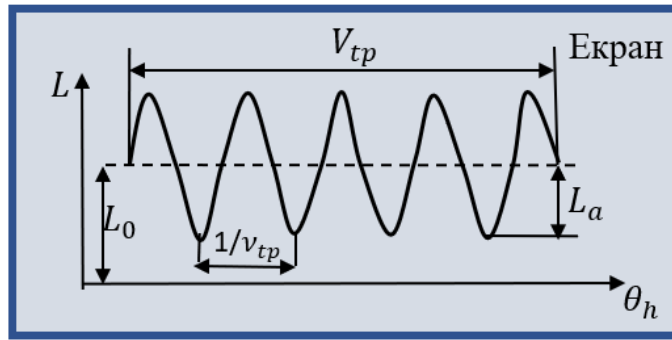


Рис. 4.12. Розподіл яскравості в зображенні тест-об'єкта на екрані дисплея для вимірювання функції порогового контрасту оператора: $V_{tp} \times W_{th}$ - розмір тест-об'єкта; ν_{tp} - просторова частота тест-об'єкта

Яскравість тест-об'єкта описується функцією

$$L_{tp}(\theta_h) = L_0 + L_a \sin(2\pi\nu_{tp}\theta_h) \operatorname{rect}\left(\frac{\theta_h}{V_{tp}}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{\theta_v}{W_{tp}}\right), \quad (4.91)$$

де ν_{tp} - просторова частота вимірюється в мрад^{-1} , а $\theta_h, \theta_v, V_{tp}$ і W_{tp} - в мрад.

Контраст тест-об'єкта визначається як

$$C_{tp}(\nu_{tp}) = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}, \quad (4.92)$$

де $L_{\max}$ і $L_{\min}$ - максимальна і мінімальна яскравість дисплея. Із формули (4.91) маємо: $L_{\max} = L_0 + L_a$ і $L_{\min} = L_0 - L_a$.

Із рис. 4.12 видно, що C_{tp} знаходиться в межах від 0 до 1. Для фіксованого значення L_a , оскільки яскравість не може бути від'ємною, найменше значення L_0 дорівнює L_a . Це означає, що максимальне значення C_{tp} дорівнює 1. Для фіксованого значення L_0 , найменше значення L_a дорівнює 0, а найменше значення C_{tp} дорівнює 0.

Процедура вимірювання СТФ полягає в наступному. Синусоїдальний тест-об'єкт випадковим чином відображається у верхній або нижній частині дисплея, а спостерігач повинен визначити місце знаходження зображення. При заданих просторовій частоті ν_{tp} і середній яскравості тест-об'єкта L_0 контраст тест-об'єкта зменшується шляхом зменшення L_a таким чином, щоб модульований сигнал був ледь помітним. Тест-об'єкт нульового контрасту випадково відображається у будь-якій половині екрану, а тест-об'єкт з ледь помітним контрастом - в іншій половині екрану. Спостерігач повинен

вирішити, де знаходиться модульований тест-об'єкт. В залежності від яскравості L_0 і просторової частоти ν_{tp} визначається яка частина екрана мала три чверті правильних відповідей. Це буде відповідати ймовірності виявлення 50%.

Експериментально встановлено, що у випадку, коли розміри тест-об'єкта $V_{tp} \times W_{th}$ перевищують 15° , функція порогового контрасту майже не залежить від розміру його розміру. Також експериментальні дослідження свідчать про те, що пороговий контраст сприйняття зображення $C_{v,th}$ залежить від яскравості фону L_{sb} і кутових розмірів елемента розкладення зображення $\delta\omega_E$. Пороговий контраст $C_{v,th}$ різко змінюється зі збільшенням $\delta\omega_E$ до $10' \dots 20'$ і далі змінюється неістотно. Часто вважають [8], що найоптимальнішим пороговим контрастом є величина $C_{v,th,opt} = 0,027$. Для апроксимації порогового контрасту іноді використовують функцію, запропоновану Шульцем (2.82).

4.5.5.6. Алгоритм визначення відстані від цілі до ТПСС при виконанні завдання спостереження з певною ймовірністю на основі функцій $TTPF$ і $TRTPF$

Для споживачів систем спостереження часто буває більш зрозумілою величина відстані до цілі при певному значенні ймовірності виконання завдання аніж сама ймовірність. Розглянемо можливий алгоритм визначення такої відстані.

1. Визначаємо просторову частоту міри Фуко $\nu_{y,tp}$ графічним методом із рівняння

$$M_s(\nu_y) = C_{E,tp}(\nu_y), \quad (4.93)$$

яка забезпечує рівність МПФ ТПСС $M_s(\nu_y)$ і порогового контрасту $C_{E,tp}(\nu_y)$ у просторі об'єкта спостереження.

2. За формулою (4.75) розраховуємо числом періодів N міри Фуко вздовж вертикального напрямку (критичного розміру цілі l_{cr}), де висота цілі l_{cr} вимірюється в метрах, відстань R до цілі – в кілометрах, а просторова частота міри $\nu_{y,tp}$ – в мрад (рис. 4.6).

2. За заданими температурами поверхні цілі T_t і фону T_b за формулою (4.64) розраховуємо температурний контраст $\Delta T = T_t - T_b$, який дорівнює температурному контрасту міри Фуко.

3. Температурний контраст ΔT зменшується за рахунок поглинання випромінювання в атмосфері за законом Бугера-Ламберта. Але при надходженні до вхідної зіниці об'єктива за умови його перевищення порогового контрасту, він не впливає на просторове розділення ТПСС.

4. Згідно критерію Джонсона для ймовірності виконання завдання спостереження 50% із таблиці 4.4 визначаємо число періодів міри уздовж критичного розміру цілі: для виявлення – $N_{d,50} = 1$; для розпізнавання – $N_{r,50} = 3$; для ідентифікації – $N_{i,50} = 6$.

Для визначеного числа періодів N міри Фуко за формулою (4.77) для функції $TTPF$ або її графіка (рис. 4.8) визначаємо ймовірність виявлення, розпізнавання або ідентифікації цілі.

5. Із формули (4.75) знаходимо відстані до цілі, на яких виконується завдання спостереження з ймовірністю 50%:

$$R_{50} = v_{y,tp} \frac{l_{cr}}{N_{50}}. \quad (4.94)$$

6. Для визначеного відстані до цілі для виконання завдання спостереження з певною ймовірністю за формулою (4.78) для функції $TRTPF$ або її графіка (рис. 4.9) визначаємо шукану відстань.

4.5.6. Приклади розрахунку узагальнених характеристик класичних тепловізорів

4.5.6.1. Приклади розрахунку максимальної дальності дії ТПСС

Приклад 4.5.1. Розрахуйте МДР танкового тепловізора ALIS французької фірми SAGEM SA відповідно до стандарту NATO 4347. Тепловізор має такі параметри: об'єктив – фокусна відстань $f_o = 76$ мм, діаметр вхідної зіниці $D_p = 76$ мм, коефіцієнт пропускання $\tau_o = 0,65$; МСТ-ПВ – робочий спектральний діапазон $\lambda_1 \dots \lambda_2 = 7,5 \dots 12,5$ мкм, питома виявлювальна здатність $D_{\max}^* = 5,5 \cdot 10^{10}$ см $\sqrt{\text{Гц}}$ /Вт, розмір пікселя

$V_D \times W_D = 22 \times 28$ мкм²; шумова смуга пропускання попереднього підсилювача $\Delta f = 1,8$ МГц; частота кадрів $f_f = 25$ Гц.

Розв'язання. 1. Для розрахунку МДР скористаємося рівнянням (4.59), яке для ймовірності розпізнавання $P_r = 50$ % запишемо у вигляді

$$\frac{R_r^3 \exp(\kappa_A R_r)}{M_s \left(\frac{3R_r}{V_t} \right)} = \frac{0,965 \Delta T_0 V_t A_p A_t \tau_o}{\text{SNR}(P_r) \cdot 6} \sqrt{\frac{t_o f_f t_E}{A_D \alpha_D \beta_D}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda.$$

2. З умови прикладу відомі параметри: $f_o = 76$ мм; $D_p = 76$ мм; $\tau_o = 0,65$; $f_f = 25$ Гц; $D_{\max}^* = 5,5 \cdot 10^{10}$ см $\sqrt{\text{Гц/Вт}}$; $A_D = V_D \times W_D = 6,16 \cdot 10^{-6}$ см²; $t_E = 0,2$ с.

3. Зі стандарту НАТО 4347 відомі параметри: $\kappa_A = 0,2$ км⁻¹ (за сприятливих умов пропускання атмосфери); $\Delta T_0 = 2$ К; $V_t = 230$ см; $A_t = 5,29 \cdot 10^4$ см²; $T_b = 288$ К.

4. Кутові розміри чутливої площадки ПВ знаходимо за формулою (1.1):

$$\alpha_D = \frac{V_D}{f_o'} = \frac{22 \cdot 10^{-3}}{76} = 0,289 \text{ мрад}; \quad \beta_D = \frac{W_D}{f_o'} = \frac{28 \cdot 10^{-3}}{76} = 0,368 \text{ мрад}.$$

5. МПФ ТПСС знайдемо виходячи з умови, що ця функція визначається розмірами чутливої площадки ПВ. Тоді відповідно до формули МПФ ПВ (а отже і МПФ ТПСС) уздовж напрямку сканування дорівнює

$$M_s(\psi_x) \cong M_D(\psi_x) = \frac{\sin(\pi \alpha_D \psi_x)}{\pi \alpha_D \psi_x} = \frac{\sin(\pi \alpha_D \cdot 3R_r / V_t)}{\pi \alpha_D \cdot 3R_r / V_t} = \frac{\sin(1,18R_r)}{1,18R_r}.$$

6. Площа вхідної зіниці об'єктива дорівнює $A_p = \frac{\pi D_p^2}{4} = 45,36$ см².

7. Відношення сигнал/шум для впевненого виявлення одного штриха міри Фуко будемо вважати рівним $\text{SNR}_r = 4,5$, що було обґрунтовано в прикладі 3.8.1 [8]. При цьому слід пам'ятати, що реальна ймовірність розпізнавання P'_r залежить від ймовірності розпізнавання P_r , що визначається числом штрихів еквівалентної міри Фуко уздовж критичного

розміру об'єкта, та ймовірністю виявлення штриха міри P_{dr} , що залежить від відношення сигнал/шум $SNR(P_r)$, тобто $P'_r = P_r P_{dr}$.

8. Час розкладення одного елемента t_o обчислюємо за формулою (1.12)

$$t_o = \frac{1}{2\Delta f} = 2,78 \cdot 10^{-7} \text{ с.}$$

9. Обчислимо інтеграл у рівнянні (4.59). Оскільки ТПСС ALIS використовує фотонний МСТ-ПВ, то згідно з (4.188) [8] цей інтеграл дорівнює

$$I = \frac{c_2 D_m^*}{\lambda_2 T_b^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda(\lambda, T_b) d\lambda = \frac{14388 \cdot 5,5 \cdot 10^{10}}{12,5 \cdot 288^2} \int_{7,5}^{12,5} M_\lambda(\lambda, T_b = 288 \text{ К}) d\lambda = 9,24 \cdot 10^6 \frac{\sqrt{\Gamma_{\text{ц}}}}{\text{К} \cdot \text{см}}.$$

10. Підставимо усі вихідні параметри в рівняння (4.59)

$$\frac{R_r^3 \exp(0,2R_r)}{\sin(1,18R_r)} = \frac{0,965 \cdot 2 \cdot 230 \cdot 45,36 \cdot 5,29 \cdot 10^4 \cdot 0,65}{4,5 \cdot 6} \times \\ \times \sqrt{\frac{2,78 \cdot 10^{-7} \cdot 25 \cdot 0,2}{6,16 \cdot 10^{-6} \cdot 0,289 \cdot 10^{-3} \cdot 0,368 \cdot 10^{-3}}} \cdot 9,24 \cdot 10^6 = 3,45 \cdot 10^{17} = 345 \text{ км}^3.$$

Рішення цього трансцендентного рівняння методом послідовних наближень дає такий результат: $R_r = 2,45 \text{ км}$.

Приклад 4.5.2. Розрахуйте максимальну дальність розпізнавання об'єкта розміром $2 \times 3 \text{ м}^2$, що має критичний розмір $l_{cr} = V_t = 2 \text{ м}$ та ефективний температурний контраст 2 К . Об'єкт розміщений на рівномірному фоні з температурою 300 К . Параметри ТПСС: об'єktiv 1,0/300 із середнім коефіцієнтом пропускання 0,5; ПВ – МСТ-лінійка з 128 елементами; розмір пікселя $50 \times 50 \text{ мкм}^2$; робочий спектральний діапазон від 8 мкм до 12 мкм ; частота кадрів 25 Гц ; число рядків у зображенні 128; формат кадру 4:3. Атмосфера має в робочому спектральному діапазоні показник ослаблення $0,38 \text{ км}^{-1}$. Ймовірність виявлення об'єкта 90 %.

Розв'язання. 1. Максимальну дальність розпізнавання знайдемо з рівняння (4.59), в якому відомі з умови прикладу $\kappa_A = 0,38 \text{ км}^{-1}$; $\Delta T = 2 \text{ К}$; $A_t = 6 \cdot 10^4 \text{ см}^2$; $V_t = 200 \text{ см}$; $\tau_o = 0,5$; $f_f = 25 \text{ Гц}$; $SNR(P_r) = 4,3$;

$$t_o = 1,875 \cdot 10^{-4} \text{ с}; A_D = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2; t_E = 0,2 \text{ с}; \alpha_D = \beta_D = 0,167 \text{ мрад};$$

$$\int_8^{12} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T = 300 \text{ K})}{\partial T} D^*(\lambda) d\lambda = 3,22 \cdot 10^6 \frac{\sqrt{\Gamma_{\text{ц}}}}{\text{см} \cdot \text{К}}.$$

2. Будемо вважати, що МПФ ТПСС визначається розміром чутливої площадки ПВ. Апроксимуємо цю МПФ гаусовою функцією (2.49). Просторову частоту, що відповідає розпізнаванню об'єкта за критерієм Джонсона, визначають формулою $4R_r / V_t$.

Тоді МПФ ТПСС $M_s(\nu_{xr}) = \exp(-0,213 \cdot R_r^2)$, де R_r – відстань, км.

3. Площа входної зіниці об'єктива дорівнює

$$A_p = \frac{\pi D_p^2}{4} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{f'_o}{k_{eff}} \right)^2 = 707 \text{ см}^2.$$

4. Підставимо вихідні параметри в рівняння (4.59)

$$\frac{R_r^3 \exp(0,38R_r)}{\exp(-0,213R_r^2)} = 2,79 \cdot 10^4 \text{ км}^3.$$

Рішенням цього рівняння є максимальна дальність розпізнавання $R_r = 4,41 \text{ км}$.

Приклад 4.5.4. Розрахуйте необхідне число пар N_{Er} штрихів еквівалентної міри Фуко для розпізнавання зображення об'єкта із ймовірністю $P_r = 90 \%$.

Розв'язання. 1. Запишемо інтеграл (4.224) для ймовірності розпізнавання зображення об'єкта, використовуючи дані табл. 4.4 і 4.5 [8]:

$$P_r = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{(N_{Er}-4)/1,882} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz. \quad (4.95)$$

Подамо цей інтеграл у вигляді

$$P_r = \frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{z_0} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz = \frac{1}{2} + \Phi(z_0), \quad (4.96)$$

де $z_0 = (N_{Er} - 4)/1,882$; $\Phi(z_0)$ – інтеграл ймовірностей.

2. Розв'яжемо рівняння (4.96), записавши його у вигляді

$$\Phi(z_0) = P_r - \frac{1}{2} = 0,4.$$

Із табл. 2.1 знаходимо, що $z_0 = 1,28$. Тоді $N_{Er} = 4 + 1,882z_0 = 6,4 \approx 7$.

4.5.6.2. Приклад розрахунку ймовірності розрізнення цілі контрастно обмеженою ТПСС

Для практичного застосування запропонованого методу визначення ймовірності виявлення, розпізнавання та ідентифікації цілей, що розглянутий в п. 4.5.5, розглянемо ТПСС, яка має такі характеристики:

- Тепловізор – об’єктив: фокусна відстань $f'_o = 70$ мм, діаметр вхідної зіниці $D_{op} = 70$ мм; мікроболометрична матриця: формат матриці 320×240 пікселів, розмір пікселя $W_D = 17$ мкм, постійна часу $t_D = 10$ мкс, частота кадрів $f_f = 50$ Гц; дисплей: розмір пікселя $v_D = 15$ мкм, розмір екрана $Y_d = 7.2$ мм.

- Об’єкт спостереження – тест-об’єкт, що використовується в стандарті НАТО 4347 для визначення максимальної дальності виявлення цілі ТПСС і має такі параметри: спектральний діапазон випромінювання об’єкта і фону від 8 мкм до 14 мкм; температурний контраст між об’єктом і заднім фоном (відносно температури АЧТ в $T_b = 288$ К) – $\Delta T_o = 2$ К; розміри $V_{tp} \times W_{tp} = 2,3 \times 2,3$, м².

- Умови спостереження: зміна початкового температурного контрасту ΔT_o між об’єктом і заднім фоном унаслідок ослаблення випромінювання в атмосфері враховується за законом Бугера-Ламберта, який має вигляд

$$\Delta T(R) = \Delta T_o \exp(-\kappa_A R), \quad (4.97)$$

де R – дальність, км; $\kappa_A = 0,2$ км⁻¹ – показник ослаблення для сприятливих умов пропускання атмосфери.

Послідовність розрахунків є наступною:

1. За формулами (4.81) – (4.83) і (4.79) розраховуємо МПФ об’єктива, просторову і часову МПФ МБМ, дисплея і результуючу МПФ ТПСС в просторі цілі, використовуючи формулу (4.83). Графіки цих функцій наведені на рис. 4.11.

2. За формулою (2.82) визначаємо пороговий контраст в просторі об'єкта, враховуючи зв'язок між просторовими частотами в просторах оператора і об'єкта спостереження, який визначається співвідношенням (2.78) – (2.80). Тоді пороговий контраст буде визначатися за формулою

$$C_{E,th}(\nu_{ya}) = \frac{C_E}{\exp(-1,986\nu_{ya}) - \exp(-5,673\nu_{ya})} =$$

$$= \frac{C_E}{\exp\left(-1,986 \frac{R_{dE}}{f_o \beta_{El}} \nu_{ya}\right) - \exp\left(-5,673 \frac{R_{dE}}{f_o \beta_{El}} \nu_{ya}\right)}, \quad (4.98)$$

де кутова просторова частота ν_{ya} вимірюється в мрад⁻¹.

З умови прикладу знаходимо:

- Фокусну відстань об'єктива $f_o' = 70$ мм.
- Електронне збільшення $\beta_{el} = \frac{w_{tp}''}{w_{tp}'} = \frac{7,2}{4,08} = 1,76$.
- Оптимальну відстань між екраном дисплея і очима оператора [2]
 $R_{dE} = 6 \cdot Y_d = 43,2$ мм.

Для цих параметрів розрахункова формула (4.98) матиме вигляд:

$$C_{E,th}(\nu_{ya}) = \frac{0,01033}{\exp(-0,696\nu_{ya}) - \exp(-1,972\nu_{ya})}. \quad (4.99)$$

3. Підставляємо результуючу МПФ ТПСС і пороговий контраст (4.99) до рівняння (4.93). В точці перетину графіків функцій $M_s(\nu_{ya})$ і $C_{E,th}(\nu_{ya})$ визначаємо просторову частоту міри Фуко $\nu_{y,tp} = 2,2$ мрад⁻¹.

4. За формулою (4.75) розраховуємо максимальне число періодів міри Фуко N , що розрізняються уздовж критичного розміру цілі l_{cr} . Наприклад, для відстані до тест-об'єкта $R = 1,7$ км маємо $N = 3$.

5. Згідно критерію Джонсона для ймовірності виконання завдання спостереження 50% із таблиці 4.5 визначаємо число періодів міри уздовж критичного розміру цілі: для виявлення – $N_{d,50} = 1$; для розпізнавання – $N_{r,50} = 3$; для ідентифікації $N_{i,50} = 6$.

Для визначеного числа періодів $N=3$ міри Фуко за формулою (4.77) для функції $TTPF$ або її графіка (рис. 4.8) визначаємо ймовірність виявлення, розпізнавання або ідентифікації цілі: $P_d = 99\%$, $P_r = 50\%$, $P_i = 10\%$.

6. Із формули (4.75), яку представимо у вигляді

$$R_{50} = v_{y,tp} \frac{l_{cr}}{N_{50}}, \quad (4.100)$$

Розраховуємо відстані від цілі до ТПСС, при виконанні певного завдання спостереження з ймовірністю 50% згідно критерію Джонсона:

$$R_{d,50} = 5,0 \text{ км}, R_{r,50} = 1,7 \text{ км}, R_{i,50} = 0,84 \text{ км}$$

6. За формулою (4.78) для функції $TRTPF$ визначаємо ймовірність виконання завдання на заданій відстані R . Для отриманої ймовірності $P(R)$ із графіка, що наведений на рис. 4.9, визначаємо відношення $\frac{R_{50}}{R}$, яке для відстані $R = 1,7$ км дозволяє визначити ймовірності: виявлення – $P_d = 0,99$, розпізнавання – $P_r = 0,5$, ідентифікації $P_i = 0,1$.

Таким чином, в цьому підрозділі представлено новий більш досконалий (зручний) метод і алгоритм розрахунку ймовірності виявлення, розпізнавання і ідентифікації цілі з використанням ТПСС на заданій дальності, в основі якого лежить критерій Джонсона і пороговий контраст сприйняття оператором зображення на екрані дисплея, а також функції $TTPF$ і $TRTPF$.

В розробленій моделі тепловізора використано критерій Джонсона згідно стандарту НАТО 4347, апроксимацію Шульца порогового контрасту сприйняття оператором зображення на екрані дисплея. Тепловізор розглядається як лінійна інваріантна система в кутових просторових частотах в просторі «об'єкт–ТПСС». Запропонований алгоритм дозволяє оперативно розрахувати ймовірність виявлення, розпізнавання і ідентифікації цілі контрастно обмеженою тепловізійною системою БПЛА.

Задачі для самостійного розв'язання

Задача 4.1. Розрахуйте одновимірну МПФ ТПСС, яка має складові з такими параметрами:

- об'єктив – фокусна відстань $f'_o = 100$ мм, МПФ описують лінійним наближенням 2 із табл. 2.1, якщо $n = 1$, $M_{o1} = 0,5$, $v_{x1} = 5$ мрад⁻¹;
- система сканування – час розкладення одного елемента зображення $t_o = 0,37$ мкс;

- ПВ – розмір пікселя $V_D = 20$ мкм; постійна часу $t_D = 0,1$ мкс;
- електронний тракт не спотворює відеосигнал;
- дисплей – розмір елемента зображення $V_S = 0,5$ мм;
- спостерігач перебуває на відстані $R_{SE} = 1,72$ м від екрана дисплея.

Побудуйте графіки МПФ ТПСС та її складових. Апроксимуйте МПФ системи функцією (3.14) та визначте параметр апроксимації r_s .

Відповідь: Графіки подано на рис. 4.11, $r_s = 0,1$ мрад.

Задача 4.2. Визначте МПФ ТПСС, яка забезпечує просторову роздільну здатність $\nu_{res} = 1$ мрад⁻¹, якщо контраст зображення $C_s = 0,5$. Вихідні дані про ТПСС наведено у прикладі 3.2.1. Побудуйте графік функції $M_s(\nu_x)$ в діапазоні просторової частоти від 0 до 2 мрад⁻¹.

Відповідь: $M_s(\nu_x) = (1 - 0,293\nu_x) \frac{\sin(0,427\pi\nu_x)}{0,427\pi\nu_x}$.

Задача 4.3. Визначте роздільну здатність об'єктива ν_{x1} із контрастом зображення $M_{o1} = 0,5$, що використовується в ТПСС, вихідні дані якої наведено у прикладі 3.2.1. ТПСС забезпечує контраст зображення $C_s = 0,5$ для просторового розділення ν_{res} . Визначте це розділення, якщо відомий розмір пікселя V_D ПВ.

Відповідь: $\nu_{x1} = \frac{1 - M_{o1}}{1 - \sqrt{C_s}} \frac{0,444}{V_D} = \frac{0,758}{V_D}$; $\nu_{res} = \frac{0,444}{V_D}$.

Задача 4.4. Визначте просторову роздільну здатність і кутове розділення контрастно обмеженої ТПСС, МПФ якої подано на рис. 4.14.

Вказівка. Скористайтесь прикладом 3.2.2 і задачею 4.2.

Відповідь: $\nu_{res} = 1,93$ мрад⁻¹; $\delta\omega_s = 1/2\nu_{res} = 0,26$ мрад.

Задача 4.5. Розрахуйте для об'єкта з температурою 300 К відношення температурних розділень двох ТПСС, якщо одна з них працює у вікні прозорості атмосфери від 3,5 мкм до 5 мкм і використовує фотонний ПВ з максимальною виявлювальною здатністю $1,09 \cdot 10^{11}$ см $\sqrt{\text{Гц}}/\text{В т}$, а інша – у вікні прозорості атмосфери від 8 мкм до 14 мкм і використовує фотонний ПВ з максимальною виявлювальною здатністю $3,27 \cdot 10^{10}$ см $\sqrt{\text{Гц}}/\text{В т}$.

Відповідь: $\delta T_{3,5}^5 : \delta T_8^{14} = 5 \Rightarrow$ спектральне «вікно» пропускання від 8 мкм до 14 мкм має перевагу.

Задача 4.6. Шведська фірма AGEMA Infrared Systems створила в 1988 році ТПСС «Scanner 880 LWB», яка має такі дані: об'єктив – фокусна відстань 65 мм, роздільна здатність 1,27 мрад за контрасту 50 %, відносний отвір 1:1, коефіцієнт пропускання 0,8; ПВ – одноелементний квадратний КРТ-фоторезистор: $NETD = 0,07$ К при 30 °С; частота кадрів 6,25 Гц; частота рядків 2500 Гц; кількість рядків 280; розділення 175 елементів у рядку за контрасту 50 %; коефіцієнт розгортки 0,64. Розрахуйте: розміри ПВ; МПФ, виходячи із розділення у рядку; питому виявлювальну здатність.

Відповідь: $V_D = W_D = 50$ мкм; $M_s(v_x) = \exp(-8,8v_x^2)$;

$D_{\max}^* = 4,35 \cdot 10^{10}$ см $\sqrt{\text{Гц/Вт}}$ для ефективної шумової смуги 875 кГц.

Задача 4.7. Знайдіть $NETD$ для ТПСС, яка має такі параметри: діаметр вхідної зіниці 2 см; коефіцієнт пропускання об'єктива 0,8; ПВ – КРТ-лінійка із 150 елементами розміром 50×50 мкм²; робочий спектральний діапазон від 8 мкм до 11,5 мкм; питома виявлювальна здатність $2 \cdot 10^{10}$ см $\sqrt{\text{Гц/Вт}}$; поле зору 400×300 мрад² сканується через рядок (спочатку непарні рядки, потім парні) миттєвим полем 1×1 мрад²; частота кадрів 30 Гц.

Відповідь: $NETD = 0,36$ К.

Задача 4.8. Розрахуйте $MRTD$ ТПСС з паралельним скануванням лінійкою ПВ. ТПСС має такі параметри: $NETD = 0,36$ К; $\Delta f = 29,4$ кГц; $\alpha_D = \beta_D = 1,0$ мрад; $t_o = 26,7$ мкс; $f_f = 30$ Гц; $M_s(v_x) = \exp(-1,23v_x^2)$.

Побудуйте графіки функцій $M_s(v_x)$ і $MRTD(v_x)$.

Відповідь: $MRTD(v_x) = 0,49v_x \exp(1,23v_x^2)$.

Задача 4.9.* Тест-об'єкт у вигляді теплової міри з періодом 2 см, температурою фону 27 °С і коефіцієнтом випромінювання 0,97 міститься на відстані 10 м від ТПСС, яка має такі дані: оптична система 1,0/49 з коефіцієнтом пропускання 0,6; одно елементний КРТ-ПВ розміром 50×50 мкм² з максимальною питомою виявлювальною здатністю 2×10^{10} см $\sqrt{\text{Гц/Вт}}$ у робочому спектральному діапазоні від 8 мкм до

12 мкм; поле зору $20^\circ \times 15^\circ$; частота кадрів 25 Гц; дисплей з екраном розміром 24×18 см² міститься на відстані 1 м від оператора. МПФ дисплея описується функцією (4.84). Визначте $MRTD$ для даної міри.

Відповідь: $MRTD(v_x = 0,5 \text{ мрад}^{-1}) = 8,2 \text{ К}$.

Задача 4.10.* ТПСС спостерігає об'єкт, розміщений на рівномірному фоні, який має ефективну температуру $T_b = 288 \text{ К}$. Об'єкт розміром $V_t \times W_t = 2,3 \times 2,3 \text{ м}^2$ має ефективний температурний контраст $\Delta T = 2 \text{ К}$. ТПСС використовує об'єктив з фокусною відстанню $f'_o = 100 \text{ мм}$, діафрагмовим числом $k_{eff} = 1$, коефіцієнтом пропускання $\tau_o = 0,8$ та одно елементний ПВ із КРТ, який має розмір пікселя $V_D \times W_D = 50 \times 50 \text{ мкм}^2$ і питому виявлювальну здатність $D^* = 2 \cdot 10^{10} \text{ см}\sqrt{\text{Гц}}/\text{Вт}$. Відео підсилювач має смугу пропускання $\Delta f = 1 \text{ МГц}$. Атмосфера ослаблює випромінювання згідно із законом Бугера з показником ослаблення $0,2 \text{ км}^{-1}$. Розрахуйте максимальну дальність виявлення такої системи, якщо для забезпечення ймовірності виявлення 90 % ТПСС має забезпечити відношення сигнал/шум $SNR_d = 4,5$

Відповідь: $R_d = 3 \text{ км}$.

Задача 4.11. Розрахуйте максимальну дальність виявлення танкового тепловізора ALIS французької фірми SAGEM SA відповідно до стандарту НАТО 4247. Параметри тепловізора наведено у прикладі 4.5.1.

Відповідь: $R_d = 5 \text{ км}$.

Задача 4.12. Розрахуйте максимальну дальність розпізнавання об'єкта розміром $2,3 \times 2,3 \text{ м}^2$, що має ефективний температурний контраст 2 К. Об'єкт розміщений на рівномірному фоні з ефективною температурою 300К. ТПСС використовує об'єктив 1,8/220 з коефіцієнтом пропускання 0,45 і МСТ-ПВ у вигляді лінійки з 128 елементами розміром $30 \times 30 \text{ мкм}^2$. Питома виявлювальна здатність ПВ $D_m^* = 6 \cdot 10^{10} \text{ см}\sqrt{\text{Гц}}/\text{Вт}$, робочий спектральний діапазон від 7,7 мкм до 10,5 мкм. Показник ослаблення атмосфери $\kappa_A = 0,2 \text{ км}^{-1}$, ймовірність розпізнавання 50 %.

Відповідь: $R_r = 950 \text{ м}$.

Задача 4.13. Розрахуйте максимальну дальність розпізнавання, що забезпечує ТПСС Thermovision 880 фірми AGEMA (Швеція). Згідно з

проспектом ця система має такі характеристики: об'єktiv 1,0/110 з кутовим полем зору $2\omega_0 = 7^\circ$ та інтегральним коефіцієнтом пропускання 0,6; одноелементний МСТ-ПВ з розміром чутливої площадки 50×50 мкм² і питомою виявлювальною здатністю $D_m^* = 2 \cdot 10^{10}$ см $\sqrt{\text{Гц}}$ /Вт у робочому спектральному діапазоні від 8 мкм до 12 мкм; система сканування забезпечує роздільну здатність 140×289 елементів розкладення на кадр із частотою 25 Гц та ефективністю 0,64. ТПСС розпізнає автомобіль розміром 2×2 м² з ефективним температурним контрастом 2 К, розміщений на рівномірному фоні з ефективною температурою 300 К. Показник ослаблення атмосфери $\kappa_A = 0,3$ км⁻¹, ймовірність розпізнавання 0,9.

Відповідь: $R_r = 855$ м.

Задача 4.14. Визначте максимальну дальність виявлення ТПСС, вихідні дані для якої наведено у прикладі 4.5.2. Система має поле зору, яке забезпечує об'єktiv з фокусною відстанню $f'_0 = 231$ мм і діаметром вхідної зіниці $D_p = 118,5$ мм.

Відповідь: $R_d = 8,6$ км.

Задача 4.15. Розрахуйте необхідне число пар N_{Ei} штрихів еквівалентної міри Фуко, потрібне для ідентифікації зображення об'єкта з імовірністю $P_i = 90\%$.

Відповідь: $N_{Ei} \approx 11$.

РОЗДІЛ 5. ОСНОВИ ПРОЄКТУВАННЯ ПОЛЯРИМЕТРИЧНИХ ТЕПЛОВІЗОРІВ

5.1. Фізичні основи роботи поляриметричних тепловізорів

Як показано в попередніх розділах ТПСС використовуються для виявлення і розпізнавання цілей на основі реєстрації теплового радіаційного контрасту яскравості (інтенсивності) між об'єктом і фоном. За низького контрасту фоно- цільової обстановки (ФЦО) виявити ціль, а тим більше її розпізнати, достатньо складно. Для підвищення ймовірності виявлення і розпізнавання цілі, а також для зменшення хибних тривог, розпочали активно проводити дослідження і розробляти тепловізори, в яких носієм інформації є поляризаційні властивості випромінювання цілі і фону (завад) [30 - 32].

Поляризація випромінювання утворюється як за рахунок власного теплового випромінювання цілі, так і в результаті відбивання ціллю випромінювання від зовнішніх джерел. Деякі фони, наприклад, небо, водні поверхні також можуть поляризувати ІЧ випромінювання. Метою цього підрозділу є дослідження одного із методів виявлення теплоконтрастної цілі за допомогою тепловізора, де носієм інформації є відмінності в поляризаційних параметрах випромінювання цілі і фону [33].

5.1.1. Принципи формування поляриметричного зображення

Поляризаційні характеристики випромінювання, що змінюються під час розповсюдження і відбивання, зазвичай описують вектором Стокса, вектором Джонса або матрицею Мюллера [34]. Вектор Стокса був запропонований для дослідження частково поляризованого, а також неполяризованого і повністю поляризованого світла. Чотири параметра вектору Стокса $\vec{S} = \{S_0, S_1, S_2, S_3\}$ описують інформацію про стан поляризації цілі. Найбільшого розповсюдження отримав метод чотирьох сегментацій модуляції приймача випромінювання поляризаційним станом випромінювання для вимірювання вектору Стокса [32, 35].

На рис. 5.1 зображена схема, яка пояснює принцип роботи такого поляриметричного тепловізора (ПТ). Досліджуване частково поляризоване випромінювання з амплітудою $\vec{E}_{pp}$ проходить через поляризатор, четверть хвильову пластину, які можуть змінювати кут поляризації θ і різницю фаз ε між складовими E_x і E_y вектору $\vec{E}_{lp}$ за допомогою механічного обертання, або неперервної періодичної модуляції. МПВ формує групу значень інтенсивності вихідного випромінювання, які використовують для отримання чотирьох векторів Стокса поляриметричного зображення шляхом зміни кутів θ і ε .

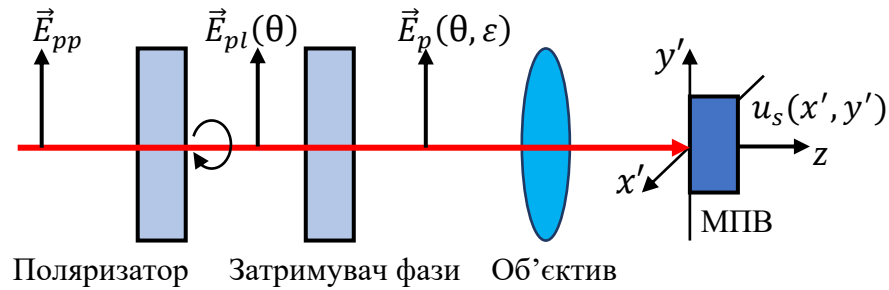


Рис. 5.1. Принцип роботи поляриметричного тепловізора

Вектори Стокса дозволяють отримати основні параметри поляризації випромінювання: інтенсивність, ступінь поляризації, кут поляризації і еліптичність поляризації.

Нехай частково поляризоване випромінювання з інтенсивністю I_0 і частотою ω розповсюджується уздовж осі z . Напруженість електричного поля $\vec{E}_{pp}$ розкладемо на дві плоскі хвилі $E_x(t)$ і $E_y(t)$, що поляризовані уздовж осей x і y :

$$E_x(t) = E_{x0}(t)\exp[j(\varphi_x(t) - \omega t)]; \quad (5.1)$$

$$E_y(t) = E_{y0}(t)\exp[j(\varphi_y(t) - \omega t)], \quad (5.2)$$

де $E_{x0}(t)$ і $E_{y0}(t)$ – амплітуди складових електричного поля уздовж осей x і y , що мають фази $\varphi_x(t)$ і $\varphi_y(t)$.

Хвилі $E_x(t)$ і $E_y(t)$ проходять через поляризатор з площиною поляризації, яка орієнтована під кутом θ відносно осі x , і фазову пластинку, що забезпечує фазовий кут ε між хвилями $E_x(t)$ і $E_y(t)$. Тому на виході

фазової пластини формується електричне поле, яке описується функцією

$$E(t, \theta, \varepsilon) = E_x \cos \theta + E_y \exp(j\varepsilon) \sin \theta. \quad (5.3)$$

Тоді інтенсивність результуючої хвилі

$$\begin{aligned} I(\theta, \varepsilon) &= \langle EE^* \rangle = \langle E_x E_x^* \rangle \cos^2 \theta + \langle E_y E_y^* \rangle \sin^2 \theta + \\ &+ \langle E_x E_y^* \rangle \cos \theta \exp(-j\varepsilon) \sin \theta + \langle E_x^* E_y \rangle \cos \theta \exp(j\varepsilon) \sin \theta = \\ &= I_x \cos^2 \theta + I_y \sin^2 \theta + 2\sqrt{I_x I_y} \cos \theta \sin \theta \cos(\delta - \varepsilon), \end{aligned} \quad (5.4)$$

де $\delta = \varphi_x - \varphi_y$ – фазовий кут між комплексними амплітудами E_x і E_y .

Рівняння (5.4) дозволяє отримати чотири параметри вектору Стокса, які залежать від кутів $\{\theta, \varepsilon\}$:

$$S_0 = I_x + I_y = I(0^\circ, 0) + I(90^\circ, 0); \quad (5.5)$$

$$S_1 = I_x - I_y = I(0^\circ, 0) - I(90^\circ, 0); \quad (5.6)$$

$$S_2 = 2\sqrt{I_x I_y} \cos \delta = I(45^\circ, 0) - I(135^\circ, 0); \quad (5.7)$$

$$S_3 = 2\sqrt{I_x I_y} \sin \delta = I\left(45^\circ, \frac{\pi}{2}\right) - I\left(135^\circ, \frac{\pi}{2}\right). \quad (5.8)$$

Частково поляризоване випромінювання можна подати у вигляді двох незалежних складових: неполяризованого (природнього) I_n і лінійно поляризованого (повністю поляризованого) I_p . Параметри Стокса частково поляризованого випромінювання можна виразити через дві складові:

$$S_{pp} = S_n + S_p, \quad (5.9)$$

де S_n і S_p – вектори Стокса для природнього і поляризованого випромінювання.

Ступінь поляризації визначається як

$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}, \quad (5.10)$$

а поляризаційна еліптичність визначається як

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{S_3}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}} \right). \quad (5.11)$$

В більшості випадків циркулярно поляризована компонента у випромінювання ФЦО є незначною і вважають, що складова вектору Стокса $S_3 = 0$. Тому розглядають ступінь лінійної поляризації (degree of linear polarization) $DoLP$, кут поляризації (орієнтації) θ_p та інші параметри для такого випадку:

$$P = DoLP = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}}{s_0}; \quad (5.12)$$

$$\theta_p = \tan^{-1} \left(\frac{s_2}{s_1} \right). \quad (5.13)$$

5.1.2. Поляриметричний метод виявлення цілі

Технологія детектування ІЧ поляризаційного зображення стала ефективним методом для вирішення проблем при виявленні і розпізнаванні цілі. Як правило поляризаційний стан цілі є частково поляризованим і може бути розкладено на суму лінійно поляризованих компонентів і компонентів природного випромінювання (рис. 5.2) [35, 36]. Компоненти природного випромінювання від цілі і фону подавляються (вилучаються), а використовуються тільки лінійно поляризовані компоненти для виявлення цілі і сегментації. На цій ідеї засновано ряд методів виявлення цілі і сегментації [36, 37], в яких використовуються вектор Стокса для аналізу випромінювання від цілі і фону з метою подавлення фону, усунення випадкового шуму і поліпшення поляризаційних характеристик цілі.

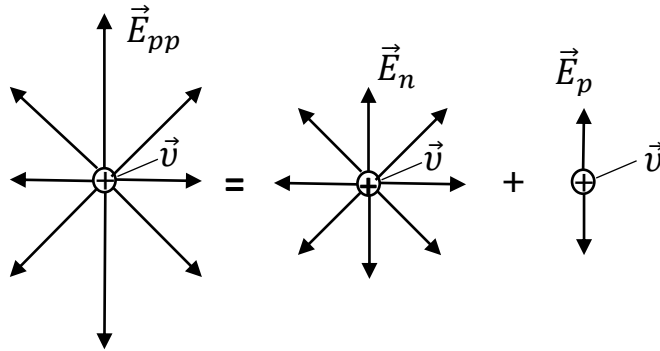


Рис. 5.2. Векторна модель частково поляризованого випромінювання цілі:

$$\vec{E}_{pp} = \vec{E}_n + \vec{E}_p$$

ІЧ випромінювання від цілі, світлова хвиля якого розглядається як частково поляризоване випромінювання, складається із суперпозиції інтенсивності поляризованого I_p і неполяризованого світла (природного випромінювання) I_n , тобто результуюча інтенсивність випромінювання ФЦО становить

$$I_{pp} = I_n + I_p. \quad (5.14)$$

Після проходження поляризатора (рис. 5.1), інтенсивність буде залежати від кута орієнтації θ_p частково поляризованого випромінювання відносно осі x та кута поляризації в напрямку спостереження (вимірювання) φ . Тоді згідно з законом Малюса маємо

$$I_{pp}(\varphi) = I_n(\varphi) + I_p(\varphi) = \frac{1}{2}I_n + I_p \cos^2(\varphi - \theta_p), \quad (5.15)$$

де $\frac{1}{2}I_n$ – природна компонента; $I_p \cos^2(\varphi - \theta_p)$ – лінійно поляризована компонента.

Ступінь поляризації визначимо за класичною формулою

$$P = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}}, \quad (5.16)$$

де $I_{\parallel}$ і $I_{\perp}$ – компоненти інтенсивності двох взаємно перпендикулярних компонентів поляризації, які отримуємо із формули (5.15):

$$I_{\parallel}(\varphi) = I(\theta_p) = I_n(\theta_p) + I_p(\theta_p) = \frac{1}{2}I_n + I_p; \quad (5.17)$$

$$I_{\perp}(\varphi) = I\left(\theta_p + \frac{\pi}{2}\right) = I_n\left(\theta_p + \frac{\pi}{2}\right) + I_p\left(\theta_p + \frac{\pi}{2}\right) = \frac{1}{2}I_n. \quad (5.18)$$

З рівнянь (5.16) – (5.18) отримаємо ступінь поляризації цільових пікселів та фонових пікселів

$$P = \frac{I_p}{I_n + I_p} = \frac{I_p}{I_{pp}}. \quad (5.19)$$

Використовуючи формулу (5.15), визначимо інтенсивність випромінювання, яке потрапляє на окремі (i, j) пікселі МПВ від цілі і фону в довільному напрямку поляризації:

$$I_{t;ij}(\varphi) = I_{t,n;i,j}(\varphi) + I_{t,p;i,j}(\varphi), \quad (5.20)$$

де $I_{t;ij}(\varphi)$ – інтенсивність випромінювання в напрямку поляризації φ , яке надходить від цілі на піксель i, j ; $I_{t,n;i,j}$ і $I_{t,p;i,j}$ – природній і лінійно поляризований компоненти цього випромінювання відповідно.

Аналогічно визначаємо інтенсивність випромінювання, яке надходить від фону:

$$I_{b;ij}(\varphi) = I_{b,n;i,j}(\varphi) + I_{b,t;i,j}(\varphi). \quad (5.21)$$

Із системи рівнянь (5.15), (5.16) і (5.20), (5.21) отримуємо модель поляриметричного тепловізора, яка визначає інтенсивність випромінювання, що надходить до МПВ від цілі і фону в довільному напрямку поляризації:

$$I_{t;ij}(\varphi) = I_{t;ij} \left[\frac{1}{2} (1 - P_{t;ij}) + P_{t;ij} \cos^2(\varphi - \theta_{pt;ij}) \right]; \quad (5.22)$$

$$I_{b;ij}(\varphi) = I_{b;ij} \left[\frac{1}{2} (1 - P_{b;ij}) + P_{b;ij} \cos^2(\varphi - \theta_{pb;ij}) \right]. \quad (5.23)$$

Рівняння (5.22) і (5.23) дозволяють побудувати поляризаційні еліпсоїди, в яких еліптичність еліпса – це ступінь поляризації, напрямок більшої осі – це напрямок поляризації θ_p еліпса, а вписане в еліпс коло є природньою складовою випромінювання. Лінійно поляризовані компоненти в напрямку кута поляризації θ_p є найбільшими, а в перпендикулярному напрямку дорівнюють нулю, як показано на рис. 5.3. Завдяки різниці між кутами фонові і цільові поляризації, знаходимо різницю інтенсивності $I(\theta_{pb;ij} - \frac{\pi}{2}) = I_{t;ij} - I_{b;ij}$ в перпендикулярному напрямку до кута фонові поляризації $\theta_{pb;ij}$, яка є інтенсивністю поляризаційної карти ФЦО. Ця карта містить інформацію про частково поляризоване випромінювання цілі та природного фону. Під час обробки сигналів з МПВ, напрямок кута поляризації фону може бути замінений на середнє значення кута поляризації межах усього зображення.

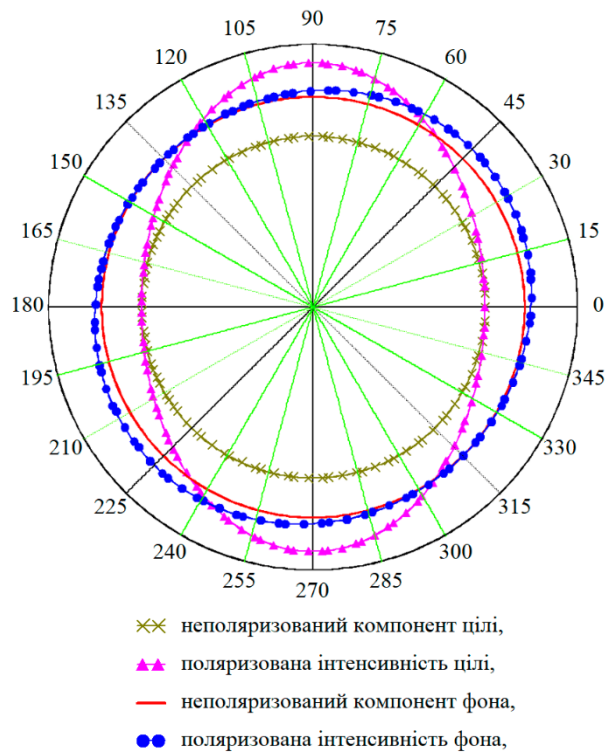


Рис. 5.3. Залежності інтенсивності поляризованого випромінювання цілі та фону від напрямку поляризації φ [34, 37, 38]

Отже, основна концепція поляриметричного методу виявлення цілі коротко полягає в наступному. На основі різниці між кутом цільової поляризації та кутом фонові поляризації повна поляризація в напрямку оптимального кута поляризації використовується таким чином, щоб зберегти якомога більше інформації цільової поляризації, і наскільки можливо більше вилучити інформацію про поляризацію фону. Для невеликої цілі, беручи невелику кількість пікселів, середнє значення кута фонові поляризації $\bar{\theta}_{pb}$ може бути апроксимовано за допомогою середнього кута поляризації $\bar{\theta}_p$ всього зображення, а потім обчислюється змінна складова поляризації $I\left(\bar{\theta}_p - \frac{\pi}{2}\right)$ в напрямку перпендикулярному до кута фону поляризації. Таким чином, повністю поляризовані компоненти в фоновому режимі можуть бути усунені, і повністю поляризовані компоненти від цілі будуть збережені.

Ціль малих розмірів, що знаходиться на великому фоні, не може бути виявленою за рахунок інтенсивності фоно-цільової обстановки. Тому доцільно використовувати повністю поляризовану компоненту, а природний компонент $I_n\left(\bar{\theta}_p - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{1}{2}I_n$ в поляризованому компоненті $I\left(\bar{\theta}_p - \frac{\pi}{2}\right)$ може бути вилучений. Таким чином, фонові інформація може бути практично повністю вилучена. Збережеться тільки повністю поляризований компонент цілі $I_{p,t}(\varphi)$, який визначається через кут виявлення цілі φ , тобто

$$I_{p,t}\left(\bar{\theta}_p - \frac{\pi}{2}\right) = I\left(\bar{\theta} - \frac{\pi}{2}\right) - \frac{1}{2}I_n. \quad (5.24)$$

5.1.3. Алгоритм отримання поляриметричних зображень за допомогою параметрів Стокса

Процес обробки відеосигналів МПВ поляриметричного тепловізора можна представити в такій послідовності [25, 37]:

1. Отримання тепловізійного зображення для трьох напрямків поляризації $I(\varphi_1), I(\varphi_2), I(\varphi_3)$. Використовуючи рівняння

$$I(\varphi_i) = \frac{1}{2} (S_0 + S_1 \cos 2\varphi_i + S_2 \sin 2\varphi_i) \quad (5.25)$$

обчислюємо параметри Стокса S_0, S_1, S_2 .

2. Знаходження для частково поляризованого випромінювання від цілі його складових:

- лінійно поляризованої $I_{t,p} = \sqrt{S_1^2 + S_2^2}$,

- природної $I_{t,n} = S_0 - \sqrt{S_1^2 + S_2^2}$.

3. Обчислення лінійно поляризованої складової для напрямку поляризації $\bar{\theta}_p - \frac{\pi}{2}$, перпендикулярному до середнього значення кута поляризації $\bar{\theta}_p$.

4. Отримання лінійно поляризованої складової випромінювання від цільових пікселів. Для цього вилучають природний компонент поляризації $I_n \left(\bar{\theta}_p - \frac{\pi}{2} \right) = \frac{1}{2} I_n$ із компонента змінної поляризації $I \left(\bar{\theta}_p - \frac{\pi}{2} \right)$, зберігаючи при цьому лінійно поляризовану складову $I_{p,t}(P)$ від цільових пікселів.

5. Отримане значення інтенсивності (електричного сигналу від МПВ) порівнюється з пороговим значенням для забезпечення виявлення цілі на фоні завад з заданою ймовірністю.

5.1.4. Приклади розрахунку характеристик частково поляризованого випромінювання

Приклад 5.1.1. Використовуючи формулу (5.25) розрахуйте параметри вектору Стокса для напрямків поляризації $\varphi_i = \theta_i = 0^\circ; 90^\circ; 45^\circ; 135^\circ$.

Розв'язання. 1. Знаходимо інтенсивності випромінювання для різних напрямків поляризації.

Для кута поляризації $\varphi_1 = 0^\circ$ маємо:

$$I(\varphi_1) = \frac{1}{2} (S_0 + S_1 \cos 0^\circ + S_2 \sin 0^\circ) = \frac{1}{2} (S_0 + S_1).$$

Для кута поляризації $\varphi_2 = 90^\circ$ маємо:

$$I(\varphi_2) = \frac{1}{2} (S_0 + S_1 \cos 180^\circ + S_2 \sin 180^\circ) = \frac{1}{2} (S_0 - S_1).$$

Для кута поляризації $\varphi_3 = 45^\circ$ маємо:

$$I(\varphi_3) = \frac{1}{2} (S_0 + S_1 \cos 90^\circ + S_2 \sin 90^\circ) = \frac{1}{2} (S_0 + S_2).$$

Для кута поляризації $\varphi_4 = 135^\circ$ маємо:

$$I(\varphi_4) = \frac{1}{2}(S_0 + S_1 \cos 270^\circ + S_2 \sin 270^\circ) = \frac{1}{2}(S_0 - S_2).$$

2. Розв'язуємо систему рівнянь:

$$S_0 + S_1 = 2I(0^\circ); S_0 - S_1 = 2I(90^\circ); S_0 + S_2 = 2I(45^\circ); S_0 - S_2 = 2I(135^\circ).$$

$$S_0 = I(0^\circ) + I(90^\circ); S_1 = I(0^\circ) - I(90^\circ); S_2 = I(45^\circ) - I(135^\circ).$$

Приклад 5.1.2. Визначте ступінь поляризації випромінювання від цілі, параметри вектора Стокса якого наведені у прикладі 5.1.1.

Розв'язання. 1. Ступінь поляризації випромінювання визначається за формулою (5.12). Згідно до результатів прикладу 5.1.1, вектор Стокса має такі параметри $S_0 = I(0^\circ) + I(90^\circ)$; $S_1 = I(0^\circ) - I(90^\circ)$; $S_2 = I(45^\circ) - I(135^\circ)$. Підставимо ці параметри до формули (5.12):

$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} = \frac{\sqrt{[I(0^\circ) - I(90^\circ)]^2 + [I(45^\circ) - I(135^\circ)]^2}}{I(0^\circ) + I(90^\circ)}.$$

2. На практиці для розрахунку ступеня поляризації часто застосовують класичну формулу (5.16), де $I_{\parallel} = I_{\max} = \frac{1}{2}(S_0 + S_1)$ та $I_{\perp} = I_{\min} = \frac{1}{2}(S_0 - S_1)$ – компоненти інтенсивності двох взаємно перпендикулярних компонентів поляризації, які отримуємо із формули (5.15). Тоді

$$P = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}} = \frac{\frac{1}{2}(S_0 + S_1) - \frac{1}{2}(S_0 - S_1)}{\frac{1}{2}(S_0 + S_1) + \frac{1}{2}(S_0 - S_1)} = \frac{S_1}{S_0}.$$

5.2. Ймовірності виявлення і розпізнавання поляриметричних зображень об'єктів

Величина відношення сигнал/шум SNR_E , що сприймає оператор, визначає ймовірність розпізнавання зображення об'єкта P_r , яка може бути розрахована за формулою

$$P_r = \frac{(SNR_E)^k}{1 + (SNR_E)^k}, \quad (5.26)$$

де $k = 2,7 + 0,7SNR_E$ [39].

В табл. 5.1 наведено числові значення функції (5.26).

Таблиця 5.1

**Залежність ймовірності розпізнавання P_r від відношення
сигнал/шум SNR_E**

SNR_E	P_r	SNR_E	P_r	SNR_E	P_r
0	0,000	1,0	0,500	2,0	0,945
0,1	0,002	1,1	0,582	2,1	0,957
0,2	0,010	1,2	0,656	2,2	0,966
0,3	0,029	1,3	0,721	2,3	0,973
0,4	0,061	1,4	0,776	2,4	0,979
0,5	0,108	1,5	0,821	2,5	0,983
0,6	0,169	1,6	0,858	2,6	0,987
0,7	0,243	1,7	0,887	2,7	0,990
0,8	0,326	1,8	0,911	2,8	0,992
0,9	0,413	1,9	0,930	2,9	0,994

Ефективність роботи поляриметричного тепловізора можна оцінити двома параметрами [39]:

1. Контрастом цілі у вихідному зображенні

$$C = \frac{u_t - u_b}{u_t + u_b}, \quad (5.27)$$

де $u_t \sim I_{p,t} \left(\bar{\theta}_p - \frac{\pi}{2} \right)$ – електричний відеосигнал, сформований цільовим пікселем; $u_b \sim I_{t,n} \left(\bar{\theta}_p - \frac{\pi}{2} \right) - I_{b,n} \left(\bar{\theta}_p - \frac{\pi}{2} \right)$ – електричний відеосигнал, сформований цільовим і фоновим пікселями.

2. Відношенням сигнал/шум в поляризаційному зображенні ФЦО

$$SNR = \frac{u_t - u_b}{\sigma_b}, \quad (5.28)$$

де σ_b – середньоквадратичне значення флуктуацій сигналу від фонових пікселів.

Таким чином, використовуючи систему рівнянь (5.26) і (5.28) можна визначити ймовірність розпізнавання цілі.

5.2.1. Приклад розрахунку ймовірності

Розглянемо частково поляризоване випромінювання цілі, яке має такі параметри: інтенсивність I_0 , ступінь поляризації P , кут поляризації ψ , кут еліптичності χ (рис. 5.4). Ці параметри визначаються параметрами вектора

Стокса (5.5) – (5.8):

$$I_0 = S_0; P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}; \psi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{S_2}{S_1} \right); \chi = \pm \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right). \quad (5.29)$$

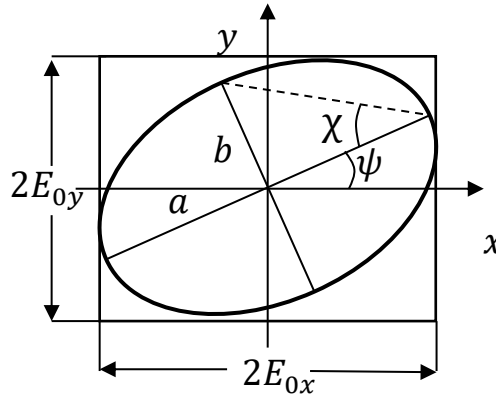


Рис. 5.4. Поляризаційний еліпс

Розташуємо ПТ так, щоб кут поляризації $\psi = \theta_p$ дорівнював нулю. Тоді із формул (5.13) для $\psi = 0$ маємо $S_2 = 0$, а формули (5.29) набудуть вигляду:

$$I_0 = S_0; P = \frac{S_1}{S_0}; \chi = \pm \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right). \quad (5.30)$$

Визначимо сигнал на виході МПВ, який утворений частково поляризованим випромінюванням, що має параметри (5.30):

$$u_t \sim I_{p,t}(P) = |I_{p,t}(0)| = I_{p,t}(0^\circ, 0) = I_{0tp} \quad (5.31)$$

для середнього значення кута поляризації $\bar{\theta}_p = \psi = 0^\circ$.

Для неполяризованої складової випромінювання цілі маємо

$$I_{t,n} \left(\frac{\pi}{2} \right) = \frac{1}{2} I_{0tn}.$$

Якщо випромінювання фону є неполяризованим, то $I_{b,n} \left(\frac{\pi}{2} \right) = \frac{1}{2} I_{0bn}$. Тоді електричний відеосигнал, сформований різницею інтенсивності між цільовим і фоновим пікселями буде дорівнювати

$$u_b \sim I_{t,n} \left(\frac{\pi}{2} \right) - I_{b,n} \left(\frac{\pi}{2} \right) = \frac{1}{2} |I_{0tn} - I_{0bn}|. \quad (5.32)$$

Підставимо (5.31) і (5.32) до (5.28). Маємо

$$SNR = \frac{1}{\sigma_b} \left[I_{0tp} - \frac{1}{2} |I_{0tn} - I_{0bn}| \right]. \quad (5.33)$$

Встановимо зв'язок між інтенсивністю лінійно поляризованої складовою частково поляризованого випромінювання від цілі і ступенем його поляризації, використовуючи співвідношення [1, 35, 40]

$$P = \frac{I_{otp}}{I_{otp} + I_{otn}}, \quad (5.34)$$

де $I_{otp} + I_{otn} = I_0$ – загальна інтенсивність частково поляризованого випромінювання.

Із формули (5.34) маємо:

$$I_{otp} = I_0 P \text{ і } I_{otn} = I_0 (1 - P). \quad (5.35)$$

Тоді відношення сигнал/шум (5.33) на виході ПТ буде визначатись співвідношенням

$$SNR_E = \frac{1}{\sigma_b} [I_0 P - 0,5 |I_0 (1 - P) - I_{obn}|] = \frac{I_0}{\sigma_b} \left[P - 0,5 \left| 1 - P - \frac{I_{obn}}{I_0} \right| \right], \quad (5.36)$$

де σ_b – середньоквадратичне значення флуктуацій сигналу від фонових пікселів.

На рис. 5.5 наведено графік залежності відношення сигнал/шум на виході ПТ від ступеня поляризації випромінювання цілі за умов [39]:

- Неполаризована складова випромінювання цілі $I_{otn} = 0,5 I_0 (1 - P)$;
- Неполаризована складова випромінювання фону $I_{obn} = 0,99 I_0$;
- Середньоквадратичне значення флуктуацій сигналу від фонових пікселів. $\sigma_b = 0,05 I_0$.

Після підстановки наведених умов у рівняння (5.36) маємо:

$$SNR_E = 20 [P - 0,5(P - 0,01)]. \quad (5.37)$$

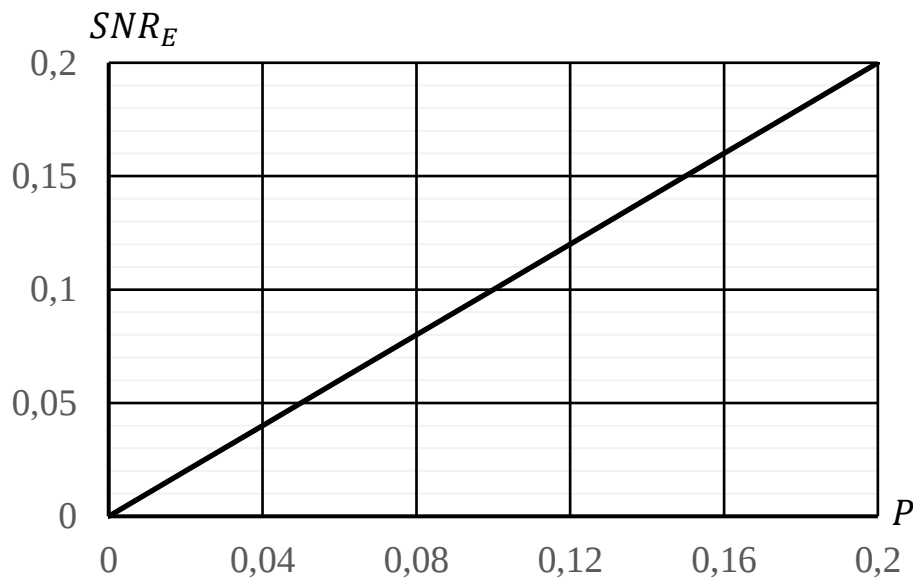


Рис. 5.5. Залежність відношення сигнал/шум SNR_E на виході поляриметричного тепловізора від ступеня поляризації випромінювання від цілі за умов (5.37)

Аналіз залежностей (5.37) і (5.33) дозволяє зробити такі висновки:

1. Відношення сигнал/шум SNR_E залежить від ступеня поляризації випромінювання цілі і фону;
2. Відношення сигнал/шум SNR_E лінійно збільшується і досягає максимального значення, коли неполяризована складова випромінювання від цілі I_{0tn} дорівнює інтенсивності неполяризованого випромінювання фону I_{0bn} ;
3. Якщо в ПТ використовується високоякісна мікроболометрична матриця з малим значенням середньоквадратичних флуктуацій сигналу від пікселів, то відношення сигнал/шум SNR_E також збільшується.

За цих умов із системи рівнянь (5.37) і (5.26) отримаємо залежність ймовірності розпізнавання від ступеня поляризації випромінювання від цілі, яка наведена на рис. 5.6.

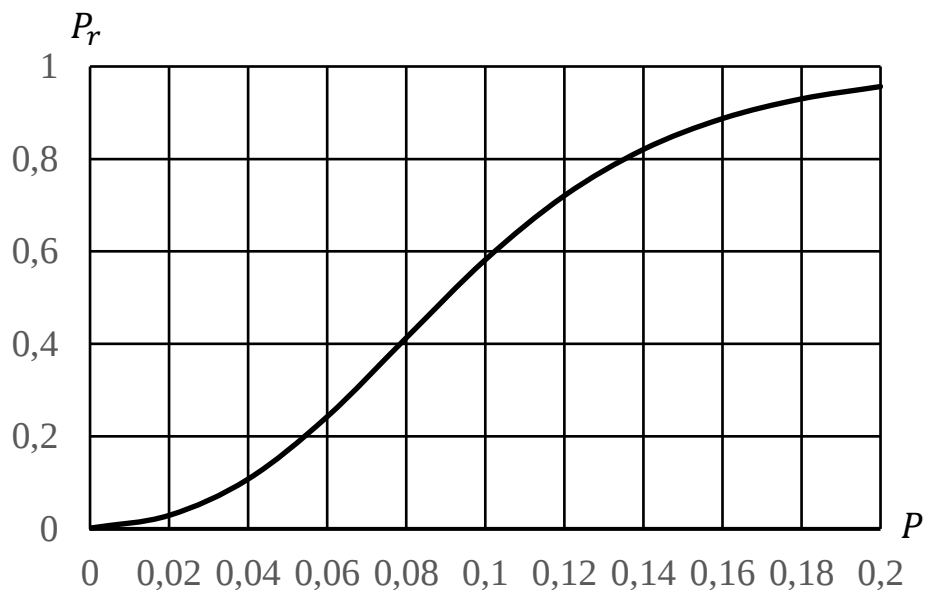


Рис. 5.6. Залежність ймовірності розпізнавання цілі P_r від ступеня поляризації P випромінювання цілі, яка розташована на природньому фоні

Аналіз отриманих результатів свідчить про таке:

1. Ймовірність розпізнавання цілі істотно залежить від ступеня поляризації випромінювання цілі, за умови, що вона знаходиться на фоні, який випромінює некогерентно. Наприклад, ймовірність розпізнавання дорівнює $P_r = 50\%$, коли ступінь поляризації випромінювання $P = 9\%$. Якщо $P = 16\%$, то $P_r = 90\%$;

2. Із формули (5.32) видно, що у випадку відсутності контрасту між некогерентним випромінюванням цілі і фону, тобто коли $I_{0tn} = I_{0bn}$, відношення сигнал/шум на виході ПТ буде дорівнювати $SNR_E = \frac{PI_{0tp}}{\sigma_b} = 1,8$, а ймовірність розпізнавання – $P_r = 90\%$. Така особливість роботи поляриметричного тепловізора значно підвищує ефективність його застосування.

5.3. Поляриметрична модель теплоконтрастних об'єктів спостереження

Об'єктом дослідження в цьому підрозділі є поляризаційні характеристики теплового випромінювання об'єктів і можливість їх використання для побудови поляриметричних тепловізорів [8, 14].

5.3.1. Моделювання поляризації теплового випромінювання

В даний час практично в усіх галузях науки і техніки широко розповсюджені методи моделювання. Це пояснюється тим, що моделювання спрощує і прискорює пошук правильних рішень, є вигідним економічно і зручним в використанні.

В загальному випадку поляризація власного випромінювання матеріалів виникає із-за явищ відбивання і заломлення на межі «середовище – повітря», які описуються теорією відбивання для металів і діелектриків [36]. При цьому ступінь поляризації власного випромінювання поверхні підвищується зі збільшенням кута між напрямком випромінювання і нормаллю до поверхні випромінювання.

Об'єкти з температурою більшою за абсолютний нуль випромінюють світлову енергію за рахунок зміни енергетичного стану електронних, коливальних і обертальних переходів атомів і молекул. В основі опису теплового випромінювання об'єктів лежить формула Планка, яка визначає спектральну світність поверхні абсолютно чорного тіла (АЧТ) [4, 8]

$$M_{bb}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}, \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{мкм}}, \quad (5.38)$$

де $c_1 = 37415 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мкм}^4$, $c_2 = 14388 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ – постійні коефіцієнти; λ – довжина хвилі, мкм.

Спектральна світність поверхні, яка не є АЧТ, визначається як

$$M(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) M_{bb}(\lambda, T), \quad (5.39)$$

де $\varepsilon(\lambda, T)$ – спектральний коефіцієнт випромінювання, величина якого менша за одиницю.

Якщо поверхня об'єкта випромінює за законом Ламберта, то спектральна енергетична яскравість визначається за формулою

$$L(\lambda, T) = \frac{1}{\pi} \varepsilon(\lambda, T) M_{bb}(\lambda, T) \cos \psi, \quad (5.40)$$

де $\psi = \theta_v = \theta_t$ – кут спостереження елемента поверхні об'єкта (рис. 5.7).

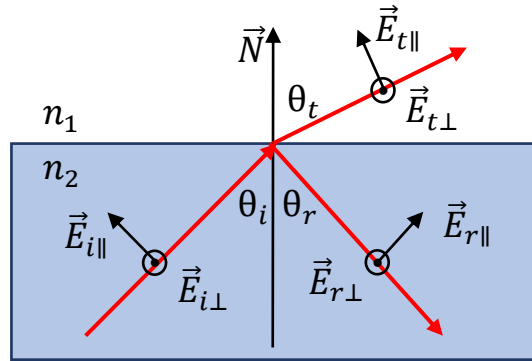


Рис. 5.7. Схема пояснення поляризації власного теплового випромінювання об'єкта: n_1 і n_2 – показники заломлення повітря і метала відповідно; $\vec{N}$ – нормаль до елемента поверхні; θ_i , θ_r і θ_t – кути падіння, відбивання і заломлення (кут спостереження θ_v) відповідно

Згідно формули (5.40), яскравість власного випромінювання об'єкта спостереження формується двома процесами:

1. Безпосереднє випромінювання об'ємом об'єкта, яке описується функцією Планка, і залежить від температури об'єкта.
2. Внесок поверхні об'єкта, який визначається коефіцієнтом випромінювання поверхні і станом її шорсткості. При цьому коефіцієнт випромінювання $\varepsilon(\lambda, T)$ залежить від комплексного показника заломлення $n_c = n + j\kappa$ середовища.

За умови термодинамічної рівноваги для непрозорих середовищ

коефіцієнт поглинання $\alpha(\lambda, T)$ дорівнює коефіцієнту випромінювання $\varepsilon(\lambda, T)$ [8, 41], а спектральні енергетичні коефіцієнти відбивання $R(\lambda, T)$ і випромінювання $\varepsilon(\lambda, T)$ пов'язані між собою співвідношенням

$$\varepsilon(\lambda, T) = 1 - R(\lambda, T). \quad (5.41)$$

Ступінь поляризації власного випромінювання визначається відмінністю коефіцієнтів випромінювання поверхні об'єкта $\varepsilon_{\parallel}$ і $\varepsilon_{\perp}$ для компонентів цього випромінювання, поляризованих в площині заломлення і перпендикулярній площині відповідно. Величина ступеня поляризації власного випромінювання поверхні об'єкта визначається за формулою

$$P = \frac{L_{\parallel}(\lambda, T; x, y) - L_{\perp}(\lambda, T; x, y)}{L_{\parallel}(\lambda, T; x, y) + L_{\perp}(\lambda, T; x, y)} = \frac{\varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp}}. \quad (5.42)$$

Значення $\varepsilon_{\parallel}$ і $\varepsilon_{\perp}$ для непрозорих середовищ визначається за формулами Френеля [1, 34, 35], які характеризують залежність поляризаційних складових коефіцієнта випромінювання від дійсної і уявної частини комплексного показника заломлення $n_c = n - j\kappa$:

$$\varepsilon_{\parallel} = \frac{4n\cos\psi}{(n\cos\psi + 1)^2 + \kappa^2\cos^2\psi}; \quad (5.43)$$

$$\varepsilon_{\perp} = \frac{4n\cos\psi}{(n + \cos\psi)^2 + \kappa^2}. \quad (5.44)$$

Загальний коефіцієнт випромінювання обчислюється як середня величина паралельної і перпендикулярної компонентів:

$$\varepsilon(\psi) = \frac{\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp}}{2}. \quad (5.45)$$

Ступень поляризації власного випромінювання поверхні об'єкта отримаємо шляхом підстановки (5.43) і (5.44) до формули (5.42):

$$P(\psi) = DoLP(\psi) = \frac{(n^2 + \kappa^2 - 1)\sin\psi}{(n^2 + \kappa^2 + 1)(1 + \cos^2\psi) + 4n\cos\psi}. \quad (5.46)$$

Ступінь поляризації власного випромінювання матеріалів визначається станом поверхні, а також дійсною і уявною складовими комплексного показника заломлення. Наприклад, для скла ($1 < n < 2$, $\kappa \ll 1$) випромінювання поляризоване менше, ніж для металів ($\sqrt{n^2 + \kappa^2} > 3,3$).

Поряд з власним випромінюванням на поверхню об'єкта падає зовнішнє ІЧ випромінювання, яке відбивається і заломлюється. Розглянемо особливості відбитого випромінювання, яке сприймається тепловізором. Оскільки при відбиванні і заломленні відбувається часткова поляризація

світла, то вирішити поставлену задачу безпосередньо для природного світла досить складно. Для спрощення розв'язання цієї задачі розглянемо модель природного світла, в якій його вектор $\vec{E}_n$ представимо у вигляді суми двох хвиль, що є лінійно поляризованими в двох взаємно перпендикулярних площинах, мають однакову інтенсивність і розповсюджуються в напрямку природного світла (рис. 5.8).

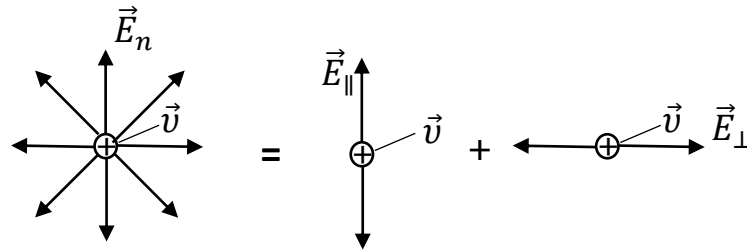


Рис. 5.8. Модель природного світла

Математично це можна представити у вигляді співвідношень

$$\vec{E}_n = \vec{E}_{\parallel} + \vec{E}_{\perp}; \quad I_n = I_{\parallel} + I_{\perp}; \quad I_{\parallel} = I_{\perp} = 0,5I_n, \quad (5.47)$$

де $\vec{E}_{\parallel} = \vec{E}_p$ – вектор лінійно поляризованої хвилі, площина поляризації якої паралельний площині падіння променю; $\vec{E}_{\perp} = \vec{E}_s$ – вектор лінійно поляризованої хвилі, площина поляризації якої перпендикулярна до площині падіння променю; $I_n, I_{\parallel}, I_{\perp}$ – інтенсивності світлових хвиль $\vec{E}_n, \vec{E}_{\parallel}, \vec{E}_{\perp}$ відповідно.

Нехай на межу «повітря – метал» під кутом θ_i падає природне випромінювання, яке відбивається і заломлюється в метал (рис. 5.9). Визначимо параметри відбитого випромінювання, використовуючи модель природного світла у вигляді двох лінійно поляризованих у взаємно перпендикулярних площинах складових $\vec{E}_{\parallel} \perp \vec{E}_{\perp}$.

Енергетичні коефіцієнти відбивання для паралельної $R_{\parallel}$ і перпендикулярної $R_{\perp}$ складових визначаються за формулами Френеля [6–9]

$$R_{\parallel} = \left| \frac{E_{R0\parallel}}{E_{n0\parallel}} \right|^2 = \left| \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \right|^2; \quad (5.48)$$

$$R_{\perp} = \left| \frac{E_{R0\perp}}{E_{n0\perp}} \right|^2 = \left| \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right|^2. \quad (5.49)$$

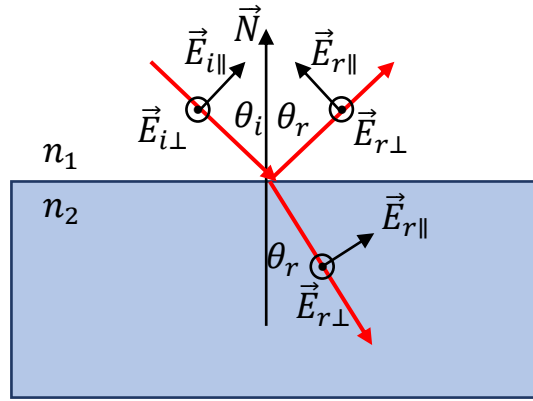


Рис. 5.9. Схема пояснення поляризації відбитого випромінювання

Кут падіння θ_i і кут заломлення θ_t пов'язані між собою законом Снелла

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t. \quad (5.50)$$

При нормальному падінні випромінювання на поверхню метала ($\theta_i = 0^\circ$) формули (5.48) і (5.49) мають вигляд

$$R_{\parallel} = R_{\perp} = \frac{(n_2 - 1)^2 + \kappa^2}{(n_2 + 1)^2 + \kappa^2}. \quad (5.51)$$

Часткові енергетичні коефіцієнти відбивання можна розрахувати на підставі співвідношення (5.51) як

$$R_{\parallel} = 1 - \varepsilon_{\parallel} \text{ і } R_{\perp} = 1 - \varepsilon_{\perp}. \quad (5.52)$$

Ступінь поляризації відбитого випромінювання визначається як

$$P(\theta_r) = \frac{R_{\parallel}(\theta_r) - R_{\perp}(\theta_r)}{R_{\parallel}(\theta_r) + R_{\perp}(\theta_r)}. \quad (5.56)$$

Величина відбитого від об'єкта випромінювання залежить від інтенсивності зовнішнього випромінювання і в більшості випадків вона буде меншою за власне випромінювання. В такому випадку її впливом на поляризаційну модель можна знехтувати. В деяких випадках при наявності близько розташованих біля об'єкта завод з високою температурою необхідно враховувати відбите випромінювання, джерелом якого є завод.

5.3.2. Поляризаційний еліпс

Розглянемо розповсюдження плоскої електромагнітної хвилі уздовж осі z (рис. 5.10) [40]. В загальному випадку монохроматична хвиля описується рівнянням

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0(\vec{r}) \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \delta), \quad (5.57)$$

де $\vec{E}_0(\vec{r})$ – постійна амплітуда в точці $P(x, y, z)$; ω і δ – частота і початкова фаза хвилі відповідно; $\vec{k}$ – хвильовий вектор, який направлений уздовж розповсюдження хвилі; $\vec{r}$ – радіус-вектор що визначає координати точки $P(x, y, z)$.

Скалярний добуток двох векторів $\vec{k}$ і $\vec{r}$ визначається рівнянням

$$\vec{k}\vec{r} = \frac{2\pi}{\lambda} (x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma), \quad (5.58)$$

де λ – довжина хвилі; $\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma$ – направляючі косинуси, які визначають напрямок розповсюдження хвилі. У світловій хвилі вектор напруженості електричного поля $\vec{E}$ завжди перпендикулярний до напрямку розповсюдження хвилі, тобто $\vec{E} \perp \vec{k}$.

Розглянемо компоненти вектору $\vec{E}$ в площині xy (рис. 5.9):

$$E_x(x, y, t) = E_{0x}(x, y) \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \delta_x), \quad (5.59)$$

$$E_y(x, y, t) = E_{0y}(x, y) \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \delta_y), \quad (5.60)$$

$$E_z(x, y, t) = 0. \quad (5.61)$$

Встановимо взаємозв'язок між компонентами E_x і E_y шляхом вилучення із рівнянь (5.59) і (5.60) змінної часу t [40]:

$$\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 - 2 \frac{E_x}{E_{0x}} \frac{E_y}{E_{0y}} \cos \delta = \sin^2 \delta, \quad (5.62)$$

де $\delta = \delta_x - \delta_y$.

Рівняння (5.62) називається *рівнянням поляризаційного еліпса з кутом поляризації (орієнтації) ψ* , який визначається рівнянням (рис. 5.4)

$$\operatorname{tg} 2\psi = \frac{2E_{0x}E_{0y}}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2} \cos \delta. \quad (5.63)$$

Форма еліпса визначається *кутом еліптичності χ* як відношення величини меншої осі еліпса a до більшої осі b :

$$\operatorname{Tg} \chi = \pm \frac{b}{a}. \quad (5.64)$$

Через компоненти електричного поля E_{0x} і E_{0y} кут еліптичності можна виразити як

$$\operatorname{Sin} 2\chi = \frac{2E_{0x}E_{0y} \sin \delta}{E_{0x}^2 + E_{0y}^2}. \quad (5.65)$$

В загальному випадку еліпс (5.62) розташований всередині прямокутника розміром $2E_{0x} \times 2E_{0y}$ і дотикається його контуру в чотирьох

точках (рис. 5.10). Якщо третій доданок в рівнянні (5.62) дорівнює нулю, то осі еліпса є паралельними осям x і y .

Форму еліпса можна представити у вигляді лінійної і циркулярної поляризації. Лінійна поляризація виникає у випадку, коли різниця фаз δ дорівнює 0° або 180° .

Якщо $\psi = \pi$, то рівняння (5.62) трансформується в рівняння прямої

$$E_y = \pm \frac{E_{0y}}{E_{0x}} E_x. \quad (5.66)$$

Рівняння (5.66) характеризує лінійно поляризоване світло, для якого кут поляризації ψ визначається за формулою $\operatorname{tg}\psi = \frac{E_{0y}}{E_{0x}}$. Кут еліптичності χ для лінійно поляризованого світла дорівнює нулю.

Результуючий вектор $\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_y$ обертається за годинниковою стрілкою, коли $\sin\delta > 0$ (R-поляризація). Якщо $\sin\delta < 0$, то вектор $\vec{E}$ обертається проти годинникової стрілки (L-поляризація). Стан поляризації визначається відношенням осей еліпса, кутом орієнтації ψ і R- L-поляризаціями.

Якщо $E_{0x} = E_{0y} = E_{0c}$, а $\delta = 2\pi$, то рівняння (5.62) набуде вигляду

$$E_x^2 + E_y^2 = E_{0c}^2. \quad (5.67)$$

Рівняння (5.67) характеризує циркулярно поляризоване світло.

Узагальнене рівняння (5.62) цього виду поляризації можна представити у вигляді:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 2\frac{xy}{ab}\cos\delta = \sin^2\delta, \quad (5.62')$$

де $x = E_o$; $a = E_{o1}$; $y = E_e$; $b = E_{e1}$.

Рівняння (5.62') є рівнянням еліпса, який довільно орієнтований відносно оптичної осі ox кристала (рис. 5.4). Орієнтація еліпса визначається кутом ψ , а форма еліпса – кутом χ . В залежності від цих кутів еліптично поляризоване світло перетворюється в лінійно поляризоване світло, а також в циркулярно поляризоване світло з обертанням результуючого вектору $\vec{E}_r = \vec{x} + \vec{y}$ вправо або вліво.

Розглянемо часткові випадки рівняння (5.62'), коли

1. $\delta = 0$. Тоді $\sin\delta = 0$ і $\cos\delta = 1$, а рівняння (5.62') перетворюється в рівняння прямої $y = \left(\frac{b}{a}\right)x$ (рис. 5.10,а). Аналогічно, якщо $\delta = \pi$. Тоді $\sin\delta = 0$ і $\cos\delta = -1$, а рівняння (5.62') перетворюється в рівняння прямої

$y = -\left(\frac{b}{a}\right)x$ (рис. 5.10,б).

2. $\delta = \frac{\pi}{2}$ і $E_{o1} = E_{e1} = R$. Тоді $\sin\delta = 1$ і $\cos\delta = 0$, а рівняння (5.62') перетворюється в рівняння кола $E_x^2 + E_y^2 = R^2$ (рис. 5.10,в). Аналогічно, при $\delta = -\frac{\pi}{2}$ маємо рівняння кола.

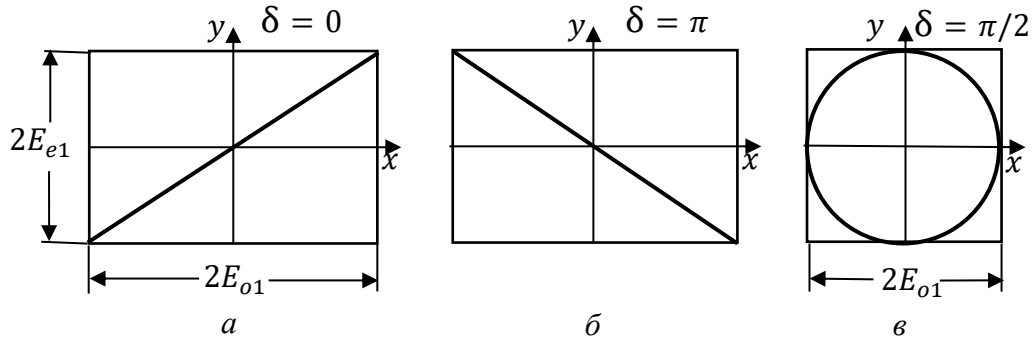


Рис. 5.10. Траєкторії, які відповідають лінійній (а, б) та циркулярній (в) поляризації

Із рівняння (5.62') і рис. 5.4 можна отримати такі співвідношення:

$$\operatorname{tg}\chi = \frac{b}{a}; \quad (5.68)$$

$$\operatorname{tg}2\psi = \frac{2\frac{b}{a}}{1-\left(\frac{b}{a}\right)^2} \cos\delta; \quad (5.69)$$

$$\sin2\chi = \frac{2\frac{b}{a}}{1+\left(\frac{b}{a}\right)^2} \sin\delta. \quad (5.70)$$

Додатковою характеристикою еліптично поляризованого світла є напрямок обертання результуючого вектору $\vec{E}_r = \vec{x} + \vec{y}$. Якщо різниця фаз δ лежить в межах від 0 до π , то вектор $\vec{E}_r$ обертається за годинниковою стрілкою (вправо). Якщо різниця фаз δ лежить в межах від π до 2π , то вектор $\vec{E}_r$ обертається проти годинникової стрілкою (вліво).

5.4. Приклади розрахунку характеристик поляриметричного тепловізора

Приклад 5.4.1. Граничний кут повного внутрішнього відбивання на межі деякої речовини з повітрям дорівнює 45° . Визначте:

а) кут повної поляризації на межі речовина-повітря і повітря-

речовина;

б) частковий і загальний енергетичні коефіцієнти відбивання при падінні променю під кутом повної поляризації;

в) ступінь поляризації заломленого променю, коли відбитий промінь повністю поляризований.

Розв'язання. а) Із формули для кута повного внутрішнього відбивання (1.10) [14] знаходимо $n_1 = \frac{n_2}{\sin \varepsilon_{\text{пво}}} = \frac{1}{\sin 45^\circ} = 1,414$. Тоді за формулою (8.7) [14] визначаємо кут повної поляризації (кут Брюстера) на межі речовина-повітря:

$$\varepsilon_{B1} = \arctg\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \arctg\left(\frac{1}{1,414}\right) = 35^\circ 16'.$$

Кут повної поляризації при зворотному напрямку розповсюдження із повітря в речовину дорівнює:

$$\varepsilon_{B2} = \arctg\left(\frac{n_1}{n_2}\right) = \arctg\left(\frac{1,414}{1}\right) = 54^\circ 44'.$$

б) Частковий енергетичний коефіцієнт відбивання при $\varepsilon_1 = \varepsilon_B$ визначаємо за формулою (8.6) [40] $R_\perp = \sin^2(\varepsilon_{B2} - \varepsilon'_2) = \sin^2(54^\circ 44' - 35^\circ 16') = 0,111$. При цьому інший частковий енергетичний коефіцієнт відбивання $R_\parallel = 0$, а повний енергетичний коефіцієнт відбивання (по відношенню до падаючого природного світла) дорівнює $R = 0,5 \cdot 0,111 = 0,055$.

в) Ступінь поляризації заломленого променя при $\varepsilon_1 = \varepsilon_B$ визначаємо за формулою (8.10) [40]

$$P_D = \frac{R_\perp}{2 - R_\perp} = \frac{0,111}{2 - 0,111} = 0,059.$$

При цьому $P_R = 1$, а відбитий промінь повністю поляризований в площині, яка є перпендикулярною до площини падіння.

Приклад 5.4.2. Розрахуйте параметри вектору Стокса для горизонтально-право еліптично поляризованого світла, в якому для осей виконується умова: $a = 2b$, $r = S_0 = 1$.

Розв'язання. Вектор Стокса визначається параметрами S_0, S_1, S_2, S_3 , які розрахуємо за формулами, що наведені в табл. 5.2, за координатами сфери Пуанкаре $r, 2\alpha, 2\varepsilon$.

Таблиця 5.2

Розрахунок параметрів Стокса

Параметри Стокса	Розрахунок за сферичними координатами	Розрахунок за компонентами електричного поля	Примітка
S_0	$S_0 = r$	$a^2 + b^2$	Інтенсивність
S_1	$r \cdot \cos 2\varepsilon \cdot \cos 2\alpha$	$a^2 - b^2$	Параметр переважної горизонтальної поляризації
S_2	$r \cdot \cos 2\varepsilon \cdot \sin 2\alpha$	$2a^2b^2 \cos \Delta\varphi$	Параметр переважної діагональної поляризації
S_3	$r \cdot \sin 2\alpha$	$2a^2b^2 \sin \Delta\varphi$	Параметр переважної циркулярної поляризації

2. Для розрахунку параметра S_1 розглянемо ряд прямокутних трикутників на рис. 5.11. Згідно умови прикладу для горизонтально право еліптично поляризованого світла маємо кут -2ε для точки P , а кут $\alpha = 0$.

Крім того, $\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{b}{a} = \frac{1}{3}$.

Звідси $\varepsilon = \operatorname{arctg} \frac{b}{a} = \operatorname{arctg} \frac{1}{3} = 26,57^\circ$. $\cos 2\varepsilon = \cos 57,14^\circ = 0,54$.

Тоді $S_1 = S_0 \cos(-2\varepsilon) \cdot \sin(90^\circ - 2\alpha) = \cos 2\varepsilon = 0,54$.

3. Із табл. 5.2 находимо наступні параметри вектора Стокса:

$$S_2 = r \cdot \cos 2\varepsilon \cdot \sin 2\alpha = 0; S_3 = r \cdot \sin 2\alpha = 0.$$

Приклад 5.4.3. Світловий пучок, який має вектор Стокса $S_0 = 1$; $S_1 = 0,5$; $S_2 = 0,5$; $S_3 = 0,5$, проходить через поляризатор. При якій орієнтації поляризатора інтенсивність світла після поляризатора буде максимальною?

Розв'язання. Визначимо спочатку тип поляризації вихідного пучка. Ступінь поляризації визначається за формулою (5.10)

$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} = \frac{\sqrt{0,5^2 + 0,5^2 + 0,5^2}}{1} = \frac{\sqrt{3}}{2}.$$



Рис. 5.11. Сфера Пуанкаре

Так як ця величина є меншою за одиницю, то світло частково поляризоване і є сумішшю природньої і еліптично поляризованих компонент. Максимальна інтенсивність світла, що пройшло через поляризатор, буде у випадку, коли площина його пропускання буде співпадати з великою піввіссю еліпса. Її положення визначимо за допомогою формул із табл. 5.2:

$$S_1 = \cos 2\varepsilon \cdot \cos 2\alpha = 0,5; S_2 = \cos 2\varepsilon \cdot \sin 2\alpha = 0,5.$$

Звідки $\operatorname{tg} 2\alpha = 1$; $2\alpha = 45^\circ$; $\alpha = 22,5^\circ$. Таким чином, поляризатор необхідно орієнтувати під кутом $22,5^\circ$ до осі ox .

Задачі для самостійного розв'язання

Задача 5.1. Промінь монохроматичного природного світла падає під кутом 45° на поверхню скла. Визначте коефіцієнт відбивання і ступінь поляризації відбитого і заломленого променів, коли показник заломлення дорівнює: а) 1,5; б) 1,62; в) 1,73.

Відповідь: а) $R = 0,050$; $P_R = 0,831$; $P_D = 0,048$; б) $R = 0,063$; $P_R = 0,769$; $P_D = 0,051$; в) $R = 0,083$; $P_R = 0,747$; $P_D = 0,068$.

Задача 5.2. Промінь природного монохроматичного світла падає на поверхню скла під кутом Брюстера. Визначте кут падіння, коефіцієнт

відбивання і ступінь поляризації заломленого променя, коли показник заломлення скла дорівнює: а) 1,5; б) 1,62; в) 1,73.

Відповідь: а) $\varepsilon_B = 56^\circ 19'$; $R = 0,074$; $P_D = 0,079$; б) $\varepsilon_B = 58^\circ 19'$; $R = 0,100$; $P_D = 0,112$; в) $\varepsilon_B = 59^\circ 58'$; $R = 0,125$; $P_D = 0,142$.

Задача 5.3. Промінь природного світла проходить через плоскопаралельну пластину з показником заломлення n під кутом повної поляризації. Визначте ступінь поляризації променя, який пройшов через пластину, коли:

а) $n = 1,45$; б) $n = 1,62$; в) $n = 1,73$.

Відповідь: $P_D = \frac{1 - (1 - R_\perp)^2}{1 + (1 - R_\perp)^2}$; $R_\perp = \sin^2(\varepsilon_3 - \varepsilon_2')$; $\varepsilon_B = \arctg(n)$;

а) $P_D = 0,1342$; б) $P_D = 0,2005$; в) $P_D = 0,2789$.

Задача 5.4. Ступінь поляризації частково поляризованого світла $P = 0,25$. Знайдіть відношення інтенсивності поляризованої складової до інтенсивності природньої складової.

Відповідь: $\frac{I_l}{I_n} = \frac{1}{3}$.

Задача 5.5. Розрахуйте параметри вектору Стокса для вертикально право еліптично поляризованого світла, в якому для осей виконується умова: $2a = b$, $r = S_0 = 1$.

Відповідь: $S_0 = 1$; $S_1 = 0,6$; $S_2 = 0$; $S_3 = 0$.

Задача 5.6. Розрахуйте параметри вектору Стокса для горизонтально лінійно поляризованого світла, в якому $r = S_0 = 1$.

Відповідь: $S_0 = 1$; $S_1 = 1$; $S_2 = 0$; $S_3 = 0$.

Задача 5.7.* Використовуючи формулу (5.25) розрахуйте параметри вектору Стокса для напрямків поляризації $\varphi_i = 0^\circ$; 60° ; 120° .

Вказівка. Скористайтесь прикладом 5.1.1.

Відповідь:

$$S_0 = \frac{2}{3} [I_{0^\circ} + I_{60^\circ} + I_{120^\circ}]; S_1 = \frac{2}{3} [2I_{0^\circ} - I_{60^\circ} - I_{120^\circ}]; S_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} [I_{60^\circ} - I_{120^\circ}].$$

Задача 5.8. Визначте ступінь поляризації випромінювання від цілі, параметри вектору Стокса якого наведені у задачі 5.1.

Вказівка. Скористайтесь прикладом 5.4.2.

Відповідь: $S_0 = I_{0^\circ} + I_{90^\circ}$; $S_1 = I_{0^\circ} - I_{90^\circ}$; $2I_{45^\circ} - I_{0^\circ} - I_{90^\circ}$.

Задача 5.9. Використовуючи рівняння поляризаційного еліпса (5.62') отримайте рівняння (5.70) для розрахунку кута еліптичності χ еліпса.

Задача 5.9. Використовуючи рівняння поляризаційного еліпса (5.62), визначте рівняння цього еліпса для випадку, коли різниця фаз δ між ортогональними компонентами $\vec{E}_x$ і $\vec{E}_y$ поляризованого випромінювання дорівнює нулю.

Відповідь: $E_y = \frac{E_{0y}}{E_{0x}} E_x$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Driggers R.G. Introduction to Infrared and Electro-Optical Systems. Third Edition / R.G. Driggers, M.H. Friedman, J.W. Devitt et al. - Artech House. - 2022. – 712 p.
2. Lloyd J. M. Thermal Imaging Systems / J. M. Lloyd. – New York: Plenum Press, 1975. – 407 p.
3. Budzier H. Thermal infrared sensors: theory, optimisation and practice / Helmut Budzier, Gerald Gerlach. - John Wiley & Sons. – 2011. – 326 p.
4. Schuster N. Infrarotthermographie (Zweite, uberarbeitete und erweiterte Ausgabe) / N. Schuster, V. G. Kolobrodov – Berlin: Wiley-VCH Verlag Gmb & Co. KGaA, 2004. – 356 p.
5. Driggers R. G. Infrared detector size: how low should you go? / R. G. Driggers, R. Vollmerhausen, J. P. Reynolds, G. Fanning et al. // Optical Engineering. Vol. 51(6). – 2012. – P. 063202-1 – 063202-6.
6. Global Military Electro-optical & Infrared System Market by System (Electronic Support Measure (ESM) System, Imaging System, Targeting System), Sensor Type (Scanning Sensor, Staring Sensor), Technology, Platform - Forecast 2023-2030. [Електронний ресурс]. Назва з екрана. – Режим доступу <https://www.researchandmarkets.com/report/military-electro-optical-and-infrared-systems>
7. Колобродов В. Г., Шустер Н. Тепловізійні системи (фізичні основи, методи проектування і контролю, застосування): Підруч. для вузів / В. Г. Колобродов, Н. Шустер – К.: Тираж, 1999. – 340 с.
8. Колобродов В. Г. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження / В. Г. Колобродов В.Г., М. І. Лихоліт. – Київ: НТУУ «КПІ», 2007. – 364 с.
9. Домбругов Р.М. Телебачення: підручник для студентів вузів / Р.М. Домбругов – К.: Вища школа, 1979. – 176 с. (російською)
10. Колобродов В. Г. Геометрична шумова смуга пропускання – новий критерій для визначення роздільної здатності оптичних та оптико-електронних приладів // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2003. – № 2. – С. 97 – 101.
11. Chrzanowski K. Testing thermal imagers. Practical guidebook /

- K. Chrzanowski. – Warsaw, Poland: Military University of Technology, 2010. – 172 p.
12. Karim, M. A. Minimum resolvable temperature difference model: a critical evaluation / M. A. Karim, L. Gao Ming, H. Xheng Song // *Optical Engineering*. – 1991. – Vol. 30. – № 11. – P. 1788–1796.
 13. Mooney J. M. et al. Responsivity nonuniformity limited performance of infrared staring cameras // *Optical Engineering*, 1989. – Vol. 28. – № 11. – P. 1151–1161.
 14. Melamed R. Experimental comparison of three target acquisition models / R. Melamed, Y. Yitzhaky, N. S. Kopeika, S. R. Rotman // *Optical Engineering*. – 1998 – Vol. 37. – № 7. – P. 1902–1913.
 15. Kaplan H. Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment. Third Edition / H. Kaplan. – Washington, USA: SPIE Press, 2010. – 192 p.
 16. Брук Г. Дрони / Генрі Брук. – КМ-Букс. - 2019. – 80 с.
 17. Holst G. C. Electro-optical imaging system performance. 5th ed. / G. C. Holst– Winter Park, Florida: JCD Publishing, 2008. – 502 p.
 18. STANAG 4347 Definition of nominal static ranger performance for thermal imaging systems, 1995. [Електронний ресурс]. Назва з екрана. – Режим доступу http://everyspec.com/NATO/NATO-STANAG/STANAG_4347_13663/
 19. Колобродов, В. Г. Спотворення зображення в системах дистанційного зондування Землі при довільних кутах візування / В. Г. Колобродов, М. І. Лихоліт, В. М. Тягур, Б. Ю. Пінчук // *Космічна наука і технологія*. – 2021. – Т. 27. – № 3. – P. 51–65.
 20. Kolobrodov V. G. Modulation transfer function of the thermal imaging monocular / V. G. Kolobrodov // *Visnyk NTUU KPI Serii Radiotekhnika. Radioaparotobuduvannia*. -2019. – pp. 74-78.
 21. Kolobrodov V. G. Calculation Model for Optoelectronic Remote Sensing System's Radiometric Resolution at Arbitrary Viewing Angles / V. G. Kolobrodov, M. I. Lykholit, V. I. Mykytenko et al. // *Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparotobuduv.*, 2017, Iss. 69, pp. 30-34.
 22. Vollmer M. Infrared Thermal Imaging. Fundamentals, Research and

- Applications / Michael Vollmer and Klaus-Peter Mollman. Second Edition. – Wiley – VCH, Weinheim, Germany. – 2018. – 788 p.
23. Добровольська К. В. Підвищення просторової роздільної здатності космічних мікро-болометричних камер / К. В. Добровольська, В. Г. Колобродов, В. І. Микитенко, В. М. Тягур – Київ : Вік принт, 2018.–223 с.
 24. Stefan Keßler TRM4: Range performance model for electro-optical imaging Systems / Stefan Keßler, Raanan Galb and Wolfgang Wittenstein // - Proc. of SPIE Vol., 2017, P. 10178 - 101780.
 25. Колобродов В. Г. Вплив ймовірності розпізнавання об'єкта тепловізором на максимальну дальність спостереження / В. Г. Колобродов // Visnyk NTUU KPI, Seriia – Radiotekhnika Radioaparatabuduvannia, 2022, Iss. 88, pp. 77–85
 26. Driggers, R. G. Simple Target Acquisition Model Based on FI/d / R. G. Driggers et al. // Opt. Eng., Vol.60, No. 2, February 23, 2021.
 27. Teaney B. Next Generation Imager Performance Mode / B. Teaney and J. Reynolds // Proc. SPIE 7662, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXI, 2010.
 28. Ratches J. Target Acquisition Performance Modeling of Infrared Imaging Systems: Past, Present, and Future / J. Ratches, R. Vollmerhausen and R. Driggers // IEEE Sensors Journal, Vol. 1, No.1, 2001, pp. 31–40.
 29. Колобродов В. Г. Ймовірність розрізнення цілі контрастно обмеженою тепловізійною системою безпілота / В. Г. Колобродов, М. І. Лихоліт, В. М. Тягур та ін. // Космічна наука і технологія. – 2023. – Т. 27. – № 3. – С. 51–65.
 30. Vollmer M. Identification and Suppression of Thermal Imaging // M. Vollmer, S. Karstadt, K.-P. Mollmann, F. Pinno // InfraMation Proceedings. – University of Applied Sciences, Brandenbueg (Germany). – 2001. – ITC 104 A.
 31. Tooley R. D. Man-made target detection using infrared polarization / R. D. Tooley // Polarization considerations for optical systems. – Proc. of SPIE, 1990. – V. 1166. – pp. 52-60.
 32. Zhang Y. Infrared small target detection method based on decomposition of polarization information / Y. Zhang, Z. G. Shi, T. W. Qiu // Journal of

- Electronic Imaging. – 2017. – V. 33004. – №. 1.
33. Колобродов В. Г. Комп'ютерно-інтегрований метод виявлення об'єкта поляризаційним тепловізором / В. Г. Колобродов, В. І. Микитенко, Б. Ю. Пінчук, Б. В. Сокол // Visnyk NTUU KPI Serii A - Radiotekhnika Radioaparatabuduvannia, 2021. - V.85, pp. 21-25.
 34. Born M. Principles of optics, 7th edn. / M. Born, Wolf E. // Cambridge University. – Press, Cambridge. – 1999. – 854 p.
 35. Gurton K. P. Enhanced facial recognition for thermal imagery using polarimetric imaging / K. P. Gurton, A. J. Yuffa, G.W. Videen // Optical Society of America. – 2014. – Vol. 39, No. 13. – pp. 3857–3859.
 36. Liao Y. B. Polarization optics. Science Press, Beijing. – 2003.
 37. Колобродов В. Г. Поляризаційна модель теплоконтрастних об'єктів спостереження / В. Г. Колобродов, В. І. Микитенко, Г. С. Тимчик // Термoeлектрика. – 2020. – № 1. – С. 36 – 52.
 38. Карпенко І. В. Поляризаційний метод виявлення тепло контрастної цілі на фоні завад / І. В. Карпенко, В. Г. Колобродов, Б. В. Сокол // ВІСНИК ХНУ. Серія : Технічні науки. – 2018. – №1. – С. 33 – 37.
 39. Yang F. Fusion of infrared polarization and intensity images using support value transform and fuzzy combination rules / F. Yang, H. Wei // Infrared Phys. Technol., 2013, 60 (5), pp. 235–243.
 40. Колобродов В. Г. Основи хвильової оптики / В. Г. Колобродов. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Політехніка, 2020. – 404 с.
 41. Siegel, R. Thermal Radiation Heat Transfer, 2nd edition / R. Siegel, J. R. Howell. - Hemisphere Publishing Corp., 1981. Applied Sciences, Brandenbueg (Germany). – 2001.