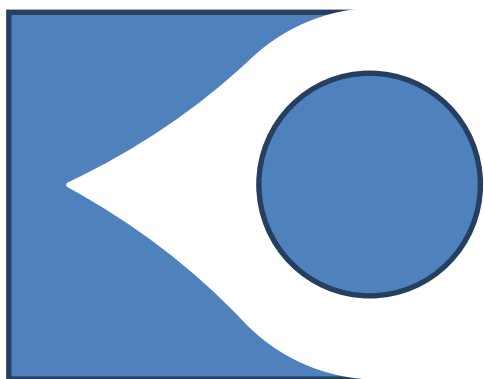


В.Г. Колобродов, В.І. Микитенко

**КОМПЛЕКСУВАННЯ
ІНФОРМАЦІЇ
В БАГАТОКАНАЛЬНИХ
ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ
СИСТЕМАХ
СПОСТЕРЕЖЕННЯ**



*НТУУ «КПІ»
Київ – 2013*

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

В.Г. Колобродов, В.І. Микитенко

**КОМПЛЕКСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ
В БАГАТОКАНАЛЬНИХ ОПТИКО-
ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ
СПОСТЕРЕЖЕННЯ**

Монографія

Київ
НТУУ «КПІ»
2013

УДК 621.384
ББК 32.86
К61

*Рекомендовано до видання вченою радою ПБФ НТУУ «КПІ»
(протокол № 10/13 від 28 жовтня 2013 р.)*

Рецензенти:

д-р техн.наук В.Й. Котовський (НТУУ «КПІ»)
канд. техн.наук В.М. Тягур (КП СПБ «Арсенал»)

Відповідальний редактор
канд. техн.наук І.Д.Кожарін (НТУУ «КПІ»)

К61 **Комплексування** інформації в багатоканальних оптико-електронних системах спостереження: монографія / В.Г. Колобродов, В.І. Микитенко. – Київ: «Аверс», 2013. - 178 с.

ISBN 978-966-8777-07-3

Розглянуто методи підвищення ефективності функціонування оптико-електронних систем візуального спостереження шляхом поєднання інформації з кількох спектральних каналів. Запропоновано нові методи обробки зображень та нові методи оцінки якості комплектованих зображень. Наведено практичні результати застосування розроблених методів.

Для наукових та інженерно-технічних працівників, студентів напряму підготовки 6.051004 «Оптотехніка».

УДК 621.384
ББК 32.86

ISBN 978-966-8777-07-3

© В.Г. Колобродов, В.І. Микитенко, 2013

Наукове видання

Колобродов Валентин Георгійович

Микитенко Володимир Іванович

**КОМПЛЕКСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ
В БАГАТОКАНАЛЬНИХ ОПТИКО-
ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ
СПОСТЕРЕЖЕННЯ**

Монографія

В авторській редакції

Підп. до друку 15.10.2013. Формат 60x84

ЗМІСТ

	Стор.
Вступ	4
Розділ 1. Перетворення сигналів в БК ОЕСС і задачі комплексування інформації	7
1.1 Місце БК ОЕСС в загальному інформаційному середовищі...	7
1.2 Моделі формування візуальної інформації в окремих каналах БК ОЕСС	11
1.2.1 Пасивні канали видимого діапазону спектру	24
1.2.2 Пасивні канали ІЧ діапазону спектру	28
1.2.3 Активні канали	29
Розділ 2. Формування релевантних ознак зображень при зоровому сприйнятті	31
2.1 Задачі зорової діяльності оператора БК ОЕСС	33
2.2 Зорове сприйняття візуальної інформації	48
2.2.1 Основні закони зорового сприйняття	49
2.2.2 Значимі ознаки в зображеннях	72
Розділ 3. Реєстрація та попередня обробка зображень в каналах	80
Розділ 4. Методи комплексування інформації	89
4.1 Розробка концепції комплексування інформації	89
4.2 Програмний інструментарій комплексування інформації	93
4.3 Комплексування при спостереженнях в тумані чи в диму	104
4.4 Комплексування при вібраціях і зсувах	108
4.5 Комплексування для розширення інформаційного об'єму в просторі предметів	109
Розділ 5. Оцінка ефективності комплексування інформації в БК ОЕСС	125
5.1 Оцінка якості візуальних зображень	127
5.2 Нові методи оцінки ефективності роботи системи «ФЦО – БК ОЕСС – спостерігач»	146
Висновки	161
Перелік посилань	163

ВСТУП

Відомо [1], що приблизно до 95% інформації про навколишній світ людина отримує через зорову систему шляхом аналізу зображення, яке формується на сітківці очей. Для розширення можливостей отримання візуальної інформації вже кілька десятиліть використовуються іконічні системи. Переважна більшість таких систем є оптико-електронними або оптичними, але разом з прогресом технічних засобів аналізу просторів об'єктів і відображення візуальної інформації з'явилися нові системи, до складу яких входять неоптичні канали. Відповідно, змінюються методи вирішення однієї з найважливіших проблем приладобудування - підвищення ефективності функціонування іконічних систем. Якщо раніше головними обмеженнями в досягненні максимальних показників якості таких систем були недостатньо високі технічні параметри окремих блоків (особливо – сенсорів), то в останні роки на перший план виходить більш повне використання потенційно доступної для оператора інформації з різних каналів. До складу сучасних іконічних систем дистанційного моніторингу можуть входити кілька підсистем, які формують візуальні зображення не тільки шляхом аналізу електромагнітного випромінювання в різних спектральних оптичних піддіапазонах, але й в радіодіапазоні або ж аналізуючи сигнали зовсім іншої природи. Наразі підвищення ефективності сучасних іконічних систем здійснюється в напрямку створення багатоканальних систем.

Однією з найважливіших проблем приладобудування залишається підвищення ефективності функціонування оптико-електронних систем спостереження (ОЕСС). Суттєва різниця між ОЕСС та іншими інформаційними оптико-електронними системами полягає в тому, що в цьому випадку вихідна інформація має вигляд візуального зображення, яке аналізується (як правило в реальному масштабі часу) людиною-оператором. Значний прогрес в створенні елементної бази оптико-електронних приладів (ОЕП), які є основною складовою ОЕСС, вніс корективи в методи підвищення ефективності ОЕСС. Якщо раніше головними обмеженнями в досягненні максимальних показників

якості ОЕСС були недостатньо високі технічні параметри окремих блоків ОЕП (особливо – приймачів випромінювання (ПВ)), то в останні роки на перший план виходить неефективність використання потенційно доступної для оператора ОЕСС інформації. До складу сучасних ОЕСС входять, як правило, кілька ОЕП, які формують візуальні зображення в різних каналах (телевізійному, низькорівневому, тепловізійному, тощо). Тобто, тепер підвищення ефективності зазвичай здійснюється в рамках багатоканальних ОЕСС (БК ОЕСС). Донедавна різні типи ОЕП працювали по черзі для забезпечення цілодобового всепогодного функціонування БК ОЕСС. Зараз послідовний режим роботи каналів БК ОЕСС вже не задовольняє споживачів. Для підвищення ефективності роботи сучасних БК ОЕСС необхідно виводити в поле зору оператора одночасно інформацію з різних каналів. Процедура синтезу такого зображення називається комплексуванням зображень (image fusion).

Комплексування зображень є перерізом кількох напрямків – комплексування інформації (data/information fusion), пошуку даних (data mining), обробки зображень (image processing), зорового сприйняття (visual perception) та ін. Основи комплексування зображень були сформульовані більш, ніж четверть століття назад [2]. Серед великої кількості профільних досліджень розглядаються або математичні основи (особливо стосовно програмного інструментарію), або конкретні приклади фізичної реалізації (часто з використанням стандартних методів цифрової обробки зображень). Нажаль відсутні роботи системного характеру, в яких розглянуті всі основні питання комплексування інформації в БК ОЕСС і які б дозволили розробнику на початкових етапах проектування оцінити ефективність майбутнього технічного рішення.

Наразі відсутнє єдине визначення поняття комплексування інформації. Це є категорійне поняття, а не тільки сукупність засобів та методик. Одне з перших формалізованих визначань комплексуванню було дано в Joint Directors of Laboratories (JDL) Міністерства оборони США як багаторівневий,

багатоаспектний процес, що є пов'язаним з автоматичним виявленням, вимірюванням, кореляцією та суміщенням інформації від одного або кількох джерел [3].

Дана монографія присвячена загальному огляду основних питань, що стосуються комплексування зображень в БК ОЕСС. Розглянуті всі складові процесу формування сигналів в ОЕСС, комплексування зображень, зорового сприйняття в контексті поточної задачі спостерігача. Запропоновані новий метод комплексування на базі карти інформативності та новий метод оцінки ефективності функціонування БК ОЕСС, проведений порівняльний аналіз загальноновживаних алгоритмів комплексування.

РОЗДІЛ 1

ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ В БК ОЕСС І ЗАДАЧІ КОМПЛЕКСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ

Очевидною є залежність процесів обробки та поєднання зображень (сигналів) від багатьох факторів – як зовнішніх до БК ОЕСС, так і внутрішніх. Для вирішення ряду задач, що пов'язані з комплексуванням, необхідно мати адекватну модель перетворень інформації в системі «фоно-цільова обстановка – БК ОЕСС – оператор». Побудову такої моделі доцільно починати з визначення функцій БК ОЕСС в загальному інформаційному середовищі.

1.1 Місце БК ОЕСС в загальному інформаційному середовищі

Алгоритми комплексування істотно залежать від того, чи знаходиться набір сенсорів на одній або на декількох фізичних платформах. Для БК ОЕСС характерне розміщення сенсорів на єдиній платформі. В цьому випадку ОЕП функціонують в однакових зовнішніх умовах, виконують єдину задачу і утворюють єдине інформаційне середовище. Вхідне поле при цьому формується фоно-цільовою обстановкою (ФЦО), перетворюється на сигнал сенсорами, безпосереднє комплексування інформації здійснюється пристроєм, який можна назвати процесором релевантності (ПР), а вихідне поле аналізується людиною-оператором.

Узагальнена структура інформаційного середовища визначається формою подання інформації сенсорами в ПР і його типом. Можна виділити середовища комплексування з автоматичним ПР, напівавтоматичні і неавтоматизовані з людиною-оператором в ролі ПР. Останній випадок на сьогодні найбільш поширений. Такий режим роботи максимально завантажує оператора, практично виключає одночасне використання різних сенсорів і є неперспективним. На найближчий час найперспективнішими будуть напівавтоматичні середовища комплексування, а пізніше - автоматичні.

Структура інформаційного середовища, в якому оператор не бере безпосередньої участі в комплексуванні сигналів, зображена на рис. 1.1.

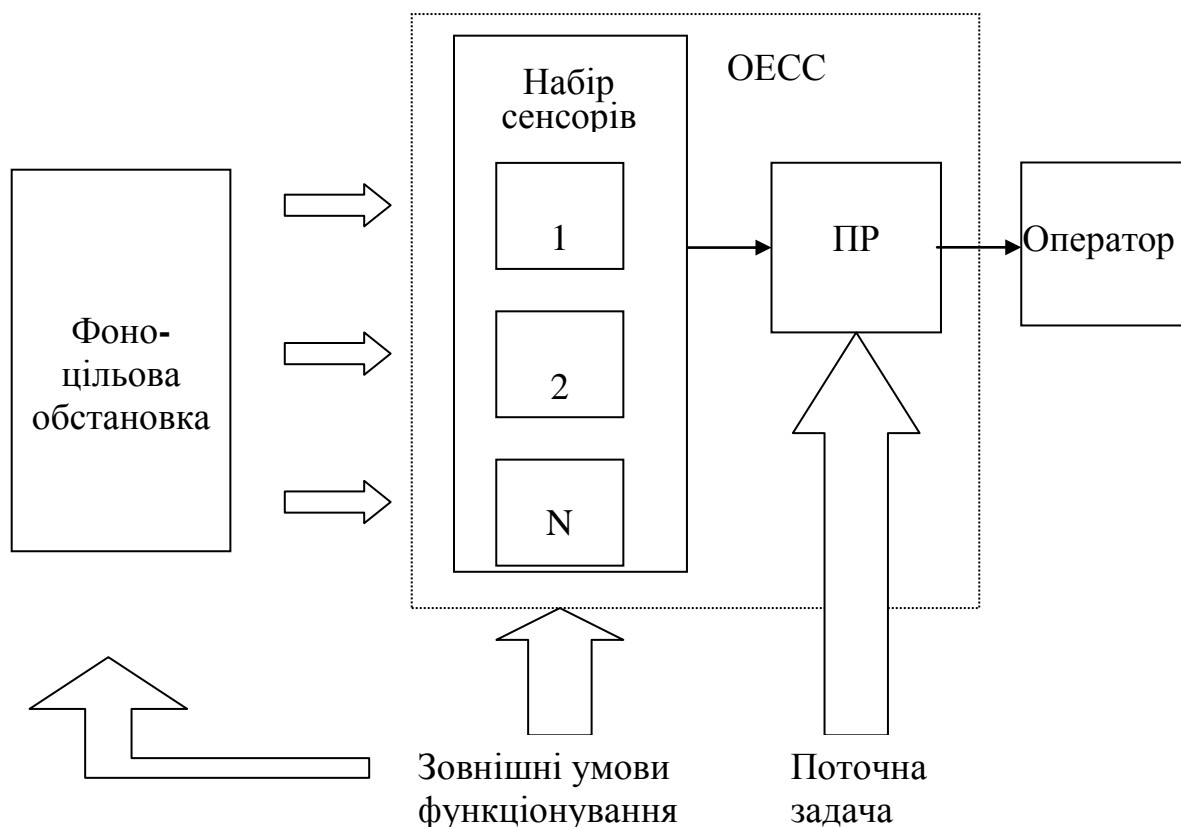


Рис. 1.1 Структурна схема середовища комплексування

Середовище комплексування функціонує під впливом зовнішніх умов і вирішуваної задачі. Очевидно, що правила функціонування середовища повинні задаватися ЦУР виходячи з його особливостей. Тоді пріоритетним чинником, що визначає алгоритми функціонування середовища, є поточна задача. Переважна більшість ОЕСС призначена для пошуку/виявлення об'єкту, його розпізнавання, наведення/супроводу, орієнтації, навігації тощо. Ці задачі задають релевантні ознаки вхідного поля і логіку роботи ПР, які практично не залежать від типу сенсорів. Зовнішні умови є дестабілізуючими чинниками і формують реакцію середовища, направлену на відновлення робочих режимів в прийнятних діапазонах. Слід розділити зовнішні умови по місцю їх впливу: умови функціонування сенсорів і умови функціонування ПР. Відповідно, в першому випадку зовнішні умови впливають безпосередньо на сигнали

сенсорів, а в другому - через режим роботи ПР - на алгоритми комплексування. У будь-якому випадку конкретні параметри зовнішніх умов нескладно звести до поправочних коефіцієнтів, граничних умов і т.п., які описують роботу сенсорів і ПР.

Другим значущим чинником життєдіяльності середовища є ФЦО. Причому, в автоматичних середовищах, правила ухвалення рішень яких не визначаються жорстко особливостями візуального сприйняття людини і можуть необмежено модифікуватися, ФЦО як формотворчий чинник має більше значення, ніж в напівавтоматичних і неавтоматизованих середовищах. В контексті рішення задачі комплексування інформації ФЦО є просторово-часовим розподілом електромагнітного поля на входах сенсорів, який сформований в результаті взаємодії фізичних об'єктів в просторі об'єктів із зовнішніми полями і середовищем розповсюдження випромінювання. Спектр електромагнітного випромінювання умовно розділяють діапазони (рис. 1.2) по довжині хвилі або частоті. Як правило, таке розділення обумовлене особливостями джерел і приймачів випромінювання.

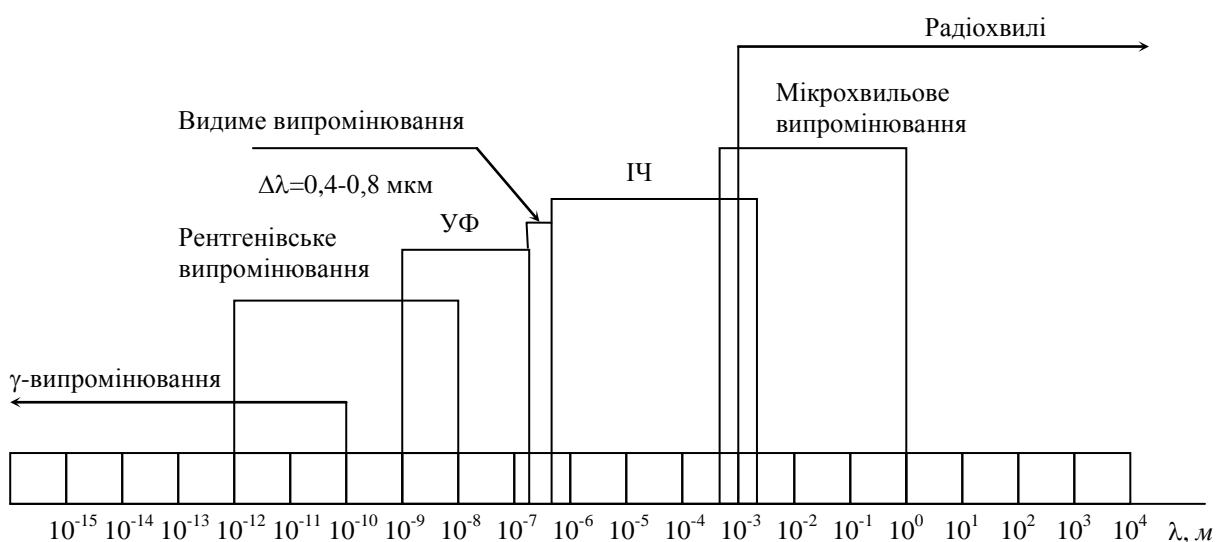


Рис. 1.2 Спектр електромагнітного випромінювання

ФЦО формується внаслідок взаємодії об'єкта (ів), фону, завад, зовнішніх випромінювань і зовнішнього середовища.

Для переважної більшості реальних ситуацій можна виділити три типи фонів [4] - однорідні, квазіоднорідні, неоднорідні, які, в свою чергу розділяються на десятки класів і підкласів. Щодо визначення типових об'єктів спостереження – тут ситуація ускладнюється значною кількістю можливих галузей застосування ОЕСС. З метою отримання зіставних результатів для різних типів ОЕСС і проведення математичного моделювання можливо обмежити алфавіт об'єктів і фонів найпростішим випадком - прямокутний рівноконтрастний об'єкт на рівнояскравому фоні [5]. Вплив середовища розповсюдження випромінювання на фоно-цільову обстановку має загалом досить складний характер, але за нечисленними виключеннями (наприклад – астрономічні ОЕСС наземного базування) його подібно до зовнішніх умов можна врахувати в параметрах об'єктів і фонів.

Основними типами ОЕСС є: пасивні ОЕП спостереження видимого діапазону спектру (візуальні, телевізійні, низькорівневі, відеоспектрметри, відеополяриметри); пасивні ОЕП спостереження ІЧ діапазону спектру (тепловізори, відеоспектрметри, відеополяриметри); пасивні ОЕП спостереження УФ діапазону спектру; лазерні системи бачення; активні поляриметричні системи; інші неоптичні системи (акустичні, радіолокаційні), далекоміри. Встановлені на них сенсори, не визначаючи в цілому ідеологію роботи середовища комплексування, впливають на неї через формати подання інформації. Для ОЕСС характерними видами інформації, що поступає з сенсорів, є електричний сигнал або оптичний сигнал, формати подання інформації в яких визначаються конкретними типами сенсорів (табл. 1.1).

Як видно з таблиці, в ОЕСС використовуються три формати - двовимірний оптичний, тривимірний оптичний, електричний. Специфікації форматів (часові, енергетичні, фазові або просторові) важливі при комплексуванні на рівні сенсорів або узагальнених параметрів. У разі комплексування на рівні рішень конкретні характеристики форматів значення не мають.

Таблиця 1.1 Типи сенсорів сучасних ОЕСС

№ п/п	Тип сенсора	Спектральний діапазон роботи, мкм	Формат вихідного сигналу
1.	Монокулярний візуальний канал	0,4 – 0,8	Двовимірний оптичний
2.	Бінокулярний візуальний канал	0,4 – 0,8	Дво/тривимірний оптичний
3.	Електронно-оптичний перетворювач	0,4 – 0,9	Двовимірний оптичний
4.	Телевізійна система	0,4 – 0,8	Електричний / двовимірний оптичний
5.	Низькорівнева телевізійна система	0,4 – 0,9	Електричний / двовимірний оптичний
6.	Лазерна система бачення	0,4 – 0,9	Електричний / двовимірний оптичний
7.	Тепловізійна система	3 – 5, 8 – 14	Електричний / двовимірний оптичний
8.	Відеоспектрометр	0,4 – 1,5	Електричний / двовимірний оптичний
9.	Відеополяриметр	0,4 – 0,9	Електричний / двовимірний оптичний
10.	Радіолокаційна система	більше 1000	Електричний / двовимірний оптичний

1.2 Моделі формування візуальної інформації в окремих каналах БК ОЕСС

Формування вхідної візуальної інформації для аналізу відбувається в двох ланках загальної інформаційної системи – ФЦО та БК ОЕСС. Головними чинниками, які визначають параметри вихідного оптичного сигналу ФЦО, є об'єкт, фон, завади, середовище розповсюдження сигналу і зовнішнє випромінювання (рис. 1.3).

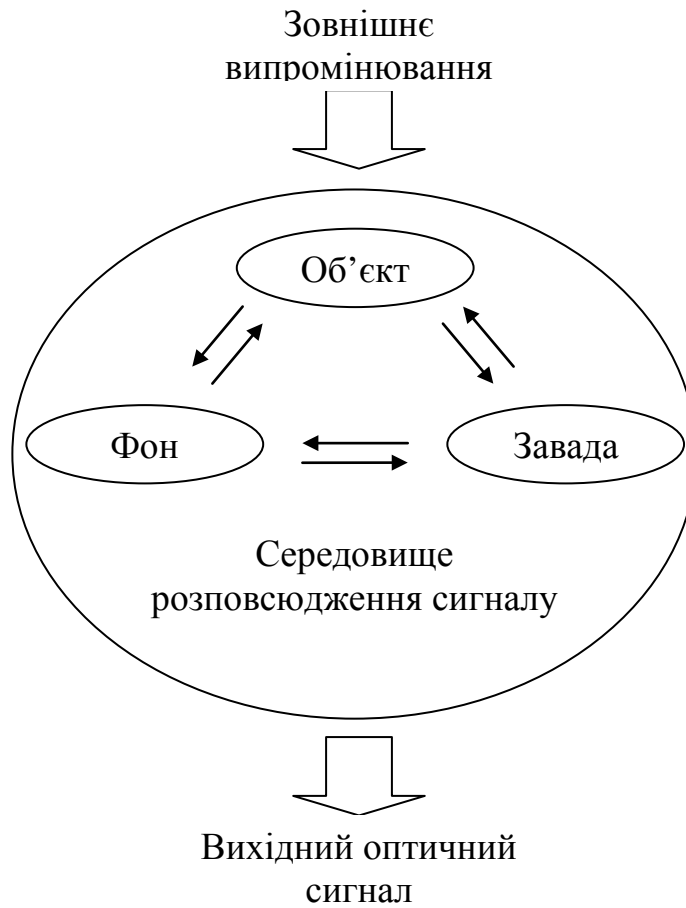


Рис. 1.3 Основні елементи формування ФЦО

Тому структуру математичної моделі, подібно до фізичної моделі доцільно розділити на кілька блоків, які є функціонально завершеними. Традиційно такими блоками є (рис. 1.4): модель фоноцільової обстановки, основними елементами якої є активні та пасивні об'єкти, які знаходяться в полі зору ОЕСС, а також випромінюючі об'єкти за межами поля зору; модель траси розповсюдження сигналу, основними елементами якої є середовище, що заповнює об'єм від ФЦО до ОЕСС і випромінюючі об'єкти за межами поля зору; модель ОЕСС з урахуванням поточної задачі; модель спостерігача, яка окрім параметрів безпосередньо візуальної діяльності включає в себе умови спостереження і опис зорової задачі. На виході моделі формується рішення.

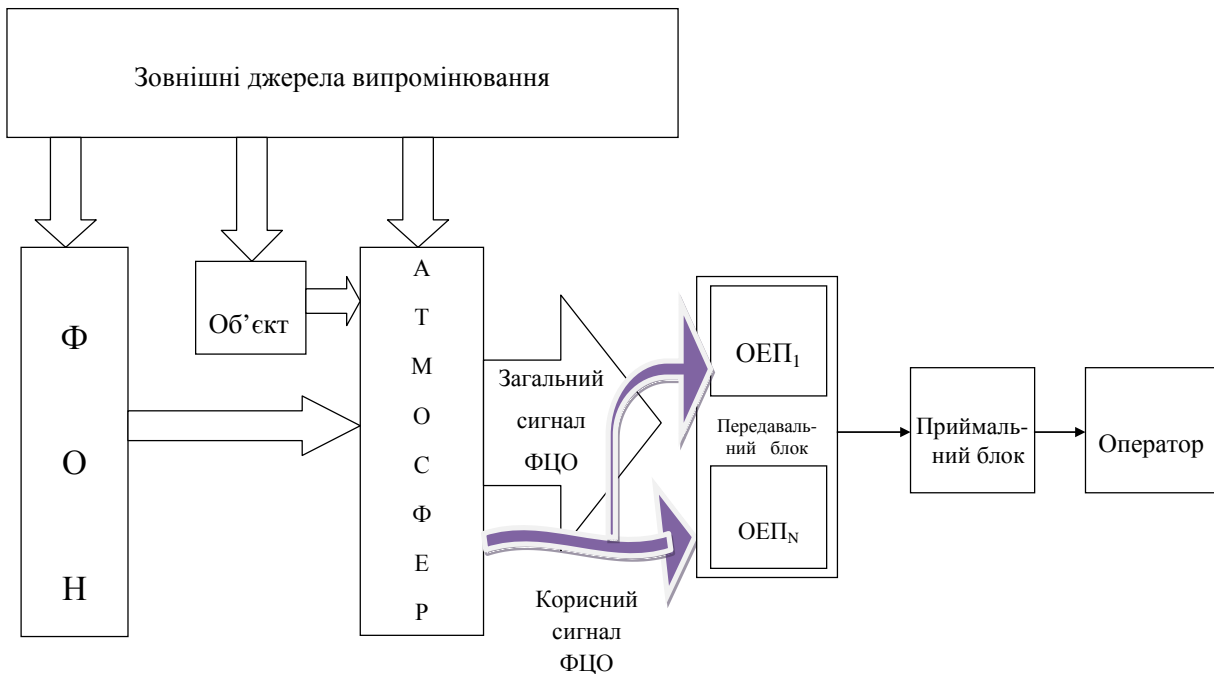


Рис. 1.4 Узагальнена схема інформаційного середовища при дистанційних спостереженнях

Відповідно, модель ФЦО має включати в себе опис випромінюючих (або відбиваючих, розсіюючих) поверхонь, які утворюють об'єкт (або групу об'єктів), фон, заваду, розподіл випромінювання зовнішніх джерел, модель зовнішнього середовища (для переважної більшості випадків цим середовищем є атмосфера). Основними характеристиками означених явищ є просторові, амплітудні, спектральні, часові та поляризаційні характеристики. Розповсюдженим методом опису просторових характеристик ФЦО є застосування просторово-частотних або просторово-координатних математичних моделей. Як правило ці моделі ґрунтуються на теорії лінійних систем, а ваговими коефіцієнтами є енергетичні (здебільшого) або поляризаційні показники. Далі розглядатимемо моделі тільки з енергетичними показниками.

Вихідний оптичний сигнал ФЦО попадає у вхідну оптичну систему (ОС) БК ОЕСС. Типова ОС крім фокусуєчого об'єктива містить світлофільтри, діафрагми, затвори, за необхідності – скануючі елементи, компенсатори зсуву зображення, розфокусування тощо. Після відповідної попередньої обробки

сигнал поступає на чутливу поверхню приймача випромінювання (ПВ). Сучасні ПВ УФ та видимого діапазонів є здебільше фотонними, а в ІЧ діапазоні використовуються як фотонні, так і теплові ПВ. ПВ перетворює оптичний сигнал в електричний, який після підсилення та попереднього коригування подається в блок обробки сигналу (БОС). В залежності від топології БК ОЕСС можливі різні варіанти компонування вхідної ОС, ПВ та БОС.

Застосування ОЕСС для спостереження за об'єктами, що знаходяться поза приміщеннями, вимагає врахування впливу атмосфери. Цей вплив, як правило, показується через зміни контрасту об'єкта. При спостереженні за віддаленими об'єктами слід враховувати, що, по-перше, відбувається ослаблення випромінювання повітряним середовищем і, по-друге, знижується контраст зображення об'єкту на вході системи. Остання обставина обумовлена розсіюючою властивістю атмосфери і, як правило, є визначальною для дальності спостереження. Середовищем розповсюдження сигналу може бути будь-яка прозора в робочому спектральному діапазоні субстанція. Найтипівішим середовищем є земна атмосфера. Атмосферу умовно поділяють на тропосферу (висота до 11 км), стратосферу (до 40 км), мезосферу (від 40 км до 80 км) і термосферу (приблизно 10000 км). Для більшості БК ОЕСС важлива нижня частина термосфери - іоносфера, що простягається до 800 км. В тропосфері оптичний сигнал зазнає найбільшого спотворення: в інтенсивності - за рахунок поглинання і розсіювання, в координатній чи просторово-частотній області за рахунок турбулентності. Останній тип спотворень є важливим для точних спостережень на великих дистанціях і розглядається, як правило, окремо від інших факторів в рамках теорії лінійних систем [6, 7]. В більшості випадків фазовими викривленнями оптичного сигналу під впливом турбулентності атмосфери можна знехтувати. Енергетичні втрати оптичного сигналу в атмосфері описуються спектральним коефіцієнтом пропускання $\tau_a(\lambda)$ траси від об'єкта до ОС і яскравістю L_a розсіяного атмосферою випромінювання.

Контраст на вході системи спостереження визначається як:

$$K_{ex} = \frac{K_0}{1 + (L_H/L_o)(e^{\varepsilon h} - 1)}. \quad (1.1)$$

З врахуванням того, що $L_o = E\rho/\pi$, $L_H = E_w/\pi$, маємо:

$$K_{ex} = \frac{K_0}{1 + (w/\rho)(e^{\varepsilon h} - 1)}, \quad (1.2)$$

де K_0 - контраст об'єкта з фоном; L_o - яскравість об'єкта або фону (більше значення); L_H - яскравість насиченого шару атмосфери (яскравість неба біля горизонту); ρ - коефіцієнт відбиття об'єкта або фону; w - коефіцієнт погоди; ε - показник ослаблення випромінювання шаром атмосфери товщиною 1 км; E - освітленість об'єкта і фону.

Коефіцієнтом погоди w називається відношення яскравості L_H неба біля горизонту до яскравості горизонтальної абсолютно білої поверхні, освітленої сумарним денним світлом. Коефіцієнт погоди залежить від метеорологічних умов і може бути як менше, так і більше одиниці.

З другого рівняння, наприклад, можна визначити дальність спостереження:

$$h = \frac{1}{\varepsilon} \ln \left[1 + \frac{\rho}{w} \left(\frac{K_0}{K_{ex}} - 1 \right) \right]. \quad (1.3)$$

Фон можна змоделювати сумішшю кількох випадкових двомірних полів, які характеризуються середнім спектральним коефіцієнтом відбиття $\bar{\rho}(\lambda)$, спектральною коваріаційною матрицею коефіцієнтів відбиття $C(\rho)$, середньою температурою \bar{T} , дисперсією температури σ_T^2 [8]. При цьому приймається припущення, що коваріаційна матриця коефіцієнтів випромінювання повністю визначається матрицею $C(\rho)$ у відповідності до співвідношення

$$\varepsilon(\lambda) + \rho(\lambda) = 1, \quad (1.4)$$

де $\varepsilon(\lambda)$ - спектральний коефіцієнт випромінювання.

Модель об'єкта доцільно розглядати в рамках двох типових режимів роботи БК ОЕСС – пошуку і розпізнавання. В першому випадку зображення об'єкту може бути субпіксельного/піксельного розміру або займати площу кількох чутливих елементів ПВ. В другому випадку об'єкт проектується ОС щонайменше на кілька елементів ПВ. Виходячи з того, що об'єкт формує детермінований сигнал, його опис має містити просторовий розподіл спектрального напівсферичного коефіцієнту відбиття $\rho_\lambda(x, y)$ і просторовий розподіл температури $T(x, y)$, які вважаються статистично незалежними.

Завадою зазвичай вважається елемент ФЦО, який за своїми спектральними та просторовими характеристиками є подібним до об'єкта, але не належить класу об'єктів. В загальному випадку сигнал завади є стохастичним, але на практиці для аналізу ефективності БК ОЕСС доцільніше використовувати детерміновану модель завади.

Основними природними джерелами зовнішнього випромінювання є Сонце, Місяць, зірки, хмари, атмосфера. Це випромінювання є адитивним, має широкий спектральний діапазон і описується спектральною освітленістю $E(\lambda)$. В БК ОЕСС, які працюють в активному режимі, використовуються імпульсні чи безперервні джерела випромінювання. Вони мають зазвичай неширокий спектральний діапазон (або випромінюють на одній довжині хвилі) і також описуються спектральною освітленістю $E(\lambda)$. В деяких випадках необхідно брати до уваги освітленість, що створюється об'єктами чи завадами. Такі випадки необхідно розглядати окремо і вони не є типовими.

Поле освітленості в фокальній площині БКОЕСС пропорційно полю яскравості в зв'язаних точках простору предметів. Яскравість кожної зв'язаної крапки визначається суперпозицією незалежних складових яскравостей, які зумовлені відбитим прямим і розсіяним випромінюванням природного або штучного джерела, відбитим і розсіяним випромінюванням атмосфери і підстилаючої поверхні, власним тепловим випромінюванням елементів ФЦО.

Отже яскравість ФЦО в загальному випадку можна записати як (рис. 1.5):

$$L_{ent}(\lambda, x, y) = [L_s(\lambda, x, y) + L_{act}(\lambda, x, y) + L_{sd}(\lambda, x, y) + L_T(\lambda, T, x, y)(1 - \rho_\lambda(x, y))] \cdot \tau_a(\lambda) + L_a(\lambda) + L_{out}(\lambda), \quad (1.5)$$

де $L_s(\lambda, x, y)$ - яскравість простору предметів, що зумовлена прямим освітленням від зовнішнього природного джерела; $L_{act}(\lambda, x, y)$ - яскравість простору предметів, що зумовлена прямим штучним освітленням в активному режимі роботи ОЕСС; $L_{sd}(\lambda, x, y)$ - яскравість простору предметів, що зумовлена дифузно розсіяним випромінюванням; $L_T(\lambda, T, x, y)$ - власна яскравість випромінюючих поверхонь, що мають температуру T ; $L_a(\lambda)$ - яскравість власного і розсіяного випромінювання атмосфери; $L_{out}(\lambda)$ - яскравість дифузно розсіяного в атмосфері випромінювання простору предметів з поза меж поля зору ОС.

Яскравість $L_{out}(\lambda)$ може бути значною в УФ та видимому діапазонах при великих коефіцієнтах $\rho_\lambda(x, y)$, а в ІЧ області – за наявності сильно нагрітих об'єктів неподалік від поля зору БК ОЕСС [9].

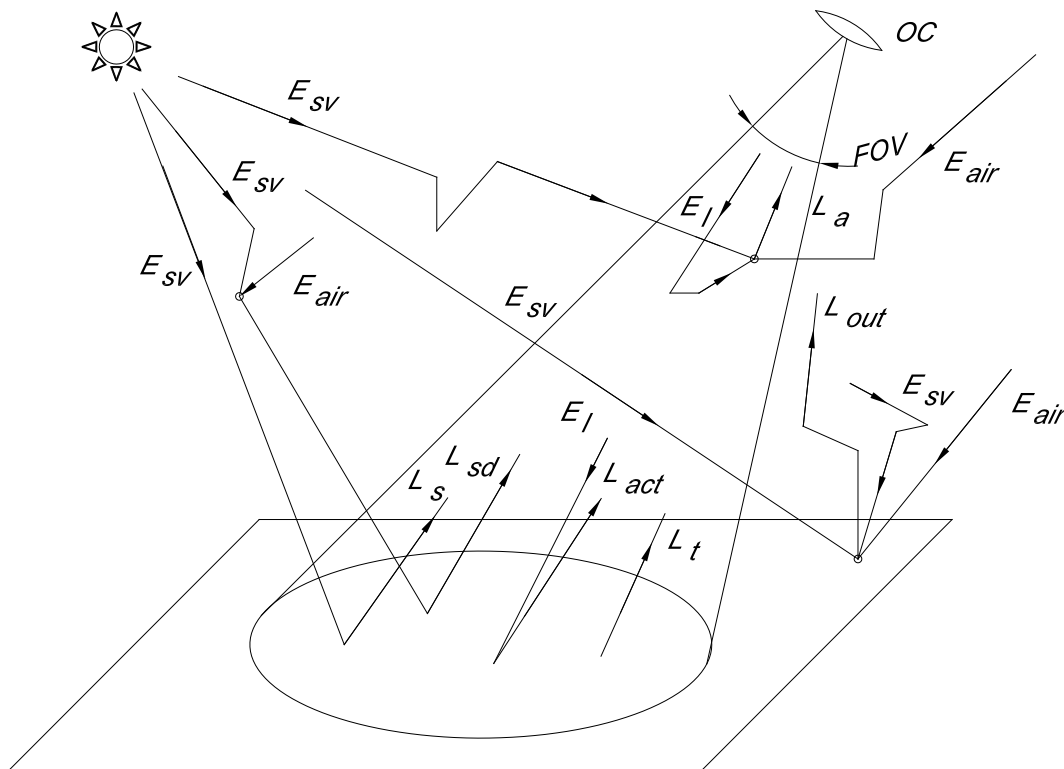


Рис. 1.5 Формування поля яскравості ФЦО

Формула (1.5) враховує всі основні джерела вхідного сигналу БК ОЕСС, що працюють в видимому та ІЧ діапазонах. Але для практичного використання

цю формулу доцільно спростити. Це неважко зробити взявши до уваги, що при великому значенні $L_s(\lambda, x, y)$ немає необхідності в $L_{act}(\lambda, x, y)$. Тобто пасивний та активний режими роботи БК ОЕСС потрібно розглядати окремо.

Беручи до уваги, що сигнали на вході й виході ОЕСС мають вид електромагнітного випромінювання, можна визначити характер релевантних параметрів, а отже – вид математичної моделі. Оптичне випромінювання характеризується інтегральною величиною потоку, спектральним складом, ступенем і видом поляризації, просторовим і часовим розподілами електромагнітної енергії. Зорова система спостерігача здатна аналізувати всі названі характеристики випромінювання окрім поляризаційних. Тому математична модель ФЦО має описувати просторовий і спектральний розподіли енергії електромагнітного випромінювання на вході в ОЕСС, тобто носити «енергетичний» характер.

Поле енергетичної освітленості ПВ в фокальній площині ОЕСС є пропорційним полю яскравості в спряжених точках простору предметів. Яскравість кожної спряженої точки є суперпозицією яскравості окремих складових, які враховують:

- відбите об'єктом випромінювання Сонця;
- власне теплове випромінювання об'єкту і фону;
- розсіяне і власне випромінювання шару атмосфери на трасі спостереження.

Крім того ідеальний сигнал від об'єкта при проходженні через всі ланки системи погіршується, що звичайно враховують через згортку з відповідною функцією розсіяння точки. Для дистанційних спостережень дуже важливим є врахування пропускання та розсіяння випромінювання в атмосфері. У вхідний блок двоканальної ОЕСС поступає електромагнітне випромінювання широкого безперервного спектру, двомірний просторовий розподіл потоку якого визначається формулою:

$$\Phi(\lambda, x, y) = \tau_a(\lambda, l) \cdot L_{ex}(\lambda, x, y) \cdot \Omega_{ex} A_{ex}, \quad (1.6)$$

де $\tau_a(\lambda, l)$ – спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери; $L_{ex}(\lambda, x, y)$ – двомірний просторовий розподіл середнього значення спектральної яскравості в просторі предметів; Ω_{ex} – тілесний кут поля зору ОЕСС; A_{ex} – площа вхідної зіниці об'єктива ОЕСС; l – дальність до об'єкта.

Функція $L_{ex}(\lambda, x, y)$ в (1.6) описує формування і перетворення сигналів ФЦО. Просторовий розподіл спектральної яскравості, тобто залежність $L(x, y)$ в найпростіших випадках можна математично описувати безпосередньо двомірною імовірнісною функцією. Для опису близьких до реальності ФЦО традиційною фізико-математичною моделлю об'єктів є просторовий набір зв'язаних елементарних площадок, які є дотичними до поверхні об'єкта. Такий просторовий набір може бути двомірним, або тримірним. Спектральна енергетична світність випромінювання від кожної i -ї елементарної площадки приблизно можна розрахувати за формулою:

$$M_{повн}^i(\lambda) = M_{вн}^i(\lambda) + M_n^i(\lambda) - M_{\kappa}^i(\lambda) + M_{від}^i(\lambda), \quad (1.7)$$

де $M_{вн}^i(\lambda)$ – спектральна енергетична світність випромінювання за рахунок власної внутрішньої енергії; $M_n^i(\lambda)$ – спектральна енергетична світність випромінювання, що обумовлена поглинутою об'єктом зовнішньою енергією; $M_{\kappa}^i(\lambda)$ – втрати випромінювання за рахунок конвекції; $M_{від}^i(\lambda)$ – спектральна енергетична світність відбитого від площадки випромінювання.

Спектральна енергетична світність $M_{вн}^i(\lambda)$ визначається формулою Планка, спектральним коефіцієнтом випромінювання $\varepsilon(\lambda)$ і в загальному випадку залежить від багатьох факторів. Наприклад, штучні об'єкти, споруди можуть містити потужні джерела видимого випромінювання. Досконало змоделювати простір об'єктів в такому випадку практично неможливо. Але в переважній більшості випадків споживача ОЕСС цікавлять ситуації спостереження на природних фонах, або при апріорно відомих умовах освітлення. В таких випадках можна знехтувати ефектами холодної

люмінесценції і вважати основним активним джерелом випромінювання нагріту ділянку об'єкта. Причому, при підвищенні температури максимум функції $M_{en}^i(\lambda)$ зміщується з інфрачервоного в видимий діапазон у відповідності до закону Віна.

Величина $M_n^i(\lambda)$ залежить в першу чергу від теплофізичних властивостей об'єкта, радіаційного нагріву, спектрального коефіцієнту випромінювання $\varepsilon(\lambda)$. В більшості практичних ситуацій найпотужнішим джерелом опромінення поверхні об'єкта є Сонце і на радіаційний нагрів від навколишнього середовища можна не зважати. Конвекційний теплообмін, який теж впливає на енергію, що поступає на об'єкт, враховується доданком $M_k^i(\lambda)$. Отже радіаційний нагрів залежить від кількості сонячної енергії, яку поглинув об'єкт $W_c^i(\lambda)$ [10]:

$$W_c^i(\lambda) = \alpha^i(\lambda) \cdot E(\lambda) \cdot \cos \varphi, \quad (1.8)$$

де $\alpha^i(\lambda)$ - спектральний коефіцієнт поглинання; $E(\lambda)$ - енергетична освітленість поверхні; φ - зенітний кут Сонця.

Спектральний розподіл енергії в сонячному випромінюванні залежить також від положення Сонця (рис. 1.6).

Для об'єкта, який лежить в площині горизонту, кут φ визначається географічною широтою ϕ , часовим кутом Сонця t і схиленням Сонця δ :

$$\cos \varphi = \cos \phi \cos t \cos \delta + \sin \phi \sin \delta.$$

Конвекційний теплообмін можна обрахувати згідно з рівнянням [11]

$$M_k^i(\lambda) = h \cdot (T_o - T_{нов}), \quad (1.9)$$

де h – коефіцієнт теплопровідності; T_o - температура поверхні об'єкта; $T_{нов}$ - температура повітря.

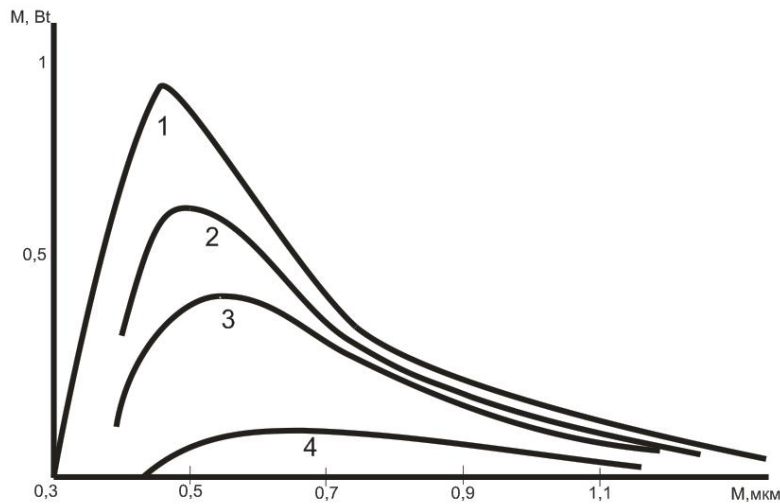


Рис.1.6 Розподіл енергії в сонячному випромінюванні [3]: 1 - за межами атмосфери; 2 - при положенні Сонця в зеніті; 3 - при висоті Сонця - 30° над горизонтом; 4 - за умов, близьких до сходу і заходу (1° над горизонтом)

За умови перевищення температури повітря температури поверхні об'єкта складова $M^i_k(\lambda)$ в формулі (1.7) матиме додатне значення.

Спектральна яскравість елементарної випромінюючої/відбиваючої площадки залежить від її розташування і від властивостей поверхні. Для суттєвого спрощення розрахунків зазвичай використовуються моделі ідеально розсіюючих поверхонь, індикатриса розсіяння яких є постійною у всіх напрямках. Такі поверхні називаються ламбертівськими. Енергетична світність об'єкта, випромінювання якого підпорядковується закону Ламберта, зв'язана з спектральною яскравістю співвідношенням $M(\lambda) = \pi \cdot L(\lambda)$.

Тоді спектральна енергетична світність відбитого від об'єкта випромінювання $M^i_{від}(\lambda)$ і спектральна яскравість визначаються відповідно за формулами [12]

$$M^i_{від}(\lambda) = \rho(\lambda) \cdot E(\lambda), \quad (1.10)$$

$$L^i_{від}(\lambda) = \frac{\rho(\lambda)}{\pi} \cdot E(\lambda), \quad (1.11)$$

де $\rho(\lambda)$ - коефіцієнт яскравості поверхні; $E(\lambda)$ - енергетична освітленість поверхні.

До того, як потрапити в об'єктів ОЕСС випромінювання проходить через атмосферу. В загальному випадку атмосфера, особливо на приземних трасах, є досить неоднорідною. Але при моделюванні систем, що не призначені для аналізу параметрів атмосфери на трасі спостереження, вважають, що спектральні коефіцієнти випромінювання $\varepsilon_a(\lambda, l)$ і пропускання $\tau_a(\lambda, l)$ атмосфери в сумі складають одиницю, тобто $\varepsilon_a(\lambda, l) = 1 - \tau_a(\lambda, l)$.

Подальше моделювання передбачає математичні операції як в просторових і часових координатах, так і в частотних координатах. Тому надалі розглядатимемо не окремі елементарні площадки, а двомірні просторові розподіли відповідних величин. З урахуванням основних складових в моделі випромінювання фоноцільової обстановки формулу (1.1) можна переписати:

$$\Phi(\lambda, x, y) = [(1 - \tau_a(\lambda, l)) \cdot L_{am}(\lambda) + L_{ex}(\lambda, x, y) \cdot \tau_a(\lambda, l) + L_{ap}(\lambda)] \cdot \Omega_{ex} \cdot A_{ex}, \quad (1.12)$$

де $L_{am}(\lambda)$ - спектральна яскравість власного теплового випромінювання атмосфери, яка моделюється абсолютно чорним тілом з коефіцієнтом випромінювання $(1 - \tau_a(\lambda))$; $L_{ap}(\lambda)$ - спектральна яскравість розсіяного випромінювання атмосфери; $L_{ex}(\lambda, x, y)$ - середнє значення спектральної яскравості об'єктів у просторі предметів.

Вхідний блок багатоканальної ОЕСС, що складається з оптичної системи і ПВ, вирізає з вхідного сигналу в загальному випадку кілька спектральних піддіапазонів і перетворює вхідний потік $\Phi(\lambda, x, y)$ в часовий розподіл електричних сигналів кількох каналів. На практиці, відштовхуючись від особливостей зорового сприйняття навколишнього світу, спектральні піддіапазони електромагнітного випромінювання оптичного діапазону розділяють на три – ультрафіолетовий (УФ), видимий, інфрачервоний (ІЧ).

Без врахування втрат потужності при просторовій виборці та в електронних блоках, сигнал на виходах ПВ різних каналів дорівнює:

- В УФ каналі

$$u_{cb}(t) = \int_{0,15}^{0,40} \Phi(\lambda, x, y) \cdot \tau_{oc}(\lambda) \cdot s_{nb}(\lambda) d\lambda, \quad (1.13)$$

де $\tau_{oc}(\lambda)$ - спектральний коефіцієнт пропускання оптичної системи;
 $s_{nb}(\lambda)$ - спектральна чутливість приймача випромінювання;

- у видимому каналі

$$u_{cb}(t) = \int_{0,40}^{0,80} \Phi(\lambda, x, y) \cdot \tau_{oc}(\lambda) \cdot s_{nb}(\lambda) d\lambda, \quad (1.14)$$

- в ІЧ каналі

$$u_{ci4}(t) = \int_{1,1}^{14} \Phi(\lambda, x, y) \cdot \tau_{oc}(\lambda) \cdot s_{nb}(\lambda) d\lambda. \quad (1.15)$$

Яскравість атмосфери в УФ піддіапазоні обумовлена сонячним випромінюванням. Незважаючи на те, що озоновий шар атмосфери значно послаблює випромінювання з довжиною хвилі $\lambda < 0,4$ мкм, біля 3% сонячного випромінювання, що попадає на земну поверхню, лежить в УФ піддіапазоні. УФ випромінювання є надзвичайно біологічно активним, тому цей піддіапазон спектру зазвичай додатково розділяють ще на три частини: $\Delta\lambda < 0,28$ мкм - С-ультрафіолет, $\Delta\lambda = 0,28 - 0,32$ мкм - В-ультрафіолет, $\Delta\lambda = 0,32 - 0,40$ мкм - А-ультрафіолет. Практично ОЕСС працюють тільки з А- і В-ультрафіолетовим випромінюванням.

В видимому діапазоні яскравість атмосфери визначається сумарним випромінювання Сонця, неба, поверхні Землі, яке розсіюється у всьому об'ємі повітряної маси, що охоплюється тілесним кутом поля зору ОЕСС. Взавши до уваги закон Кеплера, згідно якому освітленість змінюється обернено пропорційно квадрату відстані l від точкового джерела з силою світла I , і експоненціальний закон ослаблення Бугера, можна отримати формулу для обчислення яскравості розсіяного атмосферою випромінювання L_{ap} :

$$L_{ap}(\lambda, l) = k \cdot [1 - \exp(-\beta(\lambda) \cdot l)] , \quad (1.16)$$

де $\beta(\lambda)$ – повний коефіцієнт розсіювання атмосфери (для горизонтальних трас вважається постійним у всіх напрямках); k – коефіцієнт сумарного освітлення і розсіювання.

Фізичний смисл коефіцієнта k можна визначити прийнявши дальність спостереження рівною нескінченності ($l=\infty$): тоді $k = L_{ap}(\lambda, \infty)$. Тобто k є яскравістю атмосфери на всій трасі спостереження (практично – яскравістю над горизонтом). Крім того, в тумані відбувається так зване розсіяння Мі, що не залежить від довжини хвилі випромінювання [7]. Отже остаточно:

$$L_{ap}(\lambda, l) = L_{ap}(\lambda, \infty) \cdot [1 - \exp(-\beta \cdot l)]. \quad (1.17)$$

1.2.1 Пасивні канали видимого діапазону

В пасивному режимі роботи БК ОЕСС сигнал ФЦО формується тільки під впливом природних факторів. Тому складова $L_{act}(\lambda, x, y)$ в формулі (1.5) відсутня. Як вказано раніше, основним типом природного освітлення є пряме або відбите/розсіяне сонячне випромінювання. Спектральний склад цього випромінювання суттєво залежить від фазового кута Сонця, стану атмосфери. Оскільки середня температура поверхні Сонця - близько 5800 К, спектральний розподіл енергії сонячного випромінювання нерівномірний: 5% припадає на ультрафіолетову область спектру, 52% - на видиму і 43% - на ближню ІЧ область. Земна атмосфера відбиває 36% падаючої сонячної енергії і поглинає 17%. Внаслідок селективності цих процесів спектральний склад сонячного випромінювання змінюється, і лише 47% його досягає поверхні Землі. З сумарної кількості сонячного випромінювання на межі тропосфери 18% розсіюється, 12% відбивається (в основному в короткохвильовій області), а 70% поглинається земною поверхнею. Значна частка поглинутої енергії утилізується, піднімаючи середню температуру поверхні Землі до 288 К. Тому в денний час випромінювання земної поверхні складається з відбитого і

розсіяного короткохвильового випромінювання із спектральним максимумом на довжині хвилі 0,5 мкм, і власного теплового інфрачервоного випромінювання. Вночі в атмосфері присутнє тільки власне ІЧ випромінювання Землі і атмосфери.

На рис. 1.7 зображена типовий спектральний розподіл освітленість земної поверхні при нульовому зенітному куті Сонця на рівні моря [13].

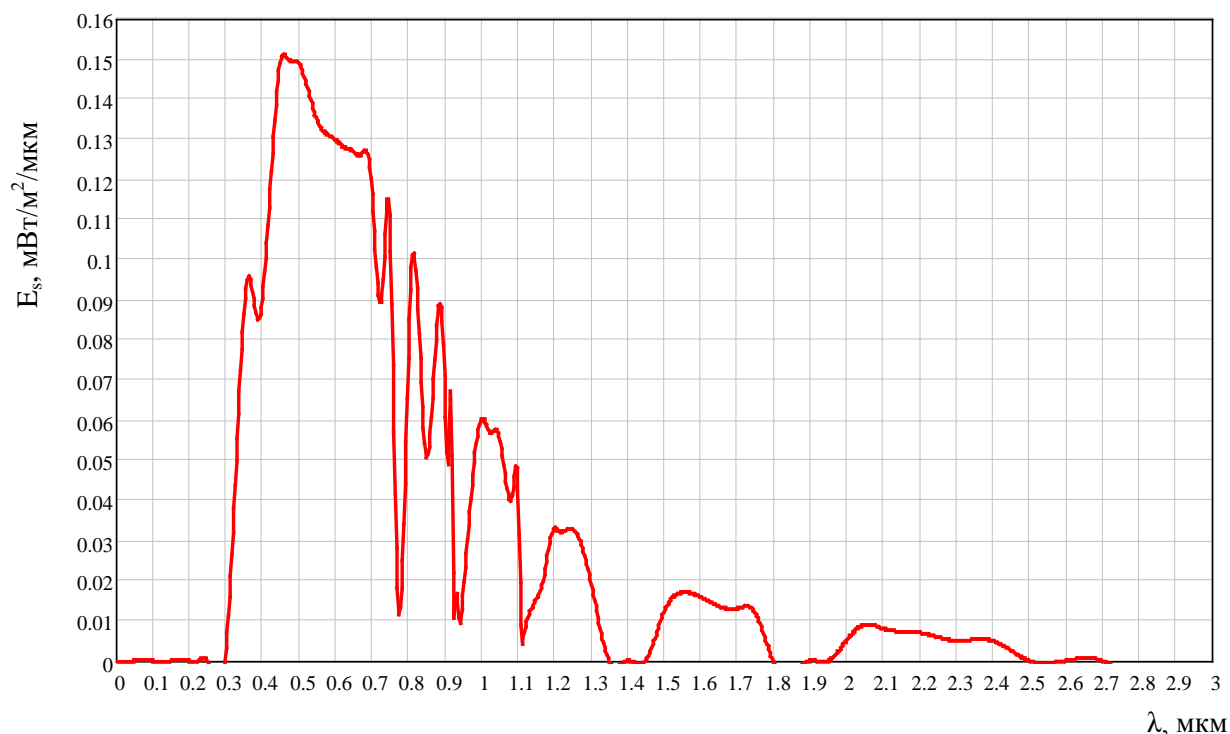


Рис. 1.7 Розподіл спектральної освітленості земної поверхні при нульовому зенітному куті Сонця на рівні моря

На вид кривої освітленості звичайно вплинув спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери. Видно, що рівні сонячної освітленості, які можна було б брати до уваги, лежать в спектральному діапазоні з довжинами хвилі не більше 2,5 мкм. Крім того атмосфера має «вікна прозорості» в діапазонах $\Delta\lambda \sim (3-4)$; $(4,5-5,3)$; $(7,4-14)$ мкм. Випромінювання поза вказаними діапазонами дуже сильно ослаблюється атмосферою і на практиці не використовується. Отже для БК ОЕСС спектральний діапазон роботи лежить в межах $\Delta\lambda \sim (0,3-14)$ мкм з врахуванням «вікон прозорості». В природі існують неселективні ПВ, наприклад, теплові, які можуть працювати в такому широкому діапазоні

спектру. Але це не використовується з огляду на низьке значення відношення «сигнал/шум». Сучасні і перспективні БК ОЕСС складаються з окремих каналів, спектральна чутливість яких оптимізована в деякому діапазоні. Так, наприклад, в діапазоні $\lambda \leq 1$ мкм здебільшого використовуються ПВ на основі кремнію, довгохвильовий поріг чутливості якого становить 1,2 мкм.

Формула (1.5) для видимого діапазону і пасивного режиму роботи БК ОЕСС (з сонячним освітленням) прийме вигляд:

$$L_{env}(\lambda, x, y) = [L_s(\lambda, x, y) + L_{sdv}(\lambda, x, y)] \cdot \tau_a(\lambda) + L_{av}(\lambda) + L_{outv}(\lambda), \quad (1.18)$$

де $L_{sdv}(\lambda, x, y)$ - яскравість простору предметів, що зумовлена дифузним розсіяним сонячним випромінюванням; $L_{av}(\lambda)$ - яскравість розсіяного сонячного випромінювання в атмосфері; $L_{outv}(\lambda)$ - яскравість дифузним розсіяним в атмосфері випромінювання простору предметів з поза меж поля зору ОС.

В переважній більшості випадків яскравість $L_s(\lambda, x, y)$ визначається прямим сонячним опроміненням $E_{sv}(\lambda)$:

$$L_s(\lambda, x, y) = \frac{\rho_\lambda(x, y)}{\pi} \cdot E_{sv}(\lambda) \quad (1.19)$$

Яскравість простору предметів за рахунок дифузного розсіяння в атмосфері описується співвідношенням

$$L_{sdv}(\lambda, x, y) = \frac{\rho_\lambda(x, y)}{\pi} \cdot E_{sdv}(\lambda) \quad (1.20)$$

де спектральна енергетична освітленість $E_{sdv}(\lambda)$ є сумою трьох основних складових - освітленості за рахунок релеєвського розсіяння $E_{sr}(\lambda)$, освітленості аерозольного розсіяння $E_{sa}(\lambda)$ та освітленості $E_{sga}(\lambda)$ за рахунок багаторазового відбиття випромінювання між земною поверхнею і атмосферою [14].

Для ізотропно випромінюючої атмосфери яскравість $L_{av}(\lambda)$ можна визначити як

$$L_{av}(\lambda) = \frac{E_{sr} + E_{sa}}{\pi} . \quad (1.21)$$

Яскравість $L_{outv}(\lambda)$ формується в результаті взаємодії прямого сонячного та дифузно розсіяного в атмосфері випромінювання і напівсферичного коефіцієнта відбиття $\rho_n(\lambda)$ простору предметів поза полем зору БК ОЕСС:

$$L_{outv}(\lambda, x, y) = \frac{\rho_n(\lambda)}{\pi} \cdot (E_{sv}(\lambda) + E_{sdv}(\lambda)) . \quad (1.22)$$

Отже формула (18) матиме вигляд:

$$L_{entv}(\lambda, x, y) = \frac{\rho_\lambda(x, y)}{\pi} \cdot \tau_a(\lambda) \cdot [E_{sv}(\lambda) + E_{sdv}(\lambda)] + \frac{E_{sr} + E_{sa}}{\pi} + \frac{\rho_n(\lambda)}{\pi} \cdot (E_{sv}(\lambda) + E_{sdv}(\lambda)), \quad (1.23)$$

Вважаючи величини $\rho_\lambda(x, y)$ і $\rho_n(\lambda)$ випадковими і статистично незалежними середнє значення яскравості $L_{entv}(\lambda, x, y)$ запишемо як

$$\bar{L}_{entv}(\lambda, x, y) = \frac{\bar{\rho}_\lambda(x, y)}{\pi} \cdot \tau_a(\lambda) \cdot [E_{sv}(\lambda) + E_{sdv}(\lambda)] + \frac{E_{sr} + E_{sa}}{\pi} + \frac{\bar{\rho}_n(\lambda)}{\pi} \cdot [E_{sv}(\lambda) + E_{sdv}(\lambda)] = \frac{1}{\pi} \cdot [E_{sv}(\lambda) + E_{sdv}(\lambda)] \cdot [\bar{\rho}_\lambda(x, y) \cdot \tau_a(\lambda) + \bar{\rho}_n(\lambda)] , \quad (1.24)$$

де $\bar{\rho}_\lambda(x, y)$ - матриця математичних сподівань напівсферичного коефіцієнту відбиття в полі зору БК ОЕСС; $\bar{\rho}_n(\lambda)$ - середнє значення спектрального коефіцієнта відбиття простору предметів поза полем зору.

В запропонованій моделі ФЦО потік випромінювання, що надходить у вхідну зіницю БК ОЕСС має три складові – відбите від об'єкта і фона в полі зору випромінювання, дифузно розсіяне в атмосфері і власне випромінювання, що не попало на об'єкт/фон, і, нарешті, відбите від елементів простору предметів поза полем зору і дифузно розсіяне в атмосфері випромінювання.

Коефіцієнт $\bar{\rho}_n(\lambda)$ в контексті даної моделі ФЦО визначає саме останню складову і є різницею між сумарним для заданого значення λ коефіцієнтом відбиття всього простору предметів і середнім по полю зору коефіцієнтом відбиття.

Дисперсію σ_{env}^2 яскравості $L_{env}(\lambda, x, y)$ визначимо як дисперсію суми двох некорельованих випадкових величин:

$$\sigma_{env}^2 = \frac{1}{\pi^2} \cdot [E_{sv}^2(\lambda) + E_{sdv}^2(\lambda)] \cdot [\sigma_{\rho\lambda}^2 \cdot \tau_a^2(\lambda) + \sigma_{\rho n}^2] , \quad (1.25)$$

де $\sigma_{\rho\lambda}^2$ - дисперсія напівсферичного коефіцієнту відбиття $\rho_\lambda(x, y)$; $\sigma_{\rho n}^2$ - дисперсія спектрального коефіцієнта відбиття простору предметів поза полем зору $\rho_n(\lambda)$.

1.2.2 Пасивні канали ІЧ діапазону спектру

В цьому режимі роботи БК ОЕСС формула (1.5) матиме вигляд:

$$L_{entir}(\lambda, x, y) = [L_{sdir}(\lambda, x, y) + L_T(\lambda, T, x, y)(1 - \rho_\lambda(x, y))] \cdot \tau_a(\lambda) + L_{air}(\lambda) + L_{ouir}(\lambda), \quad (1.26)$$

де індекс *ir* вказує на ІЧ область спектру.

Яскравість $L_{sdir}(\lambda, x, y)$ визначається енергетичною освітленістю $E_{sdir}(\lambda)$, дифузним випромінюванням атмосфери і спектральним коефіцієнтом яскравості об'єкта, який для дифузної ламбертівської відбиваючої поверхні дорівнює напівсферичному коефіцієнту відбиття $\rho_\lambda(x, y)$:

$$L_{sdir}(\lambda, x, y) = \rho_\lambda(x, y) \cdot E_{sdir}(\lambda) / \pi . \quad (1.27)$$

Освітленість $E_{sdir}(\lambda)$ в цьому випадку створюється атмосферою в напрямку простору предметів і в загальному випадку має три складові: дві компоненти розсіяного випромінювання від зовнішнього природного та штучного джерела, власну яскравість нагрітого шару повітря.

Для ламбертівського випромінювача температурою T власна яскравість об'єкта $L_T(\lambda, T, x, y)$ визначається формулою Планка

$$L_T(\lambda, T, x, y) = \frac{c_1}{\pi \cdot \lambda^5 \cdot \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]}, \quad (1.28)$$

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

Яскравість $L_{air}(\lambda)$ формується атмосферою в напрямку БК ОЕСС і в загальному випадку не є однаковою з яскравістю в напрямку простору предметів. Але для горизонтальних трас спостереження $E_{sdir}(\lambda)$ можна вважати ізотропною. Вона залежить від зенітного кута Сонця і стану атмосфери.

Одна з широко вживаних розрахункових моделей атмосфери визначається стандартом [15].

1.2.3 Активні канали БК ОЕСС

За умови недостатньої освітленості простору предметів або поганого пропускання середовища розповсюдження сигналу для невеликих відстаней спостереження використовуються додаткові штучні джерела освітлення [16]. Можливі три схеми штучного освітлення:

- зовнішнім відносно носія БК ОЕСС джерелом, наприклад, піротехнічними засобами;
- джерелами безперервної дії, наприклад, ІЧ прожекторами;
- імпульсними джерелами світла [17].

В першому випадку використовується, як правило, видимий діапазон спектру і ФЦО моделюється формулою (1.18). В другому і третьому випадках БК ОЕСС працює частіше в ближній або середній ІЧ областях спектру. Сонячне випромінювання в тому чи іншому вигляді майже відсутнє, випромінювання від інших природних джерел відносно невелике. Отже рівняння (1.5) набуде вигляду:

$$L_{ent}(\lambda, x, y) = [L_{act}(\lambda, x, y) + L_{sdir}(\lambda, x, y) + L_T(\lambda, T, x, y)(1 - \rho_\lambda(x, y))] \cdot \tau_a(\lambda) + L_a(\lambda) + L_{out}(\lambda). \quad (1.29)$$

Освітленість простору предметів на відстані R , яка є значно більшою, ніж площа A_l вихідної зіниці ОС освітлювача, можна визначити по формулі [7]:

$$E_l(\lambda) = \frac{\tau_l(\lambda) \cdot \tau_{a1}(\lambda) \cdot L_l(\lambda) \cdot A_l}{R^2}, \quad (1.30)$$

де $\tau_l(\lambda)$ - коефіцієнт пропускання ОС освітлювача; $\tau_{a1}(\lambda)$ - коефіцієнт пропускання атмосфери на трасі довжиною R ; $L_l(\lambda)$ - енергетична яскравість джерела випромінювання.

Непрозорі елементи простору предметів дифузно відбивають частину випромінювання в напрямку приймальної ОС і є вторинними джерелами випромінювання з яскравістю

$$L_{act}(\lambda, x, y) = \rho_{os}(x, y) \cdot E_l(\lambda), \quad (1.31)$$

де $\rho_{os}(x, y) = \frac{\rho_\lambda(x, y)}{\pi} \cdot \cos^2 \beta$ - направлений коефіцієнт відбиття в напрямку падіння освітлення; β - кут падіння освітлення на поверхню предмета.

Наведені формули дозволяють обрахувати функціонування БК ОЕСС за різних умов і визначити величину сигналів від об'єктів і ФЦО на вхідній зіниці ОС. Значення електричних сигналів після перетворення інформації в ПВ залежать від типу ПВ і мають визначатись для конкретних спектральних каналів БК ОЕСС.

РОЗДІЛ 2

ФОРМУВАННЯ РЕЛЕВАНТНИХ ОЗНАК ЗОБРАЖЕНЬ ПРИ ЗОРОВОМУ СПРИЙНЯТТІ

В ході візуальних спостережень БК ОЕСС, що сама є системою, входить до складу більш узагальненої системи. Метою візуальних спостережень є оцінка стану фоноцільової обстановки на різних рівнях. Для цього інформація від об'єктів в просторі предметів збирається БК ОЕСС і відображається в полі зору оператора, який приймає рішення про стан цих об'єктів. Інформація переноситься сигналами у різній формі. В цьому сенсі сигнал є фізичним процесом, який переносить інформацію від об'єкта спостереження до суб'єкта прийняття рішення про стан об'єкта. БК ОЕСС, по-суті, є інтерфейсом між об'єктом і суб'єктом спостереження. Рішення, яке формується спостерігачем, є суб'єктивною комплексною оцінкою зображення в полі зору в контексті поточної задачі і умов спостереження. При цьому спостерігач порівнює візуальний образ на сітківці ока (це останній елемент загального інформаційного середовища, в якому сигнал має форму двовимірного оптичного поля) з образом, що є сформованим на психічному рівні, з врахуванням додаткової інформації, яка поступає до спостерігача.

Очевидно, що якість процесу прийняття рішення за нормальних умов в першу чергу залежатиме від змісту і форми подачі візуальної інформації в поле зору оператора БК ОЕСС. Найбільш важливою задачею є відображення релевантних (тобто – значимих) ознак стану ФЦО. Значимість ознак визначається, як мінімум, такими факторами: фізичним станом ФЦО, типом поточної задачі спостереження, психофізіологічними особливостями та умовами зорової діяльності оператора.

Релевантні ознаки зображень використовуються в багатьох галузях техніки. Вони є об'єктом досліджень в психології, психофізіології, психофізиці, системах штучного інтелекту, кібернетиці, системах технічного зору, робототехніці тощо. Багато ознак є спільними як для суб'єктивних, так і для

об'єктивних оцінок зображень. Більш того, враховуючи надзвичайну ефективність візуального сприйняття, розробники намагаються максимально використати його особливості і для неіконічних систем аналізу зображень. Тому говорячи про релевантні ознаки зображень в подальшому розглядатимемо ті з них, які є визначальними в процесі сприйняття візуальної інформації людиною-оператором. Важливими процесами, які задають рівень релевантності, крім зорового сприйняття є фізична модель перетворення інформації про стан об'єкта у оптичне зображення, а також задача зорової діяльності. Встановивши релевантність ознак зображень можна оптимізувати технічні вимоги до БК ОЕСС.

Аналіз релевантних ознак слід розділити за місцем їх виникнення – при формуванні ФЦО, при перетворенні оптичного сигналу в електричний в приймачі випромінювання, при перетворенні електричного сигналу в оптичний в засобі відображення, при зоровому сприйнятті. Звичайно, важливі ознаки можуть бути сформовані в електронному тракті ОЕСС. Але в загальному випадку вони не є первинними, тобто такими, що не залежать від розробника БК ОЕСС - формування таких ознак спрямоване на оптимальне конфігурування інформаційного каналу, тобто є одним з основних засобів комплексування.

Перетворення оптичного сигналу в електричний супроводжується модифікаціями характеру інформаційного потоку. Найсуттєвішу роль в цьому процесі відіграє просторова дискретизація аналогового оптичного сигналу: переважна більшість телевізійних (ТВ) і тепловізійних (ТПВ) каналів ОЕСС використовують дискретні ПВ, а в приймачах відиконного типу відбувається електронне сканування. Аналогові низькорівневі ОЕСС з окулярним виводом зображення в рамках задачі, що вирішується, розглядати недоцільно.

Зворотне перетворення електричного сигналу в оптичний, враховуючи значний прогрес в засобах відображення інформації, практично не викликає безпосередньо виникнення додаткових релевантних ознак в зображенні. В той же час, характеристики оптичного поля, яке спостерігає оператор, дуже сильно впливають на результат спостереження. Це ж можна сказати і про зорове

сприйняття. Нормальна зорова система не створює в зображенні релевантних ознак, але умови спостереження і властивості оператора суттєво впливають на результати його роботи. Тобто, з точки зору формування релевантних ознак зображення, систему «засіб відображення інформації – оператор» слід розглядати як єдиний елемент, що виконує функції аналізу релевантності в контексті поточної задачі.

2.1 Задачі зорової діяльності оператора БК ОЕСС

Обов'язковою умовою виділення релевантних ознак є врахування поточної задачі спостереження.

БК ОЕСС вирішують величезне різноманіття прикладних завдань. В більшій частині - це завдання, які пов'язані з дистанційними спостереженнями в атмосфері. По-перше, такі завдання є найбільш актуальними для БК ОЕСС; по-друге, інформаційні процеси, що супроводжують дистанційні спостереження є максимально різноманітними. До галузей широкого застосування БК ОЕСС відносяться [18]:

- 1) Дистанційне зондування Землі з космосу та з повітря;
- 2) Спостереження в військових цілях;
- 3) Спостереження для охорони територій;
- 4) Дистанційна діагностика стану будівель, енергетичного обладнання тощо;
- 5) Спостереження позаземних об'єктів.

Перший з перерахованих напрямків є найбільш поширеним. Велика кількість задач, що вирішуються в рамках дистанційного зондування Землі з космосу та з повітря, безперервне розширення складу і покращення інформаційних характеристик бортових ОЕСС при одночасному їх вдосконаленні і здешевленні, розвиток нових технологій інтерпретації авіакосмічних даних, дають всі підстави прогнозувати, що в найближчі роки космічні та авіаційні ОЕСС стануть найбільш пріоритетним і ефективним

класом корисного навантаження цивільного призначення. Серед найпоширеніших задач, які виконуються авіаційними і космічними ОЕСС такі:

- прогнозування клімату, дослідження кліматичних змін (вимірювання альbedo Землі, вмісту малих газових компонентів атмосфери, атмосферного аерозолу, варіацій сонячного випромінювання тощо);
- прогнозування погоди (високоперіодичне отримання в глобальному масштабі даних про хмарний і сніжно-льодовий покриви, тривимірних полів температури і розподілу вологості атмосфери, тривимірних полів вітрів, розподілу температури і інших фізико-хімічних параметрів поверхні Землі);
- оцінка і прогноз стану сільськогосподарських культур, пасовищ, лісів, ґрунтів, внутрішніх водоймищ і сніжного покриву;
- інформаційне забезпечення господарської діяльності в провідних галузях економіки, пов'язаних з використанням і переробкою поновлюваних і неповнолюваних природних ресурсів, включаючи сільське, рибне, лісове, водне господарство, геологію і розробку родовищ корисних копалини;
- стереофотограмметрія, складання топографічних карт, цифрових карт геоінформаційних систем, карт сейсмічності і геологічних ризиків, карт лісових масивів, сільгоспугідь, інших карт тематичного призначення;
- інформаційне забезпечення діяльності по землеустрою, прокладці транспортних магістралей, будівництву промислових об'єктів і містобудуванню, складанню кадастрів земляних і інших природних ресурсів;
- океанографія і океанологія (зондування водних поверхонь з метою визначення їх температури, солоності, кольоровості, прозорості, біопродуктивності, забруднень, течій, льодової обстановки, приводного вітру, а також вивчення шельфу);
- стеження за льодовим покривом в полярних областях для забезпечення судноплавства;
- контроль і прогноз розвитку циклонів, ураганів, цунамі, забезпечення безпеки господарської діяльності в тайфунонебезпечних районах;

- екологічний моніторинг на глобальному, регіональному і локальному рівнях за розповсюдженням забруднень у всіх трьох основних природних сферах (атмосфера, поверхня суші, водне середовище), розвитком ерозійних та інших процесів деградації природного середовища; виявлення фактів і локалізація великих промислових і інших джерел забруднення навколишнього середовища; контроль трансграничного перенесення забруднень; екологічний моніторинг районів видобутку корисних копалин, транспортування вуглеводневого палива та небезпечних хімічних продуктів, найбільших скупчень промислових підприємств і мегаполісів;
- моніторинг надзвичайних ситуацій, включаючи виявлення факту надзвичайних ситуацій, оцінку масштабів і характеру руйнувань; прогнозування землетрусів і інших руйнівних природних явищ; сповіщення про цунамі, повені, селі, хімічне і інше зараження місцевості, лісові пожежі, великі розливах нафтопродуктів тощо.

Спостереження в військових цілях і спостереження для охорони територій відрізняються масштабами інформаційних потоків, типами носіїв, специфічними технічними вимогами до ОЕСС тощо. Але споріднює їх однотипність глобальних виконуваних задач, а саме: пошук та виявлення об'єкту на фоні; розпізнавання об'єкту. Простір предметів має невизначені і випадкові просторові та часові характеристики, а отже - формує випадкове поле спектральної енергетичної світності оптичного діапазону спектру або випадкові просторові розподіли інших фізичних полів. З певною вірогідністю в ньому може знаходитися випромінюючий чи відбиваючий об'єкт, що становить певний інтерес в контексті вирішуваної пошукової задачі [19]. ОЕСС повинна допомогти відповісти на питання, чи є в полі зору сигнал разом з завадою або тільки завада. Тобто задача виявлення об'єкту є еквівалентною задачі виявлення корисного сигналу на фоні завад. Розпізнавання об'єкту можна охарактеризувати кількома ступенями, які в цілому визначають можливість достовірного віднесення об'єкту до відомого вузького класу [20].

Дистанційна діагностика стану будівель та енергетичного обладнання відрізняються суттєво один від одного за зовнішніми ознаками і місцем застосування, але мають дуже схоже внутрішнє наповнення. Основні задачі, що вирішуються тут є тотожними до перелічених у попередньому абзаці: пошук та виявлення, розпізнавання об'єкту. Основними відмінностями є значно вужчі класи потенційних об'єктів і часто наявність апріорної інформації про можливе їх місцезнаходження (спрощена задача пошуку).

Спостереження позаземних об'єктів відноситься до галузі астрономічних наук. Від інших він відрізняється великою вартістю і унікальністю кожного технічного рішення. Семантика вихідних зображень в цьому випадку набагато простіша, ніж в вищезгаданих. Тому тут можна реалізовувати БК ОЕСС з нескладними алгоритмами комплексування каналів.

Важливим є визначення категорії «поточна задача» для оператора ООЕС. Справа в тому, що трактування цього терміну розробниками приладів і психологами різне. Відомі критерії Джонсона [5], запропоновані ще в 1958 році, оперують поняттями виявлення, встановлення орієнтації, розпізнавання, ідентифікація. Лабораторія нічного бачення (NVL) розробила модель [21], в якій встановлення орієнтації і розпізнавання замінені відповідно попереднім та кінцевим розпізнаванням. Критерії NIIRS [22] задають 10-бальну шкалу етапів зорового сприйняття зображень для оцінки якості ОЕСС. З іншого боку, сучасна психологія при описі зорового сприйняття оперує поняттям «перцептивні дії» [23], які розділяються на пошукові та розпізнавальні. Звичайно, розпізнавання може мати декілька градацій детальності, але загальний механізм перцептивних дій залишається ймовірно незмінним. Відповідно до цього твердження дослідимо релевантні ознаки на етапі пошуку та розпізнавання. Процес зорової діяльності оператора обмежимо найбільш поширеною ситуацією - бінокулярним спостереженням на плоскому екрані.

Пошук та виявлення об'єкта. Механізми візуального пошуку об'єктів досліджуються багато років і на сучасному етапі описуються досить

адекватними моделями. В спрощеному вигляді більшість моделей враховують дві стадії пошуку – попередню, на якій зорова система автоматично фіксується на визначеній ділянці поля зору, і кінцеву, на якій відбувається цілеспрямований аналіз виділеної ділянки поля зору з участю еталонних образів, що знаходяться в пам'яті оператора. Найтипівішими варіантами виконання пошукової задачі, які розглядаються психофізиками і психологами, є: пошук малого об'єкта на рівномірному фоні, пошук великого (продовженого) об'єкта на рівномірному фоні, пошук малого або великого об'єкта на нерівномірному (структурованому) фоні. Крім того окремо задаються умови пошуку - рухомість або нерухомість об'єкта, наявність апріорної інформації про присутність об'єкта в полі зору.

В найпростішому випадку зорового пошуку на рівномірному фоні час пошуку не залежить від форми об'єкта, а визначається його площею. Пошук малих об'єктів (видимий кутовий розмір до $7'$) простої форми на рівномірному фоні з допомогою ОЕП телевізійного типу досліджувався в [24]. Показано, що ймовірність правильного виявлення залежить від контрасту та кількості строк телевізійного растру в зображенні об'єкта. Наведені також результати щодо оцінки впливу контрасту, поля зору, просторового розділення (в кількості строк телевізійного растру) і складності фону на час виявлення. Встановлено, що найбільший вплив на час виявлення мають складності фону і кількість строк телевізійного растру в зображенні. У роботі [25] вказані вище релевантні ознаки були доповнені відношенням сигнал/шум, який сприймається зоровою системою оператора (табл.2.1).

В [26] при дослідженнях впливу телевізійного растру на зорове виявлення встановлено, що при вертикально орієнтованому растрі час виявлення малого об'єкта з невеликим контрастом суттєво менший, ніж при горизонтально орієнтованому растрі. Ступінь впливу фону залежить від його схожості з об'єктом: по мірі зближення просторово-частотних характеристик об'єкта і фону зростає час пошуку. Крім того, час пошуку також залежить від розміру

поля пошуку, кількості та просторового розподілу фонових утворень в полі зору.

Таблиця 2.1 Залежність порогових характеристик телевізійного зображення від поточної задачі

Поточна задача	Тип фону	Кількість строк телевізійного растру в зображенні об'єкта	Граничне відношення сигнал/шум для різної кількості строк телевізійного растру на екрані			
			100	300	500	700
Виявлення	Рівномірний	1	2,8	2,8	2,8	2,8
	Нерівномірний	2	4,8	2,9	2,5	2,5
Розпізнавання	Рівномірний	8	4,8	2,9	2,3	2,5
	Нерівномірний	8	6,4	3,9	3,4	3,4
Ідентифікація	Рівномірний	13	5,8	3,6	3,0	3,0

Багато експериментальних досліджень [27 - 29] присвячені виявленню рухомих об'єктів. В цілому автори роблять висновок, що при сталих умовах спостереження існують оптимальні виходячи з критерію максимальної ймовірності виявлення швидкості переміщення об'єкта в полі зору. Це справджується і на рівномірних і на нерівномірних фонах. Граничні значення контрасту зображення об'єкта при його виявленні залежать від знаку контрасту [30]: якщо на рівномірному фоні знаходяться два об'єкта, один з яких світліший, а другий – темніший від фона на однакову величину, то ймовірність виявлення в другому випадку вища.

Значний вплив на ефективність зорового пошуку відіграють кольори на зображенні. Відомо, що людина краще сприймає зміни в кольорі, ніж в яскравості, розмірі, формі. Наприклад, в [31] показано, що час зорового пошуку об'єкта на екрані авіаційного бортового дисплея зменшується на 32%, якщо монохромне зображення замінити кольоровим. У випадку зменшення просторової роздільної здатності в зображенні різниця в часі збільшується. Орієнтація зображення як ознака для пошуку має більшу релевантність ніж розмір, але меншу, ніж колір.

Аналіз впливу умов спостереження на ймовірності виявлення об'єкта показує [32, 33], що головними факторами є досвідченість оператора, наявність апріорної інформації про об'єкт, стан світлової адаптації зорової системи оператора, кутовий розмір поля зору, час, що відведений на виконання задачі.

Розпізнавання об'єкта. Психофізіологічні аспекти зорового розпізнавання на сьогодні вивчені значно гірше, ніж пошуку. Основними напрямками досліджень в цій галузі є визначення релевантних ознак зображень об'єктів на рівномірних фонах та встановлення закономірностей розпізнавання об'єктів на нерівномірних фонах. Вплив фону та просторового розділення в зображенні об'єкта на ймовірність його розпізнавання досліджувався в [24]. Показано, що, збільшення кількості строк в зображенні об'єкта від 5 до 10 супроводжується підвищенням ймовірності розпізнавання. Подальше збільшення просторового розділення не призводить до помітного впливу на розпізнавання. Кількість строк в зображенні об'єкта в сенсі зорового сприйняття пов'язана з контрастом та кількістю рівнів сірого. Експерименти з розпізнавання об'єктів складної форми показують [34, 35], що при зміні контрасту в межах від 0,2 до 0,6 при всіх значеннях просторового розділення відбувається значне підвищення ймовірності розпізнавання, але 100% розпізнавання відбувається тільки при 40 строках в розмірі зображення об'єкта. В той же час, в [24] показано, що в зображеннях з невеликим просторовим розділенням кількість градацій сірого практично не впливає на розпізнавання. Цей вплив посилюється зі збільшенням кількості строк починаючи з 12.

Розпізнавання в умовах шумів вивчається дуже активно. Як правило розглядається ймовірність розпізнавання об'єкта на рівномірному фоні в присутності адитивних шумів, або розпізнавання об'єкта на нерівномірному фоні (який в цьому випадку ототожнюється з шумом). В табл. 2.2 наведені результати вимірювання ймовірності розпізнавання портретів та пейзажів за наявності адитивного квазібілого шуму в спектральному діапазоні від 0 до 1,1 кГц [36]. Помітна схожість результатів при різних типах об'єктів. Водночас,

такі ж експерименти [37] за наявності корельованого гаусового шуму дали значно більші значення ймовірностей розпізнавання.

Таблиця 2.2 – Залежність ймовірності розпізнавання від відношення сигнал/шум, що сприймається оператором

Відношення сигнал/шум	Ймовірність розпізнавання	
	Портрет	Пейзаж
1,0	0,33	0,25
1,5	0,53	0,42
2,0	0,70	0,74
3,0	0,94	0,90

Помітна схожість результатів при різних типах об'єктів. Водночас, такі ж експерименти [37] за наявності корельованого гаусового шуму дали значно більші значення ймовірностей розпізнавання.

Найважливішою ознакою монохромного зображення при розпізнаванні є форма. Зважаючи на складність задачі, як правило, досліджується візуальне сприйняття різних типів об'єктів (як простих геометричних фігур, так і реальних зображень) на одному фоні, або одного об'єкта в різних ракурсах. Наприклад, в [38] показано, що для 50% розпізнавання квадрата просторове розділення в його зображенні може бути вдвічі меншим, ніж для шестикутника, але на 60% більшим, ніж для трикутника. В [39] на прикладі оцінки телевізійних зображень морських суден показано, що ефективність розпізнавання бокового зображення суттєво вища, ніж фронтального зображення. Нажаль, поняття форми на сьогодні не має усталеного формального опису. Багато дослідників пропонують різні рішення цієї проблеми, але серед них є й загальноновизнані факти. Окрім складності форми на ефективність розпізнавання впливає також рухомість об'єкта: при збільшенні кутової швидкості зображення в полі зору від 0 до 14 кут.град/с час розпізнавання форми збільшується в 1,5 – 4 рази [40].

Усвідомлення ситуації (Situation awareness) є відносно новою концепцією змістовного аналізу навколишньої обстановки оператором. Ця концепція останнім часом набуває широкої популярності в інтерпретації М.Р. Ендслі [41] і ґрунтується на ідеї усвідомлення оператором елементів навколишнього середовища, їх розуміння в контексті змісту поточного завдання і прогнозування майбутнього стану навколишньої обстановки. Цілком ймовірно, що з огляду на значне підвищення вимог до ефективності ОПОЕС, задача усвідомлення ситуації стане стандартною в методиках розрахунків цих систем. Дослідження впливу комплексування зображень на усвідомлення ситуації оператором виявили позитивний ефект для тих методів, що використовувались [42].

Подальше моделювання формування інформації потребує формалізації процесу зорового пошуку об'єкта на шумовому фоні та передбачає перевірку двох гіпотез: наявність в полі зору оператора тільки зображення шумового фону чи наявність в полі зору оператора будь-якої комбінації зображення об'єкта і зображення шумового фону. Тоді створення алгоритму виявлення об'єкта полягає в формулюванні правила вибору рішення на користь однієї з гіпотез при спостереженні поточного зображення. Характеристиками алгоритму виявлення (в залежності від критерію оптимальності) можуть бути залежності середнього ризику, ймовірності помилкової тривоги або пропуску сигналу від параметрів вхідного сигналу [43]. Загальноживаними критеріями виявлення є байєсівський критерій мінімуму середнього ризику, мінімакський критерій (частковий випадок байєсівського алгоритму), критерій максимуму апостеріорної ймовірності, критерій максимальної правдоподібності і критерій Неймана-Пірсона (причому два останні критерії не потребують апріорних знань про вхідний сигнал). Алгоритм прийняття рішення за цими критеріями однаковий і передбачає порівняння відношення правдоподібності Λ з своєю пороговою величиною Λ_p , яка визначається обраним критерієм. За визначенням відношення правдоподібності є відношенням умовної ймовірності $P(u(t)/s)$ появи конкретної реалізації сигналу $u(t)$ за наявності сигналу об'єкта

в ній до умовної ймовірності $P(u(t)/0)$ появи реалізації сигналу $u(t)$ при відсутності в ній сигналу об'єкта:

$$\Lambda = \frac{P(u(t)/s)}{P(u(t)/0)}. \quad (2.1)$$

В найпростішому випадку виявлення сигналу при одноразовому вимірюванні в момент часу t і адитивній моделі шуму, який вважається стаціонарним і розподілений за нормальним законом, відношення правдоподібності прийме вигляд [44]:

$$\Lambda = \exp\left[\frac{s(t) \cdot (u(t) - 0,5s(t))}{\sigma^2}\right], \quad (2.2)$$

де $s(t)$ - миттєве значення сигналу об'єкта в загальному сигналі $u(t) = s(t) + v(t)$; σ^2 - дисперсія шуму $v(t)$.

Ймовірність виявлення зображення об'єкта на екрані монітора визначатиметься формулою

$$P_g = 1 - \Phi\left[(\ln \Lambda_n - 0,5\mu) / \sqrt{\mu}\right], \quad (2.3)$$

де $\mu = s_{\max}^2 / \sigma^2$ - відношення сигнал/шум; s_{\max} - пікове значення сигналу;

$\Phi(z_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{z_0} e^{-\frac{z^2}{2}} dz$ - інтеграл ймовірностей (функція Лапласа).

В останній формулі алгоритм обчислення Λ визначається критерієм виявлення. Наразі неможливо напевно встановити який з відомих критеріїв найбільш адекватно описує зорове сприйняття людини. Тому кожен з цих критеріїв використовується на практиці. Так, згідно з моделлю зорової системи як багатоканального оптимального приймача [45] при наявності в полі зору адитивних шумів і шумів дискретизації ймовірність виявлення в кожному просторово-спектральному каналі дорівнює:

$$P_g = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot (1 + \sigma_d^2 / \sigma_a^2)} \int_{\mu_n}^{\infty} \exp\left[-\frac{(\mu_{\text{сум}} - \mu_c)^2}{2 \cdot (1 + \sigma_d^2 / \sigma_a^2)}\right] d\mu, \quad (2.4)$$

де σ_d^2, σ_a^2 - відповідно дисперсії шуму дискретизації і адитивного; $\mu_{\text{сум}} = (u_c + u_a) / \sigma$ - відношення сигнал/шум в сумарному корисному і шумовому адитивному сигналі.

У вхідний блок БК ОЕСС поступає електромагнітне випромінювання широкого безперервного спектру, двомірний просторовий розподіл потоку якого визначається формулою:

$$\Phi(\lambda, x, y) = \tau_a(\lambda) L_{\text{ex}}(\lambda, x, y) \Omega_{\text{ex}} A_{\text{ex}}, \quad (2.5)$$

де $\tau_a(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери; $L_{\text{ex}}(\lambda, x, y)$ - двомірний просторовий розподіл середнього значення спектральної яскравості простору предметів; Ω_{ex} - тілесний кут поля зору БК ОЕСС; A_{ex} – площа вхідної зіниці об’єктива БК ОЕСС.

Величину $L_{\text{ex}}(\lambda, x, y)$, яка в загальному випадку співпадає з $L_{\text{ent}}(\lambda, x, y)$ при дистанційному зондуванні в умовах поганого пропускання атмосфери слід розглядати не тривимірною, а чотиривимірною. Для цього є дві основні передумови: по-перше, фактично існує глибина простору, на якій оператор здатен задовільно оцінювати обстановку – поточний інформативний шар простору предметів. В умовах задимленості, туману, тощо при переході від одного шару до іншого суттєво змінюється пропускання та власне випромінювання атмосфери. По-друге, об’єкти, що на одній відстані несли корисний сигнал, заважатимуть спостерігати об’єкти на інших відстанях, тобто стануть завадами. Тому доцільно формулу (2.5) застосовувати для кожного і-го інформативного шару простору предметів (рис.2.1). Для обчислення можна скористатись методикою, запропонованою в [7]. Отже на вхідну зіницю ОС БК ОЕСС поступатиме двомірний просторовий розподіл монохроматичного потоку:

$$\Phi(\lambda, x, y) = \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\left[(1 - \tau_{ai}(\lambda)) \cdot L_{ami}(\lambda) + L_{api}(\lambda) \right] \cdot \prod_{j=1}^{i-1} \tau_{aj}(\lambda) \right] + \sum_{i=1}^n \left[L_{exi}(\lambda, x, y) \cdot \prod_{j=1}^i \tau_{aj}(\lambda) \right] \right\} \cdot \Omega_{ex} \cdot A_{ex} \quad (2.6)$$

де $\tau_{ai}(\lambda)$ - спектральний коефіцієнт пропускання i -го шару атмосфери; $L_{ami}(\lambda)$ - спектральна яскравість власного теплового випромінювання i -го шару атмосфери, яка моделюється абсолютно чорним тілом з коефіцієнтом випромінювання $(1 - \tau_{ai}(\lambda))$; $L_{api}(\lambda)$ - спектральна яскравість розсіяного випромінювання i -го шару атмосфери; $L_{exi}(\lambda, x, y)$ - середнє значення спектральної яскравості простору предметів, які знаходяться в i -му інформативному шарі.

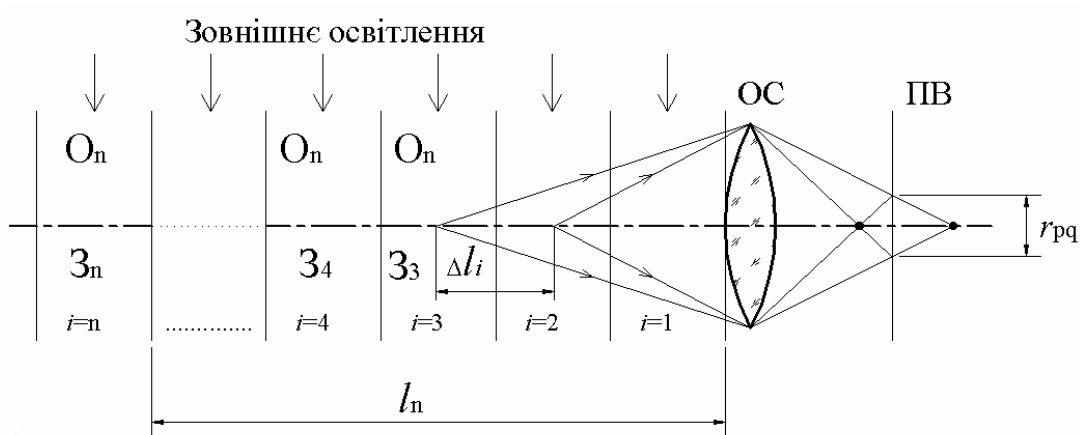


Рис. 2.1 Пошарова модель атмосфери

Зазначимо, що в формулі (2.6) атмосферна складова випромінювання i -го шару домножається на коефіцієнт пропускання всіх шарів від 1-го до $(i-1)$ -го, а предметна складова враховує також і коефіцієнт пропускання шару, в якому знаходиться предмет. Предметна складова оптичного сигналу має видиму та ПЧ частини:

$$L_{exi}(\lambda, x, y) = L_{gi}(\lambda, x, y) + L_{mi}(\lambda, x, y)(1 - \rho_i(\lambda, x, y)), \quad (2.7)$$

де $L_{gi}(\lambda, x, y)$ - яскравість простору предметів, яка зумовлена зовнішнім освітленням; $L_{mi}(\lambda, x, y)$ - власна яскравість випромінюючих поверхонь об'єкта; $\rho_i(\lambda, x, y)$ - спектральний коефіцієнт відбиття поверхонь предметів, що знаходяться в i -му шарі простору.

В найпростішому випадку виявлення одиничного точкового об'єкта часовий розподіл електричного сигналу прийме конкретне значення, яке для системи «БК ОЕСС – оператор» можна вважати постійним в межах об'єкту. Просторової сумачії сигналу зоровою системою оператора не буде, а часове накопичення візуального стимулу можна врахувати відповідним множником. Тоді за відсутності додаткових оптичних завад при візуальному спостереженні з монітору величини $\mu_g = u_g / \sigma$ в кожному каналі можуть бути безпосередньо обчислені з $u_{cv}(t)$ і $u_{ci}(t)$. Для цього оптичний шумовий сигнал необхідно привести до виходу ПВ. При відомих спектральних щільностях потужності внутрішніх шумів $\psi_{вн}(f)$ і зовнішніх шумів $\psi_{зн}(f)$, що приведені до входу ПВ, середньоквадратичне значення шуму на виході ПВ [7]:

$$\sigma = \sqrt{\int_0^{+\infty} [\psi_{вн}(f) + \psi_{зн}(f) \cdot s_{нг}^2(f)] df}, \quad (2.8)$$

де $s_{нг}(f)$ - частотна характеристика вольтової чутливості ПВ.

При комплексуванні двох каналів БК ОЕСС, що найчастіше трапляється на практиці, і відсутності в полі зору випромінюючих в видимому піддіапазоні об'єктів відношення сигнал/шум в видимому діапазоні обчислиться як:

$$\mu_{g1} = \Omega_{вх} \cdot A_{вх} \cdot \eta_t \cdot \int_{0,45}^{0,85} \left\{ \sum_{i=1}^n \left[L_{api}(\lambda) \cdot \prod_{j=1}^{i-1} \tau_{aj}(\lambda) \right] + \sum_{i=1}^n \left[L_{gi}(\lambda, x, y) \cdot \prod_{j=1}^n \tau_{aj}(\lambda) \right] \right\} \times \\ \times \tau_{oc}(\lambda) \cdot s_{нг}(\lambda) d\lambda / \sqrt{\int_0^{+\infty} [\psi_{вн}(f) + \psi_{зн}(f) \cdot s_{нг}^2(f)] df}, \quad (2.9)$$

де η_t - коефіцієнт збільшення відношення сигнал/шум за рахунок часового інтегрування зоровою системою оператора.

В другому каналі за деяких обставин, наприклад, в умовах туману можна знехтувати яскравістю $L_{ei}(\lambda, x, y)$. Тоді в ІЧ діапазоні:

$$\begin{aligned} \mu_{e2} = & \Omega_{ex} \cdot A_{ex} \cdot \eta_t \cdot \int_{7,5}^{13} \left\{ \sum_{i=1}^n \left[(1 - \tau_{ai}(\lambda)) \cdot L_{ami}(\lambda) + L_{api}(\lambda) \right] \cdot \prod_{j=1}^{i-1} \tau_{aj}(\lambda) \right\} + \\ & + \sum_{i=1}^n \left[L_{mi}(\lambda, x, y) (1 - \rho_i(\lambda, x, y)) \cdot \prod_{j=1}^n \tau_{aj}(\lambda) \right] \times \\ & \times \tau_{oc}(\lambda) \cdot s_{ns}(\lambda) d\lambda / \sqrt{\int_0^{+\infty} [\psi_{en}(f) + \psi_{zn}(f) \cdot s_{ns}^2(f)] df} \end{aligned} \quad (2.10)$$

З метою суттєвого спрощення розрахунків доцільно взяти до уваги те, що в типових випадках величина $\psi_{zn}(f)$ значно перевищує $\psi_{en}(f)$. Крім того іноді можна ігнорувати ситуацію, коли фоном для об'єктів переднього шару простору є об'єкти наступного більш віддаленого шару. Тоді модель зовнішнього шуму зручно подати в вигляді опису нерівномірного випадкового протяжного фону в останньому інформативному шарі з середньоквадратичним відхиленням σ_f (яке звичайно залежатиме від довжини хвилі):

$$\sigma = \Omega_{ex} \cdot A_{ex} \cdot \int_{\Delta\lambda} \sigma_f(\lambda) \cdot \tau_a(\lambda) \cdot \tau_{oc}(\lambda) \cdot s_{ns}(\lambda) d\lambda. \quad (2.11)$$

Отже остаточно маємо:

- для видимого каналу $\Delta\lambda=0,45 - 0,85$ мкм

$$\begin{aligned} \mu_{e1} = & \eta_t \cdot \int_{0,45}^{0,85} \left\{ \sum_{i=1}^n \left[L_{api}(\lambda) \cdot \prod_{j=1}^{i-1} \tau_{aj}(\lambda) \right] + \sum_{i=1}^n \left[L_{ei}(\lambda, x, y) \cdot \prod_{j=1}^n \tau_{aj}(\lambda) \right] \right\} \times \\ & \times \tau_{oc}(\lambda) \cdot s_{ns}(\lambda) d\lambda / \int_{0,45}^{0,85} \sigma_f(\lambda) \cdot \tau_a(\lambda) \cdot \tau_{oc}(\lambda) \cdot s_{ns}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (2.12)$$

- для ІЧ каналу $\Delta\lambda=7,5 - 13,0$ мкм

$$\begin{aligned} \mu_{e2} = & \eta_t \cdot \int_{7,5}^{13} \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\left[(1 - \tau_{ai}(\lambda)) \cdot L_{ami}(\lambda) + L_{api}(\lambda) \right] \cdot \prod_{j=1}^{i-1} \tau_{aj}(\lambda) \right] + \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^n \left[L_{mi}(\lambda, x, y) (1 - \rho_i(\lambda, x, y)) \cdot \prod_{j=1}^n \tau_{aj}(\lambda) \right] \right\} \times \\ & \times \tau_{oc}(\lambda) \cdot s_{ns}(\lambda) d\lambda / \int_{7,5}^{13} \sigma_{\phi}(\lambda) \cdot \tau_a(\lambda) \cdot \tau_{oc}(\lambda) \cdot s_{ns}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (2.13)$$

Значення яскравостей атмосфери, об'єктів і фону залежать від стану атмосфери, фазових кутів Сонця, коефіцієнта $\rho_i(\lambda, x, y)$, відстані r_i до поточного інформативного шару простору. В свою чергу відстань r_i дорівнює сумі глибин l_i інформативних шарів в полі зору: $r_i = \sum_{i=1}^n l_{i-1}$, $l_0 = 0$. Ймовірно глибина інформативного шару залежить від параметрів оптичної системи БК ОЕСС, виду фоноцільової обстановки, характеру поточної задачі, психофізіологічного стану оператора. При спостереженні з монітору доречно вважати, що величина l_i залежатиме тільки від поточної глибини різкості оптичної системи БК ОЕСС. Остання величина є різницею між дальньою і ближньою межами різко зображуваного простору [47]:

$$l_i = \frac{a_i \cdot f'^2}{f'^2 + (a_i + f') \cdot r_0 / A_0} - \frac{a_i \cdot f'^2}{f'^2 - (a_i + f') \cdot r_0 / A_0}, \quad (2.14)$$

де a_i – відстань до площини наведення на різкість в i -му шарі простору; f' – фокусна відстань об'єктива БК ОЕСС; r_0 – допустимий діаметр кружка розфокусування в площині ПВ; A_0 – відносний отвір об'єктива.

Величина a_i в нашому випадку тотожня r_i і зв'язана з f' відомою формулою відрізків. Значення g_d для систем, що є обмеженими просторовим розділенням, визначається розміром одного пікселя ПВ, а для систем, що є обмеженими контрастом – просторовим розділенням зорової системи оператора, приведеним до площини ПВ. Зазвичай оптичні системи і формати матриць ПВ в різних каналах БК ОЕСС суттєво відрізняються. Тому, строго кажучи, глибини інформативних шарів в каналах не є однаковими.

2.2 Зорове сприйняття візуальної інформації

Психофізіологія зорового сприйняття є надзвичайно широкою галуззю досліджень і вивчається в багатьох галузях науки і техніки. В рамках питань, які розглядаються в даній книзі, доцільно відокремити найважливіші аспекти зорового сприйняття комплексованих зображень на виході БК ОЕСС. Це дасть можливість отримати лише фрагментарні дані, але такі, що будуть корисними для вирішення конкретних поставлених нами задач. Виходячи з типового складу БК ОЕСС (ТВ + ТПВ канали) оператор в більшості випадків спостерігає двома очима чорно-біле зображення телевізійного типу на екрані матричного дисплея. Іноді зображення подається в псевдокольоровому вигляді. Час вирішення поточної зорової задачі, як правило, є обмеженим. Умови спостереження часто є нестаціонарними, із значними зовнішніми завадами. Об'єкти спостереження, як правило, відносяться до апріорно відомих типів. Отже далі будемо аналізувати більшою частиною ефекти та закони бінокулярного зору людини в плані сприйняття динамічних монокольорових (або - з невеликою кількістю кольорів) зображень при вирішенні кількох типових зорових задач.

Моделювання зорового сприйняття частіше здійснюється на основі аналізу психофізичних ефектів, ніж нейробіологічних. Це викликано більшою опрацьованістю і практичною цінністю (принаймні на теперішньому етапі) першого напрямку. Відповідно в основу розрахункових алгоритмів в першому випадку покладаються оцінки базових примітивів зображення безвідносно до його змісту, а в другому випадку – статистичні оцінки локальних об'єктів/зон на зображенні з врахуванням його семантики. В обох випадках обов'язково береться до уваги зміст поточної задачі. Також наразі не можна обійтись без експериментальних досліджень методом суб'єктивних експертиз для підтвердження адекватності нових створених моделей.

2.2.1 Основні закони зорового сприйняття

Дослідження зорового сприйняття зазвичай умовно розділяють на два рівні – вивчення очей як оптично-перцептивних систем і вивчення зон головного мозку, які відповідають за психофізичне сприйняття.

Будова ока людини вивчена досить добре, хоча й донині з'ясовуються більш тонкі деталі. З оптичної точки зору очей є центрованою оптичною системою, що складається з двох лінз - рогівки та кришталика, які розділені передньою камерою, заповненою водянистою вологою. Передня поверхня рогівки граничить із повітрям, а між кришталиком і сітківкою розташоване склоподібне тіло. Роль апертурної діафрагми в оці виконує зіниця. На рис. 2.2 схематично показаний розріз ока.

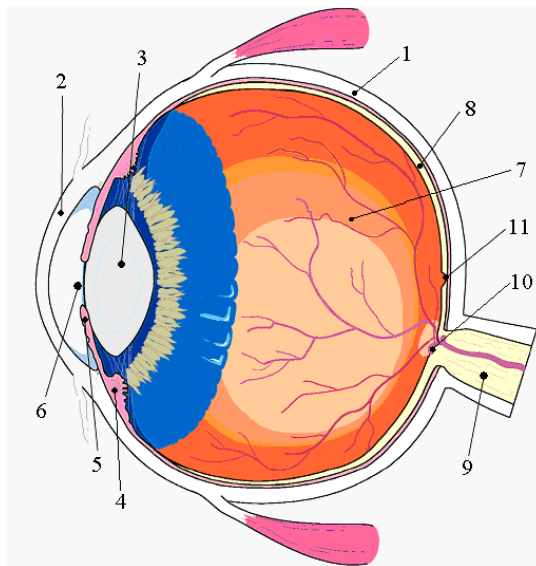


Рис. 2.2 Схема будови ока: 1 - склера; 2 - рогівка; 3 - кришталик; 4 - війкове тіло; 5 - райдужна оболонка; 6 - передня камера; 7 - склоподібне тіло; 8 - сітківка; 9 - зоровий нерв; 10 - сліпа пляма; 11 - центральна ямка

Око є кулеподібним тілом з кількома оболонками. Зовнішня оболонка 1, яку називають білковою оболонкою або склерою, є непрозорою і складається з сухожиль. Вона виконує захисну роль. Спереду склера переходить в прозору і більш опуклу рогівку 2. Під склерою знаходиться пігментний шар, який поглинає розсіяне світло і оберігає оптичне зображення, що створюється очною лінзою - кришталиком 3, від спотворення розсіяним світлом. Судинна оболонка

спереду переходить у війкове (циліарне) тіло 4, а потім - у райдужну оболонку 5 (райдужку), що містить пігментні клітки. Простір між кришталиком 3 і рогівкою 2 (передня камера 6) заповнений вологою. За кришталиком знаходиться скловидне тіло 7, що в основному складається з води. Кривизною кришталика управляють м'язи війкового тіла 4. Зважаючи на те, що показники заломлення передньої камери, кришталика і скловидного тіла дуже близькі, кришталик виконує не стільки фокусуючу роль, скільки корегуючу.

Рецепторною поверхнею ока є сітківка (ретіна) 8. Рецепторами в сітківці слугують клітини - палички і колбочки, що містять чутливі до світла фото пігменти. Останні розкладаються під дією фотонів і запускають тим самим електричну реакцію рецепторів. Клітки сітківки сполучені з мозком за допомогою зорового нерва 9. На місці виходу зорового нерва знаходиться сліпа пляма 10, що не містить рецепторів. Всього в сітківці близько $12 \cdot 10^7$ паличок - вони забезпечують чорно-білий зір і $7 \cdot 10^6$ колбочок - вони забезпечують як кольоровий, так і чорно-білий зір. Центральна ямка захищена жовтим фільтром (жовта пляма, макула), який захищає її від впливу інтенсивного короткохвильового випромінювання, а також знижує хроматичні аберації, що виникають внаслідок того, що короткохвильові зображення більшу частину часу перебувають не в фокусі. Жовті фільтри кришталика і макули є основним елементом варіабельності колірного зору в спостерігачів з нормальним колірним зором. При спостереженні деталей предмету зорова система орієнтується так, щоб зображення попало в центр сітківки. Ця частина сітківки забарвлена жовтим пігментом, що оберігає рецептори від надмірного збудження короткохвильовим випромінюванням. Середня частина жовтої плями поглиблена і називається центральною ямкою 11. В середині центральної ямки знаходиться т.зв. фовеола, що містить тільки колбочки. Вона має кутовий розмір близько 2° . Тут щільно розміщені близько $5 \cdot 10^4$ колбочок. Тобто, око має дві вісі – оптичну (задається кришталиком) і візуальну (задається фовеолою). З віддаленням від фовеоли зростає щільність паличок, а колбочок - падає.

Колбочки і палички утворюють перший – фоторецепторний рівень нейронів (рис. 2.3), який зв'язаний з двома іншими рівнями, розташованими попереду них. На другому рівні (місцево-асоціативному) розміщені біполярні нейрони. Разом з горизонтальними і амакринними нейронами вони зв'язують фоторецептори між собою і з нейронами третього рівня - гангліозними нейронами. Гангліозні клітини сходяться до жовтої плями, утворюють зоровий нерв 9 і забезпечують передачу електричного сигналу в мозок. Оптичне випромінювання, перш ніж впливати на фоторецептори і визвати нервові сигнали в біполярних і гангліозних клітках, спочатку проходить крізь два шари цих клітин.

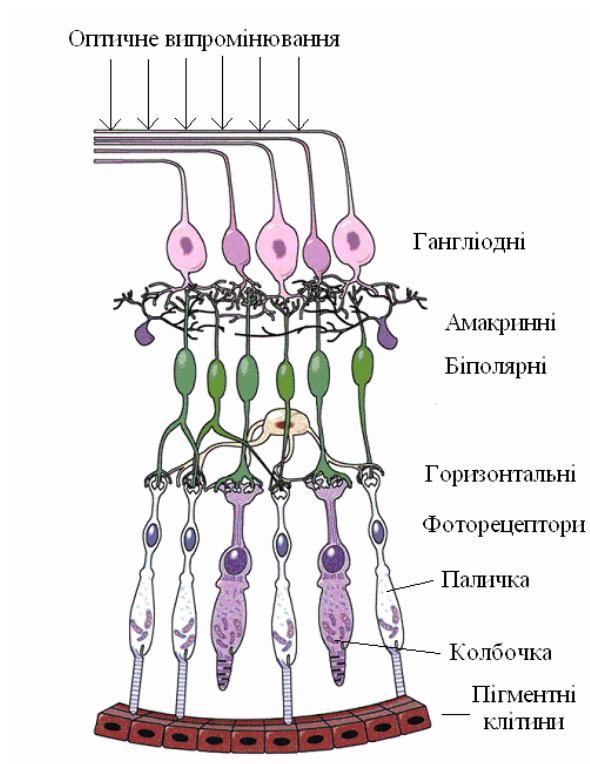


Рис. 2.3 Спрощена схема зв'язків між клітинами різних шарів сітківки

Зоровий нерв складається приблизно з одного мільйона нервових волокон і зображення на сітківці розбивається приблизно на мільйон елементів - рецепторних полів, що забезпечує можливість одночасного і багаторівневого аналізу візуальної інформації. Інформація від паличок передається по «загальних» нервових шляхах. При цьому один гангліозний нейрон обслуговує багато десятків паличок. Кожна фовеальна колбочка зв'язана з своїм волокном

зорового нерва і таким чином має індивідуальне представництво і зоровому відділенні мозку. Тому зображення предмета, який розташований біля візуальної вісі, завжди сприймається виразніше, ніж предмету, що розташований ближче до периферії поля зору.

Зорове відчуття виникає, коли під дією світлового потоку, що впав на сітківку виникає процес збудження у вигляді зворотного фоторозпаду речовин, що знаходяться в рецепторах. Це збудження у вигляді електричних імпульсів передається зоровим нервом в проєкційну зону мозку, яка знаходиться в потиличній області кори задніх відділів мозку. Мозок перетворює електричне збудження у зоровий сенсорний образ. Частота електричних імпульсів збільшується із зростанням світлового потоку, що попадає на сітківку.

З розподілу колбочок і паличок на сітківці видно, що поле зору при спостереженні кольорових об'єктів менше, ніж для чорно/білих об'єктів. Загальне поле зору нерухомого ока складає 70° вниз, 60° вгору, 60° всередину і 90° назовні. На практиці навіть при монокулярному спостереженні одного предмета око не є нерухомим. Штучна фіксація зору може обумовити порушення зорового процесу. Якщо зображення на сітківці штучно зробити нерухомим, видимий образ блідне і, як правило, частково зникає. Це пояснюється тим, що світлочутливі речовини рецепторів зазнають зворотного розщеплення під дією світла саме в моменти зміни освітленості.

При низьких рівнях яскравості в полі зору зір забезпечують тільки палички, а колбочки працюють при більш високих рівнях яскравості. Перехід від паличкового зору до колбочкового - один з механізмів, завдяки яким зір функціонує у великому діапазоні рівнів яскравості - на високих рівнях яскравості палички повністю насичуються і функціонують тільки колбочки. На проміжних рівнях яскравості й палички й колбочки функціонують спільно. Зір, при якому активні тільки палички, називається скотопічним зором, а зір, забезпечений тільки колбочками, називають фотопічним. Мезопічний зір забезпечують одночасною і палички, і колбочки.

Палички й колбочки суттєво відрізняються спектральними чутливостями

(рис. 2.4). Існує тільки один вид паличкових рецепторів, пік спектральної чутливості яких перебуває в районі 510 нм, тоді як піки спектральної чутливості трьох видів колбочкових рецепторів припадають на різні ділянки видимого спектра.

Три типи колбочок називаються відповідно своїй світлочутливості: L - колбочки - довгохвильові (Long wavelength), M - колбочки – середньохвильові (Middle wavelength), S-колбочки - короткохвильові (Short wavelength). Іноді колбочки позначають іншими символами - RGB – за назвою червоного, зеленого й синього кольорів, що фактично не відповідає дійсності. Важливо пам'ятати, що принципи формування кольорів на моніторах далекі від принципу «кольороподілу» у колбочках, що є основною причиною значної складності точного відображення кольорів.

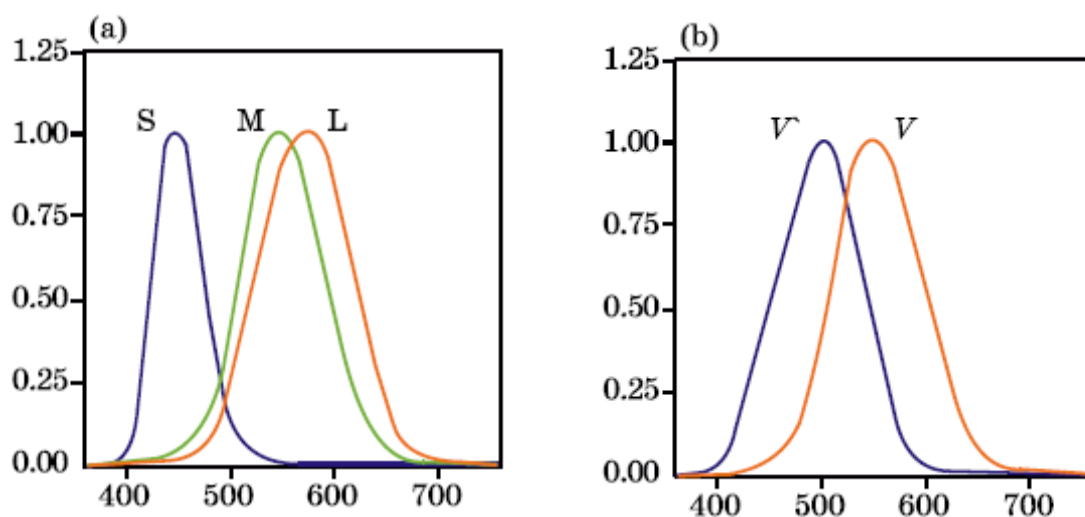


Рис. 2.4 (a) - нормовані спектральні чутливості L, M і S колбочок; (b) – нормовані функції спектральної світлової ефективності для скотопічного (V') і фотопічного (V) зору

Скотопічний зір є більш чутливим до коротких довжин хвиль, що проявляється в формі т.зв. ефекту зрушення Пуркин'є (Purkinje shift), можна спостерігати при порівнянні двох об'єктів, які при денному світлі мають однакову світлоту. Якщо червоний і синій об'єкти з однаковою світлотою

розглядати при дуже низьких рівнях освітленості, то синій об'єкт буде сприйматися досить світлим, у той час як червоний, завдяки особливостям функції скотопічної спектральної чутливості, здається дуже темним.

Світло, що впливає на сітківку, абсорбується фотопігментом різних фоторецепторів (у паличках - родопсин). Після поглинання фотона родопсин міняє свою структуру, відбувається ланцюгова хімічна реакція, результатом якої є закриття іонних каналів у клітинній стінці та поява електричного сигналу, в основі якого лежить різниця відносних концентрацій різних іонів (наприклад, натрієвих і карбонатних) поза та всередині клітки. Аналогічні процеси протікають у колбочках, родопсин яких складається з опсина й ретиналя: колбочки всіх трьох типів мають подібну фотопігментну структуру, але колбочкові опсини (конопсини) мають трохи різні молекулярні формули, що веде до відмінностей їх спектральної чутливості.

Для розуміння процесів колірного сприйняття необхідно розглянути механізми темної, світлової і хроматичної адаптації. Світлова й темнова адаптації в цілому аналогічні автоматичному контролю експозиції у фотографічних та телевізійних системах. Темнова адаптація полягає в зміні зорової чутливості, що виникає тоді, коли рівень загальної освітленості падає. П'ятикратного збільшення діаметра зіниці недостатньо для того, щоб забезпечити зір у великому діапазоні рівнів освітленості, тому нейронні механізми частину адаптації беруть на себе: колбочки на протязі кількох хвилин підвищують свою чутливість, потім на протязі приблизно 10 хвилин чутливість паличок відновлюється і починає домінувати над колбочками. Світлова адаптація - це процес, зворотний до темної адаптації, тобто це процес зниження чутливості зору в процесі збільшення загального рівня освітленості. Світлову адаптацію обслуговують ті ж самі фізіологічні механізми, але вони асиметричні і результат світлової адаптації досягається за 5 хвилин, а не за 30.

Третій тип адаптації - хроматична - тісно пов'язаний із двома попередніми. Вважається, що за хроматичну адаптацію відповідають

фізіологічні механізми, подібні з вищеописаними механізмам адаптації. Хроматична адаптація полягає в керуванні чутливістю трьох механізмів колірного зору. Хроматична адаптація проявляється при спостереженні білого об'єкта при різному спектрі освітлення (наприклад, денному або при світлі ламп розжарювання) – об'єкт все одно сприймається як білий.

Просторово-часові характеристики людської зорової системи звичайно досліджують з допомогою функцій контрастної чутливості (ФКЧ, CSF). На рис. 2.5 показані типові ФКЧ яскравості (чорно-білий стимул) і хроматичного (червоно-зелений, жовто-синій стимули при постійній яскравості) контрастів. Видно, що, по-перше, ФКЧ яскравості має максимум і значно вища, ніж хроматична, а, по-друге, зорова система людини ефективніше пропускає високочастотні складові перепадів енергії (контрастів яскравості) і не пропускає високочастотні складові хроматичних контрастів (що активно використовується на практиці при кодуванні та стисненні кольорових зображень).

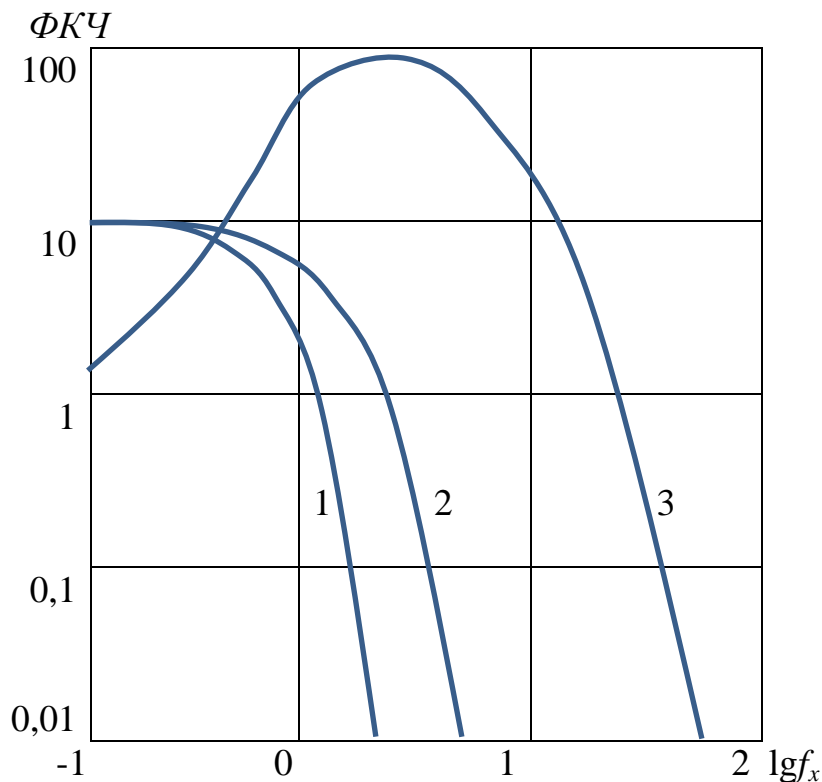


Рис. 2.5 Хроматична та яскравісна ФКЧ: 1 – жовто-синій колір; 2 – червоно-зелений колір; 3 - яскравість

ФКЧ яскравості також залежить від просторової орієнтації тест-мір. Зорові пороги при сприйнятті ґрат, орієнтованих вертикально або горизонтально, є меншими, ніж при сприйнятті ґрат, орієнтованих під кутом 45° .

Експерименти показали, що візуальний контраст зображень збільшується в міру переходу оточення від темного, через середнє, до світлого. Даний ефект виникає тому, що темне оточення змушує темні області зображення видатися світлішими, у той час як вплив оточення на світлі області є незначним (білі ділянки залишаються білими незважаючи на зміни в оточенні). Таким чином, оскільки в темних областях зображення візуальні зміни є більшими, ніж у світлих, на виході маємо зміни у візуальному контрасті. Тому, наприклад, при відтворенні телевізійних зображень у тьмяному оточенні використовують гаму телевізійної системи 1,25.

Просторові й часові ФКЧ тісно пов'язані з рухом очей: статичний об'єкт стає динамічним, коли погляд спостерігача починає ковзати по ньому. Просторова й часова яскравісні ФКЧ наближаються до нуля, коли до нуля наближається відповідна частота, і із цього випливає, що повністю статичний стимул є невидимим. Насправді, якщо зафіксувати зображення на сітківці за допомогою спеціальної відеосистеми, закріпленої на очному яблуці, то сприйняття стимулу зникає через кілька секунд.

Під час спостереження об'єкта для забезпечення чіткості зображення по всьому полю зору око рухається. Протягом однієї хвилини візуальна вісь може спостерігати до 120 точок фіксації. В середньому період однієї фіксації складає 0,2 - 0,3 с. Саме ці значення приймаються при розрахунках як постійна часу (час інтегрування) ока. Схема рухів ока показана на рис. 2.6, де зображена ділянка сітківки. В центрі ока розташований кружок, що укладає оптичне зображення точки, на якій спостерігач намагається фіксувати погляд. Рух ока поділяють на три типи: тремор - дрібне тремтіння з частотою близько 50 Гц, дрейф - переміщення очного яблука протягом тремора, саккада - поривчасті стрибкоподібні рухи тривалістю близько 20 мс.

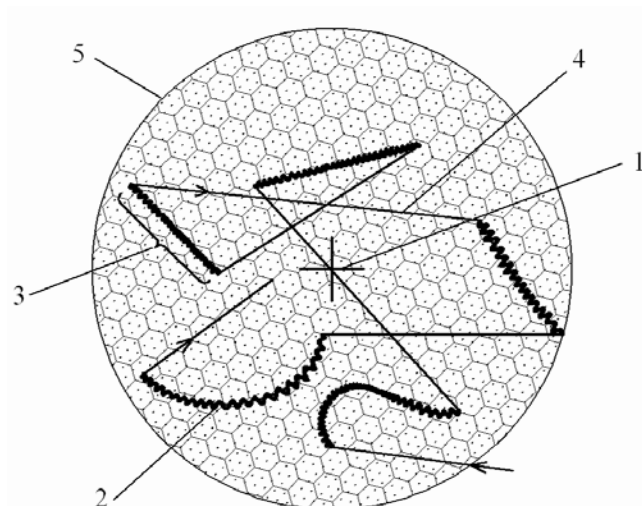


Рис. 2.6 Схема руху ока: 1 - бажана точка фіксації; 2 - тремор; 3 - дрейф; 4 - саккада; 5 - область фактичних положень фіксації

Зорова система людини має механізми, що забезпечують її настройку відповідно до зовнішніх умов: напрям очей на об'єкт здійснюється за допомогою м'язів; різке зображення на сітківці різновіддалених об'єктів виходить завдяки змінам кривизни кришталика; кількість світла, що потрапляє в око, регулюється діаметром зіниці; при змінах яскравості сприйманих об'єктів змінюється чутливість фоторецепторів.

Загальновизнаними є два рівні візуального сприйняття: - фізіологічний рівень і психологічний рівень. При цьому необхідно переробляти величезну кількість інформації в реальному масштабі часу. Цікаво, що у зоровій системі це здійснюється не розпаралелюванням каналів обробки, а організацією послідовної обробки інформації [48].

Незважаючи на величезний обсяг результатів робіт в галузі вивчення візуального сприйняття, наразі неможливо створити повноцінну модель зорової діяльності людини. Деякі з моделей [49, 50] є досить адекватними щодо фізіологічного рівня, але не враховують високорівневу психічну діяльність.

Типова схема математичної моделі зорової системи складається з кількох послідовних процесів [51]: кодування кольорів – частотний розклад – адаптація – ФКЧ – ефекти маскування.

Кодування колірної інформації через опонентні канали поряд з адаптаційними механізмами, що проявляють себе до, під час і після даної стадії, є найважливішою особливістю зорової системи людини і обов'язково повинна враховуватися моделями колірного сприйняття. Кожна з моделей містить у собі стадію хроматичної адаптації, стадію опонентної обробки й функції нелінійної відповіді; деякі моделі також містять у собі ефекти світлової й темної адаптацій, а також взаємодію між паличковою й колбочковою системами. Нарешті, досить сильно впливають на колірне сприйняття когнітивні механізми зору, такі, як колірна пам'ять і знебарвлення освітлювача.

Діапазон чутливості визначається різницею між верхнім і нижнім абсолютними порогами. Абсолютна чутливість сенсорної системи базується на її властивості виявляти слабкі, короткі або маленькі за величиною подразники. Диференціальна сенсорна чутливість базується на здібності сенсорної системи до розрізнення сигналів.

Для того, щоб виміряти рівень абсолютної і диференціальної чутливості вводиться поняття порогів відчуттів або сенсорних порогів. Дослідження по психофізиці показали, що існує зв'язок між фізичними властивостями випромінювання і його здатністю викликати те або інше відчуття.

Мінімальна величина подразника, яка викликає ледве помітне відчуття, називається нижнім абсолютним порогом чутливості. Виділяють також верхній абсолютний поріг чутливості - це максимальна величина подразника, можлива для відчуття. Подальше збільшення подразника приводить до больових відчуттів, або веде до руйнування органів чуття.

Наприклад, світло до $25 - 30 \text{ кд}\cdot\text{м}^{-2}$ сприймається не як яскравість, а як світла пляма; $200 \text{ кд}\cdot\text{м}^{-2}$ - це відчутна яскравість; $500 \text{ кд}\cdot\text{м}^{-2}$ - яскравість, що привертає увагу, $1000 \text{ кд}\cdot\text{м}^{-2}$ - яскравість, що турбує, $2000 \text{ кд}\cdot\text{м}^{-2}$ - сліпуча яскравість, а вище - нестерпна. Пороги відчуттів у людей різні і не постійні. На їх зміну впливає ряд факторів: індивідуальні відмінності людей; функціональний і емоційний стани людини; наявність внутрішніх сенсорних шумів; зовнішні умови спостереження.

Зорові відчуття розрізняються кількісно і якісно. Їх кількісна характеристика називається світлотою і визначається сумарною реакцією чутливих до кольору рецепторів (колбочок), а якісна - кольоровістю і визначається співвідношенням реакцій кожного з трьох типів колбочок. Кольоровість є двовимірною величиною - складається з насиченості і колірному тону.

Реакції зорової системи на електромагнітні випромінювання можуть бути різними. Відповідно до цього розрізняють декілька типів чутливості ока: світлову, спектральну, контрастну, чутливість до колірному тону, до колірної насиченості.

Здатність ока реагувати на малий потік випромінювання називається світловою чутливістю. Вона вимірюється як величина, зворотна пороговій яскравості. Пороговою називається та найменша яскравість об'єкту, наприклад світлової плями, при якій вона може бути виявлена з достатньою ймовірністю на абсолютно чорному фоні (тобто $B_{\phi} = 0$).

Ймовірність виявлення залежить не тільки від яскравості об'єкту, але і від точки зору, під яким він розглядається, або від його кутового розміру. Із зростанням кутового розміру росте число рецепторів, на які проектується зображення об'єкта. Практично із збільшенням точки зору більш ніж на 50° чутливість ока перестає змінюватися.

Для формування зорового відчуття необхідна потужність випромінювання, яке проникає в око, відповідає освітленості на зіниці ока приблизно $1 \cdot 10^{-9}$ лк. Цей мінімум енергії складає приблизно 10 квантів за умови, що протягом приблизно 0,1 с випромінювання потрапляє на сітківку на площі, відповідній дузі в $10''$. Для формування кольорового зору необхідно щоб на одну колбочку в середньому припадало не менше 100 квантів.

Зорові органи більшості нижчих тварин не здатні розрізняти колір об'єктів і працюють в порівняно вузькому спектральному діапазоні. Виключенням є деякі види змій, наприклад американська гримуча змія, у якої є апарат «теплого зору» з числом чутливих елементів близько 1000 і

температурним розділенням $\Delta t = 10^{-3} \text{°C}$. У сітківці ока людини є три типи колбочок з різними спектральними характеристиками. Адаптація кожного з цих типів до зміни освітленості відбувається незалежно один від одного. На виході так званих біполярних кліток сигнали від колб з різними спектральними характеристиками SR, SG і SB перетворюються в сумарний ахроматичний і два різницевих сигнали: $SZ = SR + SG + SB$, $SRG = CGSG - CRSR$, $SRGB = GRSR + CGSG - CBSB$, де SR, CG і CB - вагові коефіцієнти [52]. Завдяки лінійності перетворення сигналів, визначуваних зміною освітленості колбочок і пропорційних відноsinам приросту ефективної освітленості колбочки до її середнього значення, тобто контрастом, сприйняття колірному тону і насиченості зображення не залежить від яскравості спостережуваного об'єкту. Зоровий апарат людини має властивість колірної константності, тобто може правильно розрізняти різні кольори незалежно від спектрального складу джерела освітлення.

Чутливість ока до монохроматичним випромінюванням називається спектральною. Око людини сприймає електромагнітні хвилі в діапазоні 380 - 760 нм. Основна спектральна властивість ока полягає в тому, що випромінювання, рівні по потужності, але з різних ділянок видимого спектру, виявляють різну світлову дію. Виникнення зорового відчуття залежить, по-перше, від потоку випромінювання Φ_λ , що впало на сітківку, а по-друге, - від тієї частки потоку, яка впливає на рецептори, - це спектральна чутливість k_λ .

Добуток $k_\lambda \Phi_\lambda$ визначає характеристику потоку випромінювання, пов'язану з рівнем його світлової дії. Це є світловим потоком F_λ :

$$F_\lambda = k_\lambda \Phi_\lambda. \quad (2.15)$$

Отже, абсолютне значення спектральної чутливості визначається відношенням:

$$k_\lambda = F_\lambda / \Phi_\lambda. \quad (2.16)$$

Око має найбільшу спектральну чутливість до випромінювання $\lambda = 555$ нм, щодо якої визначаються всі інші значення чутливості.

При світлових вимірюваннях значення k_λ позначають як добуток $k_{555} \cdot v_\lambda$, де v_λ - відносне значення спектральної чутливості (відносна спектральна світлова ефективність випромінювання). Отже абсолютна спектральна чутливість визначається: $k_\lambda = k_{555} \cdot v_\lambda$. Спектральна чутливість паличок і колб різна. На рис.2.7 видно, що крива відносної спектральної світлової ефективності денного зору зміщена відносно кривою смеркового зору.

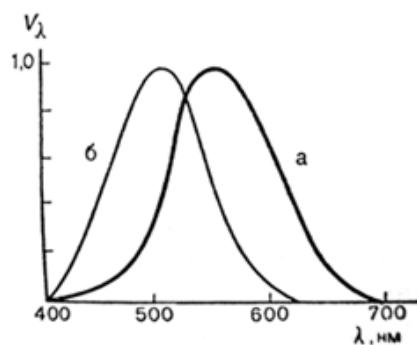


Рис. 2.7 Криві відносної спектральної світлової ефективності: а - денний зір; б - смерковий зір

Контрастна чутливість зорової системи виявляє її можливості щодо розрізнення яскравостей суміжних ділянок зображення. Чим менший контраст виявляє око, тим більше його контрастна чутливість або, інакше, чим більше число порогів Δw виявляє око в даному інтервалі яскравостей ΔB тим вище його контрастна чутливість.

Для розрізнення двох випромінювань потрібна більша різниця їх енергій, ніж та, що забезпечує виявлення випромінювання. Найменш помітний приріст відчуття, що виникає при порівнянні двох випромінювань, носить назву порогу розрізнення. Він є мірою приросту зорового відчуття. Поріг розрізнення виражають через різницю світлових характеристик порівнюваних випромінювань і називають різницеvim:

$$\Delta B = B_1 - B_2$$

де ΔB - найменша різниця яскравостей, що забезпечує зорову відмінність більшої яскравості B_1 від меншої B_2 .

Відношення $\Delta B/B$, при якому яскравості випромінювання мінімально розрізняються, називається диференційним порогом або пороговим контрастом. Вебер встановив, що $\Delta B/B$, тобто відношення додаткового подразника до основного повинно бути величиною постійною.

На рис. 2.8 показано залежність порогових контрастів від просторової частоти. Досить чітко на рисунку відслідковується границя, що відокремлює видиму синусоїдальну міру від області, що не розрізняється зоровою системою. Очевидно, що ця границя фактично повторює графік ФКЧ, яка може бути описана емпіричною формулою

$$C(\gamma) = a(b + c\gamma)e^{(-d\gamma)^g}, \quad (2.17)$$

де a, b, c, d, g – експериментально визначені коефіцієнти [54].

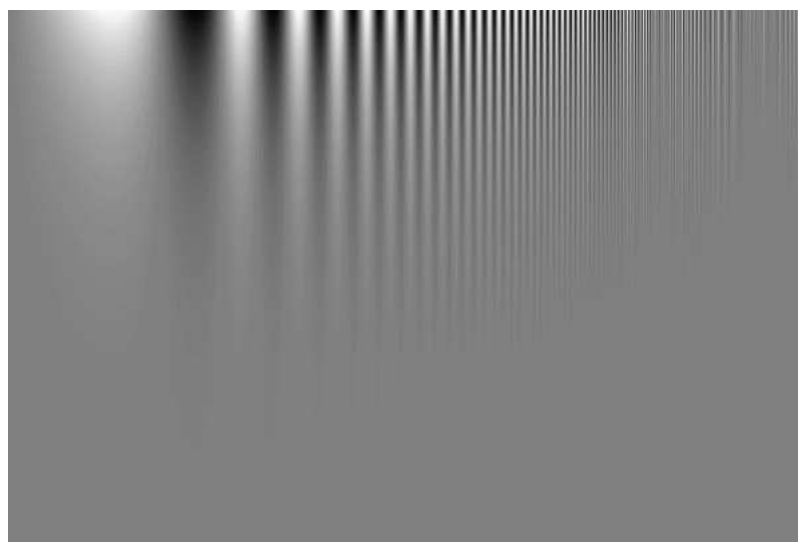


Рис. 2.8 Залежність порогових контрастів від просторової частоти [53]

Часом інерції Θ можна вважати деякий умовний проміжок часу, протягом якого тривало б зорове враження, якби воно якийсь час зберігало своє максимальне значення, а потім зникало б миттєво. Визначення часу інерції ускладнюється тим, що зорове відчуття загасає поступово. Час інерції Θ залежить в основному від яскравості фону L (кд/м²), і може бути визначений за наближеною формулою:

$$\Theta = 0,13 - 0,08 \operatorname{th}(\lg L + 1), \quad (2.18)$$

При впливі на око мінливої в часі яскравості $L(t)$ відчуття яскравості $L_3(t)$ у кожний момент t не є пропорційним $L(t)$. $L_3(t)$ залежить не тільки від яскравості, що діє в цей момент t , але й від тих значень яскравості, які відповідають більш раннім моментам часу.

Наразі відчуття яскравості не вимірюється. Однак вважають, що якщо на дане місце сітківки тривалий час діє постійна яскравість L , відчуття яскравості дорівнює цієї яскравості. При нестационарному процесі відчуття яскравості називають ефективною яскравістю L_e . Уведення поняття ефективної яскравості допомагає вирішувати низка практичних питань. Нехай, наприклад, на фоні з яскравістю L_ϕ , на короткий час t з'явиться пляма з яскравістю L . Контраст плями із фоном протягом часу τ буде

$$K = (L_\phi - L) / L_\phi, \quad (2.19)$$

тут і далі символом t позначається поточний час, символом τ – кінцевий інтервал часу (час спалаху, час експозиції).

Але оскільки τ є малим, ефективна яскравість плями L_e не досягає L , і спостерігач сприймає не дійсний контраст K , а меншу величину, яку можна назвати ефективним контрастом:

$$K_e = (L_\phi - L_e) / L_\phi. \quad (2.20)$$

Експериментально встановлено, що для сприйняття яскравостей і контрастів функція загасання виражається експонентою $A(t) = \exp(-t/\Theta)$. Якщо протягом часу τ яскравість плями є постійною й рівною L , то ефективний контраст може бути знайдений як:

$$K_e = \frac{K}{\Theta} \int_0^\tau \exp(-t/\Theta) / dt = K(1 - \exp(-\tau/\Theta)) \quad (2.21)$$

Якщо $t \leq \Theta$, то $K_e = \frac{\tau}{\Theta} K$.

Зорова інерція проявляється при сприйнятті періодично мигтючих або миготливих джерел світла. При високій частоті мигтіння око сприймає мигтюче світло як постійне. Найменша частота $\nu_{кр}$, при якій око перестає розрізняти мигтіння, називається критичною частотою злиття мигтінь. Ця величина залежить від яскравості адаптації, розміру поля зору, глибини модуляції мигтючої яскравості, відношення тривалості t одного спалаху до періоду мигтіння T и т.д. За законом Тальбота суб'єктивно сприймана яскравість L_c , якщо яскравість L_e (дійсна яскравість спалаху) змінюється повною темрявою, дорівнює:

$$L_c = L_e \left(\frac{\tau}{T} \right) \quad (2.22)$$

Для яркостей L_e проблискових джерел, що не перевищують 10^3 кд/м², якщо тривалість проблиску займає половину періоду мигтіння, для визначення критичної частоти можна скористатися формулою [33]:

$$\nu_{кр} = 12 \lg L_e + 35 \quad (2.23)$$

Значення $\nu_{кр}$ суттєво залежить від глибини модуляції яскравості й від закону зміни яскравості з часом. При зменшенні глибини модуляції значення $\nu_{кр}$ значно зменшується.

Інерцію зору необхідно враховувати й при розрахунках інформаційної пропускну здатності зорової системи. Принципи роботи зорового аналізатора мають багато загального з інженерними системами зв'язку. Це дозволяє застосувати до зорового апарата людини інформаційні критерії оцінки, прийняті в теорії зв'язку, такі як обсяг повідомлень і пропускну здатність зорової системи. Аналізуючи дані по гостроті зору в центральній частині сітківки й на периферії в роботі [53] оцінюється пропускну здатність периферичного відділу зорового апарата, що включає сітківку й передавальні зорові волокна, значенням $4,42 \cdot 10^7$ біт/с. По швидкості читання можна оцінити

пропускну здатність коркових відділів зорової системи, у яких відбувається впізнання зображень. Вона становить приблизно 20 – 70 біт/с. Таким чином, обсяг інформації, переданої периферичними відділами зорової системи, має велику надмірність, що підвищує надійність передачі, зменшуючи ймовірність одержання помилкової інформації.

Розглянемо далі більш докладно, як здійснюється сприйняття кольору оком людини. Колір навколишніх предметів залежить від їхнього спектрального коефіцієнта відбивання і пропускання, а також від спектрального складу падаючого на предмети випромінювання. Порівнюючи між собою кольори, спостерігач насамперед розділяє їх на дві групи: ахроматичні й хроматичні – кольорові. До ахроматичних відносяться чорний, білий і всі проміжні сірі кольори. Ахроматичні кольори безбарвні й відсутні у спектрі. Ахроматичні кольори мають тіла з рівномірним спектральним відбиттям або пропусканням при освітленні їх білим світлом. Чим менше коефіцієнт відбиття або пропускання таких тіл, тем темніше вони видаються при спостереженні. При змішанні чорного й білого кольорів у різній пропорції можна одержати будь-який сірий колір. Око людини здатне розрізнити лише близько трьохсот ахроматичних кольорів від білого до чорного.

До хроматичних кольорів відносяться всі спостережувані кольори, крім чорного, білого й сірих. Будь-який колір може бути визначено трьома характеристиками: колірним тоном λ , чистотою (насиченістю) P и яскравістю L (світлотою).

Під колірним тоном розуміється та якість кольору, якою він відрізняється від ахроматичного; колірний тон характеризується домінуючою довжиною хвилі. Ахроматичні кольори колірного тону не мають. Під чистотою (насиченістю) розуміють ступінь розведення даного кольору білим. Чим менше білого домішано до основного тону, тим більше його чистота. Інакше кажучи, чистотою кольору називається відношення яскравості L_{λ} монохроматичної складової до повної яскравості її суміші з білим світлом:

$$P = \frac{L_{\lambda}}{L} = \frac{L_{\lambda}}{L_{\lambda} + L_{\delta}}, \quad (2.24)$$

де L_{δ} – яскравість білої складової суміші.

Наприклад, якщо додати до 30 одиниць світлового потоку спектрального кольору з колірним тоном 580 нм, 70 одиниць світлового потоку білого кольору, то одержимо чистоту кольору $P = 0,3 = 30\%$.

Чистота кольору спектральних кольорів дорівнює 100% (або 1), тому що вони не мають домішки білого кольору. Усі ахроматичні кольори мають нульову чистоту кольору. Колірний тон і чистота (насиченість) кольору спільно визначають кольоровість кольору. Але й кольоровість, будучи якісною характеристикою, не характеризує колір повністю. Для оцінки кольору, крім кольоровості, необхідно вказати і його яскравість, яка є кількісною характеристикою кольору.

Колірний тон, чистота (насиченість) кольору та яскравість можуть одночасно охарактеризувати колір. Можна сказати, що два кольори рівні, якщо вони мають однакові кольоровість і яскравість. Але така система незастосовна для пурпурних кольорів, тому що вони не є спектральними. Ці кольори (малиновий, бузковий, вишневий) не можуть бути отримані шляхом додавання якого-небудь монохроматичного випромінювання до білого. Тому для пурпурного кольору колірний тон характеризують не довжиною хвилі λ , а довжиною λ' монохроматичного випромінювання, яке є додатковим до даного пурпурного кольору. Чистота кольору чистих пурпурних кольорів вважається рівній одиниці.

Отже, для спектральних (монохроматичних) і пурпурних кольорів $L_{\delta} = 0$ і $P = 1$. Для білого кольору $L_{\lambda} = 0$ і $P = 0$, а для інших проміжних кольорів $0 < P < 1$.

Додатковими називаються два кольори, які утворюють при змішанні ахроматичний колір. У природі існує безліч пар додаткових кольорів, у тому числі й спектральних. Додатковими до монохроматичних зелених (570 – 490 нм) умовно прийняті пурпурні кольори. Орієнтовно ділянки додаткових

кольорів є наступними: червоний – блакитний, жовтогарячий – блакитний, жовтий – синій або блакитний, жовто-зелений – пурпурний, зелений – пурпурний, блакитний – червоний або пурпурний, фіолетовий – жовто-зелений.

Ахроматичні кольори при змішанні утворюють тільки ахроматичні кольори. Спектральні ж кольори при змішанні звичайно не утворюють спектральних кольорів, тому що чистота суміші, як правило, є меншою 1. Виключення становлять кольори на ділянці (575 – 700) нм, які при змішанні дають спектральні кольори із чистотою $P = 1$.

Кожна паличка або колбочка сітківки ока містить пігмент, що поглинає випромінювання в якійсь ділянці спектра краще, чим в інших. Згідно із сучасними уявленнями, зоровий пігмент має особливу властивість: при поглинанні їм світлового фотона він змінює свою молекулярну форму й при цьому вивільняє енергію, запускаючи в такий спосіб ланцюг хімічних реакцій, які зрештою приводять до появи електричного сигналу. Пігментна молекула у своїй новій формі, як правило, має зовсім інші світлопоглинаючі властивості, і якщо, як це звичайно буває, вона поглинає світло гірше, чим у вихідній формі, то говорять, що вона «вицвітає» під дією світла. Потім складний хімічний механізм ока відновлює первісну конфігурацію пігменту.

Сприйняття кольору здійснюється колбочковим апаратом сітківки. Пігменти колбочок трьох типів мають максимуми поглинання в області 560 нм, 530 нм і 430 нм; тому різні колбочки умовно називають «червоними» (R, red), «зеленими» (G, green) і «блакитними» (B, blue). Криві спектральної чутливості трьох типів колбочок представлені на рис. 2.9.

Кожний тип колбочок має широкі зони чутливості зі значним перекриванням, особливо для червоних і зелених колбочок. Наприклад, світло з довжиною хвилі 600 нм викликає найбільшу реакцію червоних колбочок, пік чутливості яких розташований при 560 нм. Але він же викликає також, хоча й більш слабку, реакцію колбочок двох інших типів. Таким чином, «червона» колбочка, реагує не тільки на довгохвильове світло, вона лише реагує на нього краще інших колбочок.

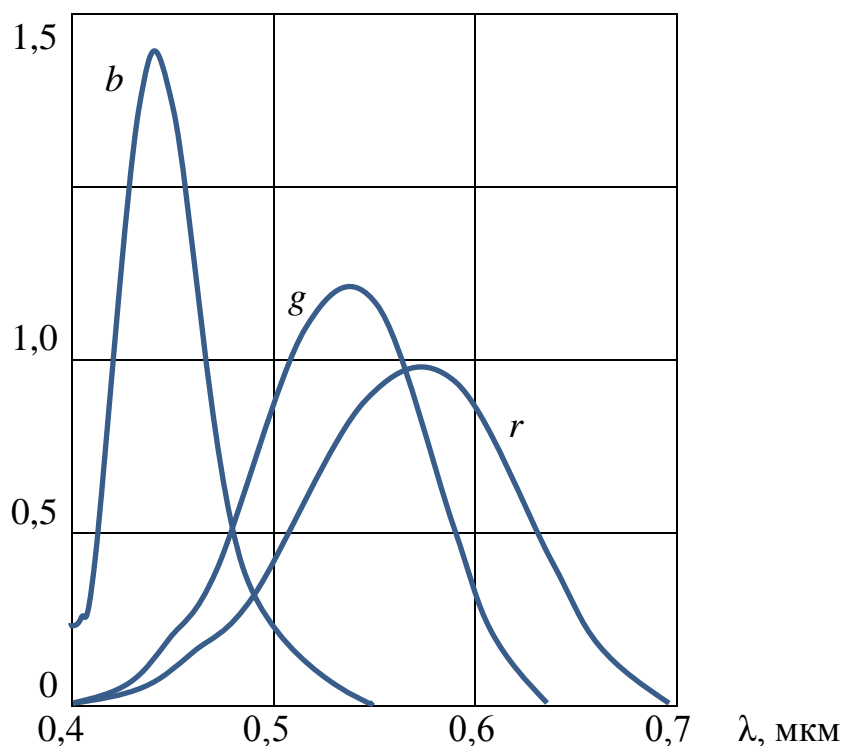


Рис. 2.9 Криві спектральної чутливості трьох типів колбочок

Існує категорія людей (т.зв. кольорові аномали), у яких один або два із трьох типів колбочок мають патологічно малу чутливість, тому й сприймані цими людьми кольори відчуються ними інакше, ніж в нормі. Є також люди, в яких сприйняття кольору відсутнє повністю. Їх називають монохроматами. Аномалії в колірному зорі зустрічаються порівняно часто: ними страждають 8% чоловіків і 0,5% жінок.

При розв'язанні задачі зорового пошуку часто виникає необхідність не тільки помітити джерело світла, але й розпізнавати його колір. Це можливо лише в тому випадку, якщо блиск джерела перевищує поріг колірного сприйняття, тобто - хроматичного граничного блиску E_c . Залежність $E_c = f(\lambda)$ при спостереженні на темному фоні наведено на рис. 2.10. З рисунка видно, що крива має два максимуми в синій та жовто-зеленій областях.

Чутливість ока до розрізнення колірних тонів неоднакова в різних областях спектра (табл. 2.3). У таблиці зазначені границі спектральних ділянок, інтервал кожної ділянки $\Delta\lambda$, значення порогів $\Delta_n\lambda$ у даному інтервалі, число порогів $n\Delta$ у кожному інтервалі й число порогів n від крайньої границі спектра

до даного інтервалу. Значення $n=129,6$, показує, що у всьому інтервалі видимого спектра спостерігач може розрізнити близько ста тридцяти градацій колірною тону.

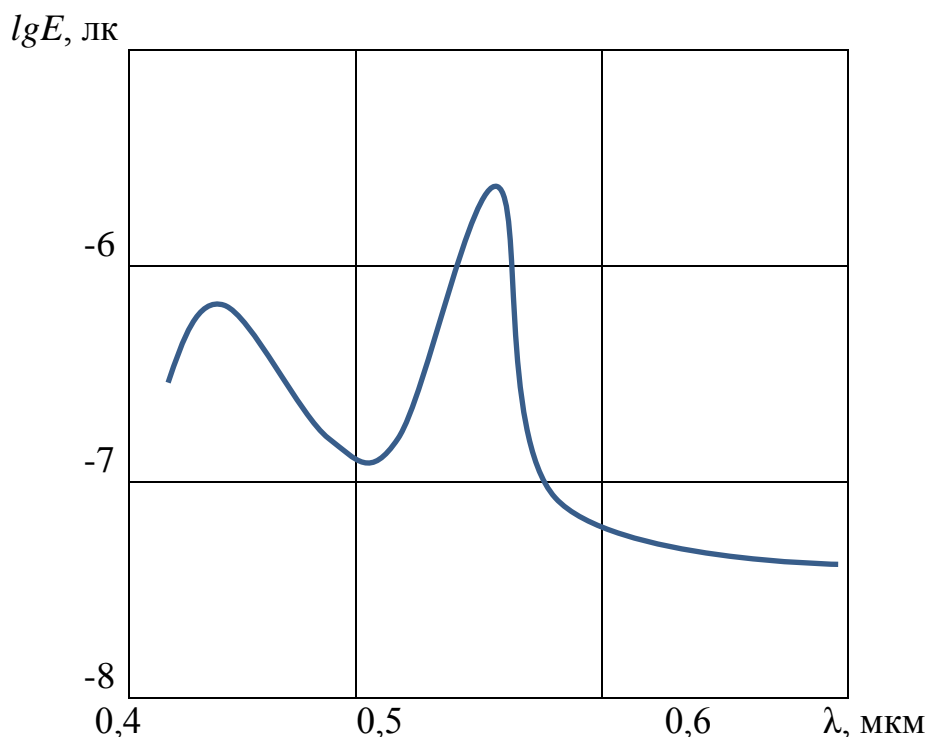


Рис. 2.10 Залежність хроматичного порога від довжини хвилі при спостереженні на темному фоні

Хроматичний поріг, так само як і ахроматичний, залежить від яскравості фона. Залежність $E_c = f(L)$ представлена на рис. 2.11. При будь-яких яркостях фона величина хроматичних порогів вище, ніж ахроматичних.

Чутливість ока до зміни чистоти кольору звичайно характеризують не порогом ΔP , а числом n_p , що показують: скільки кольорів від чисто білого до спектрально чистого здатне розрізнити око при даному колірному тоні λ . Графік залежності n_p від λ наведено на рис. 2.12. Як видно із графіка, для різних довжин хвиль значення n_p є різним. Середнє значення становить приблизно 15.

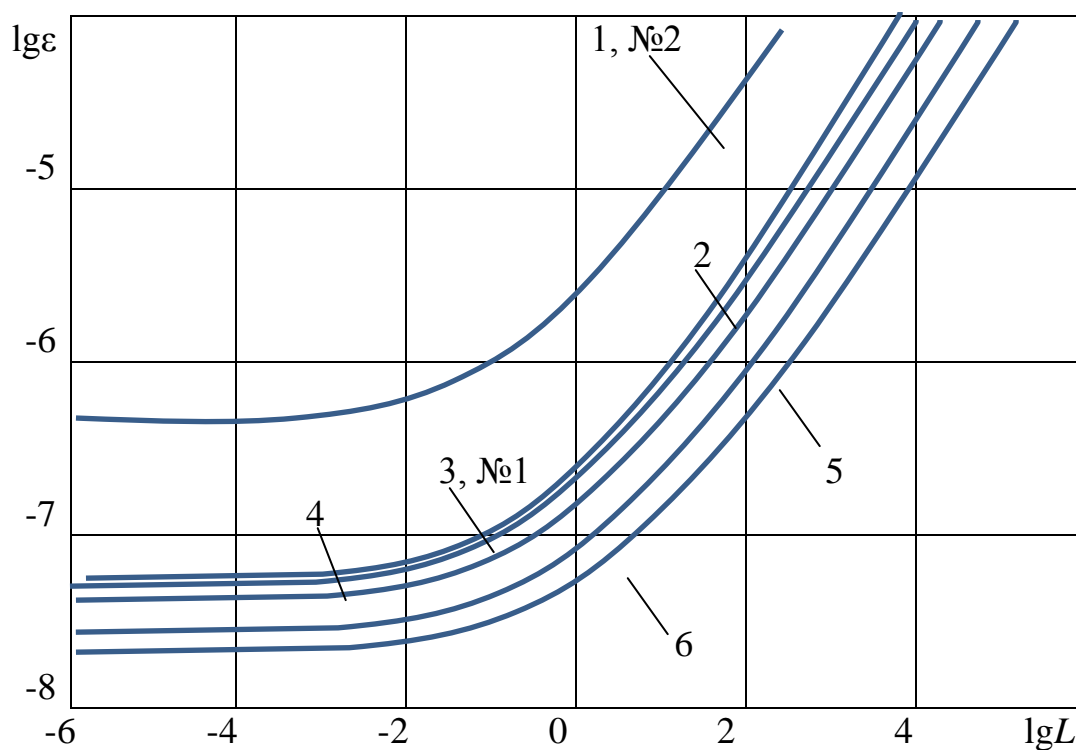


Рис. 2.11 Залежність хроматичних порогів від яскравості фона: 1 – жовтий №2 ($\lambda = 565$ нм); 2 – зелений ($\lambda = 520$ нм); 3 – жовтий №1 ($\lambda = 590$ нм); 4 – синій ($\lambda = 410$ нм); 5 – червоний ($\lambda = 610$ нм); 6 – ахроматичний

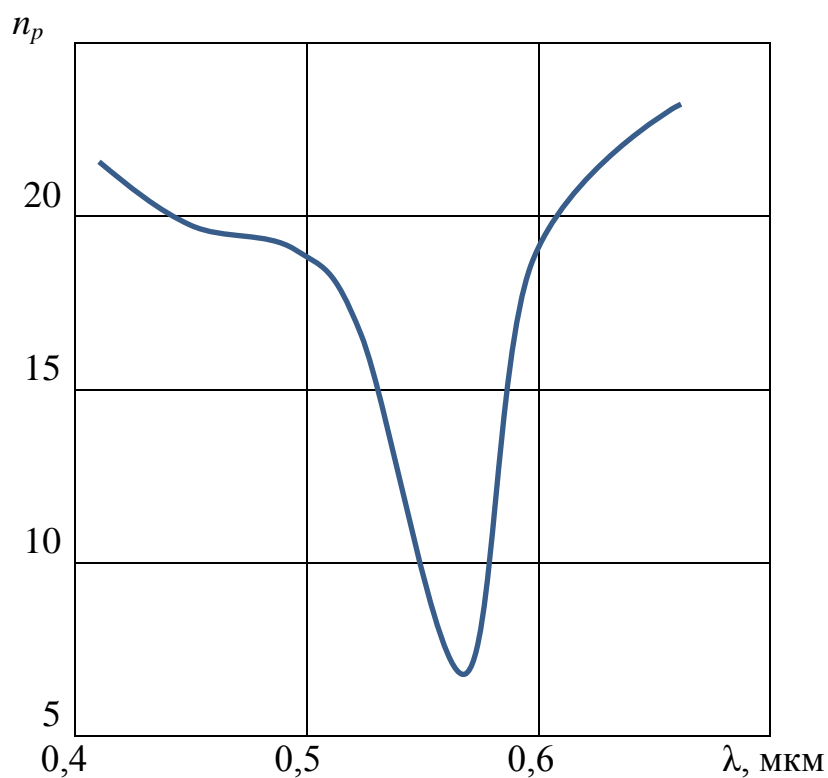


Рис. 2.12 – Залежність числа ступенів чистоти n_p від довжини хвилі

Таблиця 2.3 Залежність числа порогів колірної розділення від спектрального діапазону довжин хвиль

Границі спектральних піддіапазонів, нм	$\Delta\lambda, \text{нм}$	$\Delta_{\text{п}}\lambda, \text{нм}$	$n\Delta$	n
760 – 700	–	–	1,0	1,0
700 – 678	22,0	22,0	1,0	2,0
678 – 665	13,0	13,0	1,0	3,0
665 – 659	6,0	6,0	1,0	4,0
659,0 – 649,5	9,0	5,17	1,8	5,8
649,5 – 620,0	29,5	3,09	9,6	15,4
620,0 – 595,9	24,1	2,08	11,6	17,0
585,9 – 575,2	20,7	1,23	17,0	44,0
575,2 – 549,1	26,1	2,04	12,8	56,8
549,1 – 521,4	27,7	3,04	9,0	65,8
521,4 – 505,4	16,0	2,0	8,0	73,8
505,4 – 483,2	22,2	1,25	17,8	91,6
483,2 – 475,0	8,2	1,6	5,1	96,7
475,0 – 427,0	48,0	2,07	23,2	119,9
427,0 – 405,8	21,2	3,05	7,0	129,6

Число m розрізняваних градацій яскравості L пов'язане з граничним контрастом K_n :

$$m = 2 + \frac{\lg K_n}{\lg(1-K_n)}. \quad (2.25)$$

А значення K_n , в свою чергу, залежить від кутового розміру ω об'єкта й від яскравості фону L_ϕ . Поклавши $L=100$ кд/м², $\omega = 10'$, одержимо $K_n = 0,032$ і далі по формулі (2.25) визначимо $m \approx 100$.

Загальне число розрізняваних кольорів M можна одержати, перемноживши n , n_p і m : $M \approx 200\,000$. Можливо це значення є перебільшеним, тому що пороги по λ , P і L зв'язані один з одним. Так, чим менше яскравість, тем вище стає поріг Δn_{λ} , тобто тем менше відмінностей по колірному тону здатен вловити спостерігач. Важливо також, що добре різняться кольори тільки частиною сітківки, де переважають колбочки. Для колбочкового зору потрібні яскравості від 20 кд/м^2 і вище. Зменшення кутового розміру тестового поля теж приводить до підвищення порогів, значне зменшення поля може приводити й до викривлення колірного сприйняття. У колориметрії прийнято проводити виміри на полі не менш 2° .

2.2.2 Значимі ознаки в зображеннях

Для психології зорового сприйняття базовим є поняття релевантної ознаки. Існують два напрями дослідження релевантних ознак зображень – вирішення прикладних задач порівняльного аналізу зображень автоматичними системами (наприклад, для пошуку відомого зображення в базі даних, виявлення локального об'єкта на великому зображенні, пошуку дублікатів зображень та ін.) і підвищення ефективності функціонування іконічних систем. Перший напрям активно розвивається в суміжних галузях – системах технічного зору, комп'ютерних системах бачення і графіки, системах штучного інтелекту тощо. Тут як релевантні ознаки найчастіше використовують різні види локальних статистичних характеристик розподілення яскравості чи оптичної щільності в зображеннях (середнє значення, дисперсія, автокореляція тощо), локальних просторових характеристик, енергетичні просторові спектри [54, 55]. В другому випадку зорова діяльність значною мірою залежить від задачі, від виду зображення тощо. При цьому релевантної ознаки можуть бути об'єктивними (власне ознаками об'єкта), тобто тими, що відображають фізичні властивості предмета, і психологічними, тобто такими, що посиляють до цілісного образу в свідомості спостерігача. Об'єктивні ознаки піддаються інструментальному вимірюванню, психологічні тільки частково і не завжди

досить адекватно. Для практичного використання в проектуванні ОЕСС суттєвіший інтерес викликають саме ознаки першого типу. Тим більше, що вони є досить близькими до релевантних ознак систем технічного зору.

Результати аналізу окремих складових інтелекту вищих тварин, що відносяться до зорового апарату, і людини неодноразово приводились в літературі. Спостереженнями психофізіологів встановлено, що людина при пізнанні образів користується, головним чином, принципом переваги тих або інших ознак. З цією метою спостерігач проводить зіставлення об'єктів одного класу, виділяючи їх спільність і відбираючи релевантні ознаки. Особливістю психофізіологічних процесів сприйняття зорової (оптичної) інформації у вищих тварин і людини є декореляція зображень у просторі та часі в цілях усунення статистичних надмірних зв'язків сусідніх елементів зображення і послідовних кадрів вже в системі первинної обробки інформації. Це дозволяє використовувати тільки найбільш інформативні ознаки розпізнаваних образів і найбільш економно закодувати інформацію для передачі її в систему вторинної обробки - в мозок.

Найчастіше використовується геометрична інтерпретація розпізнавання, в якій n ознак сигналу (зображення) утворюють в n -мірному просторі вектор ознак, тобто точки або кластери (сукупності випадково розподілених точок), що характеризують окремі об'єкти або їх зображення. Віднесення цих точок або кластерів до того або іншого об'єкту (класу об'єктів) здійснюється за допомогою функцій дискримінантів [56, 7]. Кожному класу образів (типу цілей) відповідають свої вектор математичного очікування і коваріаційна матриця, що враховують випадковий характер ознак сигналу. Для утворення n -мірного вектора ознак потрібне теоретично мінімальне число еталонних образів ($n + 1$).

Релевантними ознаками об'єктів зазвичай є площа зображення об'єкту, периметр контуру зображення, відношення площі до квадрата периметра зображення. Також форму об'єкту можна охарактеризувати радіусом вписаним в зображення або описаним навколо зображення об'єкту колом, довжиною мінімального і максимального радіус-вектора від "центру мас" зображення,

інваріантними обчисленнями, що описують форму зображення, найбільш поширеними з них є моменти: $\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x^p \cdot y^q \cdot E(x, y) dx dy$ - змішаний $pq^{\text{й}}$ початковий момент; $\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (x - x_{c.u})^p \cdot (y - y_{c.u})^q \cdot E(x, y) dx dy$ - змішаний центральний момент $pq^{\text{го}}$ порядку, де E - функція розподілу освітленості в зображенні. Нормовані значення цих моментів є інваріантними по відношенню до масштабу і орієнтації для певного роду об'єктів.

На другому етапі обробки зображень часто виникає завдання виділення контуру зображення, здійснюване градієнтними методами.

Після попередньої двовимірної цифрової фільтрації з метою зменшення шумів МПВ і спотворень оптичної системи можна приступити до другої частини двовимірної цифрової просторової фільтрації - опису зображень. Ці алгоритми мають сенс у разі, коли робота здійснюється з детальним зображенням. Серед процедур цього етапу можна виділити три основні групи алгоритмів:

- знаходження однорідних областей за якою-небудь ознакою;
- виділення контурних ліній;
- виділення релевантних ознак зображення об'єкту.

Перші дві групи алгоритмів тісно зв'язані з процедурами лінійної цифрової фільтрації. Проте, після попередньої фільтрації процедури, що відносяться до першої і другої групи, можуть бути в обчислювальному сенсі значно спрощені. Зокрема, однорідні за рівнями деякої функції (наприклад, яскравості) ділянки зображень можна виділяти методом вирощування. При цьому слід визначити які елементи є сусідніми до поточного. На прямокутному растрі сусідніми елементами зазвичай вважаються такі, що зображені на рис. 2.13.

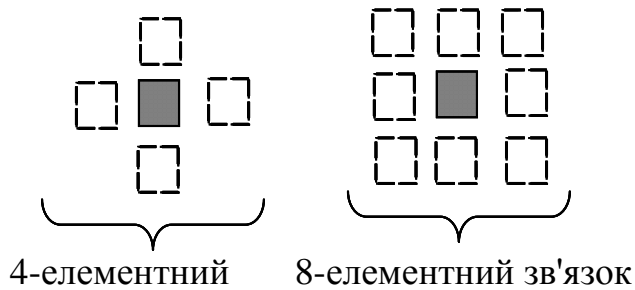


Рис. 2.13 Вживані схеми сусідніх елементів

Процедура вирощування локальних областей полягає в тому, що на першому етапі групуються сусідні елементи що мало відрізняються один від одного по рівню заданої функції, а на другому етапі всім елементам, що мають загальні межі і об'єднані в подвійні області привласнюють єдиний рівень сигналу - 0 або 1. Таким чином формується бінарне зображення деталей і починаючи від першого елемента, всі на нього схожі об'єднуються в одну область.

Друга група алгоритмів пов'язана з виділенням контурних ліній, які утворюються на зображенні видимими межами об'єктів і складаються з контурних точок. Контурною точкою вважають таку, для якої в однорідній області хоч би один елемент з чотирьохзв'язної околиці (рис. 2.13) не є неоднорідним. Сусідніми контурними точками вважаються такі, що містять одну іншу у восьмизв'язній околиці. Безліч цих контурних точок створює контурні лінії.

Найбільш простим є визначення контурної послідовності при роботі з бінарними зображеннями. За наявності переходу $0 \rightarrow 1$ або $1 \rightarrow 0$ фіксується контурна точка. Якщо препароване зображення є багатоградаційним, то знаходження контурних точок пов'язане з обчисленням модуля градієнта і порівнянням його з пороговим рівнем.

За визначенням модуль градієнта обчислюється як:

$$\sqrt{\left[\frac{\partial E(x, y)}{\partial x}\right]^2 + \left[\frac{\partial E(x, y)}{\partial y}\right]^2}. \quad (2.26)$$

Але по такому алгоритму обчислювати його виявляється неможливим, тому розроблені простіші алгоритми, наприклад, по трьом сусіднім крапкам:

$$|\nabla E(i, j)| = \sqrt{[E(i, j) - E(i + 1, j)]^2 + [E(i, j) - E(i, j + 1)]^2}. \quad (2.27)$$

Але і цей алгоритм не завжди задовольняє вимогам оперативності обробки інформації. Тому частіше користуються оператором Робертса, на базі якого створюються зручні для обчислення алгоритми:

$$|\nabla E(i, j)| \sim \sqrt{[E(i, j) - E(i + 1, j + 1)]^2 + [E(i + 1, j) - E(i, j + 1)]^2}. \quad (2.28)$$

Зокрема, для прискорення процесу обчислення модуля градієнта замість квадратного кореня і квадрата різниці, можна використовувати модулі різниць:

$$|\nabla E(i, j)| \sim |E(i, j) - E(i + 1, j + 1)| + |E(i + 1, j) - E(i, j + 1)|. \quad (2.29)$$

Крім того, розроблені алгоритми направлено диференціювання, в яких градієнт розраховується шляхом згортки відліків зображення із спеціальними лінійними фільтрами розмірності 3x3. Ці фільтри описуються такими операторами:

- оператор Собела:

$$|\nabla E| \sim \sqrt{U^2 + V^2} \sim |U| + |V|, \quad (2.30)$$

де $U = A_2 + 2A_3 + A_4 - A_5 - 2A_7 - A_6$; $V = A_0 + 2A_1 + A_2 - A_6 - 2A_7 - A_5$.

Причому $\begin{matrix} A_0 & A_1 & A_2 \\ A_7 & E(i, j) & A_3 \\ A_6 & A_5 & A_4 \end{matrix}$, де A_i - відліки сигналу сусідніх з поточним

елементів;

- оператор Уолліса :

$$|\nabla E| \sim \log_2 \left[\frac{E(i, j)}{A_1, A_3, A_5, A_7} \right]. \quad (2.31)$$

Існують ще оператори Кирша, Розенфельда, О'гормана і Хюнкеля.

У ряді випадків окрім модуля градієнта обчислюється кут, що характеризує напрям градієнта і дорівнює $\arctg\left(\frac{\partial E/\partial y}{\partial E/\partial x}\right)$.

Після виділення однорідних областей і знаходження їх контурів, можна виділити ознаки цих областей.

Обчислюються такі основні характеристики геометричних об'єктів: площа зображення - S , периметр зображення - P ; відношення S/P^2 або P^2/S ; радіус вписаного або описаного кола, довжини максимального або мінімального відрізка, що сполучає геометричний центр зображення з крайньою точкою зображення; відношення цих величин між собою; кути між напрямками, що характеризують ці відрізки, а також різного роду інваріанти - ознаки форми, не залежні від масштабу і орієнтації спостережуваних деталей.

Для обчислення площі бінарного зображення використовуються такий алгоритм:

$$A \sim 0,25n(Q_1) + 0,5n(Q_2) + 0,875n(Q_3) + n(Q_4) + 0,75n(Q_5), \quad (2.32)$$

де n - число розміщуваних в межах контура елементарних масок виду Q_i ,

причому $Q_1 = \left\{ \begin{array}{cccccccc} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{array} \right\}; \quad Q_2 = \left\{ \begin{array}{cccccccc} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{array} \right\};$

$$Q_3 = \left\{ \begin{array}{cccccc} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{array} \right\}; \quad Q_4 = \left\{ \begin{array}{cc} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{array} \right\}; \quad Q_5 = \left\{ \begin{array}{cccc} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{array} \right\};$$

$$P \sim n(Q_2) + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot [n(Q_1) + n(Q_3) + 2n(Q_5)] - \text{переріз.}$$

Отримані значення визначаються у відносних одиницях і для переводу їх в абсолютні потрібно їх домножити на величини довжин сторін піксела.

Використовуючи ці методики також можна обчислити число Ейлера, що характеризує різницю між кількістю зв'язаних областей і отворів: $\varepsilon \sim 0,25 \cdot [n(Q_1) - n(Q_3) + 2 \cdot n(Q_5)]$. Для розпізнавання форми складніших об'єктів, ніж бінарне зображення, використовують формальні інваріанти. При цьому, наприклад, вводиться поняття кривизни контуру зображення, яка зазвичай задається як деяка функція від поточної координати контуру.

Контур за умови, що об'єкт повністю потрапляє у поле зору БК ОЕСС, зазвичай є замкнутим, і тому функція $K(S)$ буде такою, що повторюється з періодом рівним периметру. А будь-яку періодичну функцію можна розкласти в ряд Фур'є і тоді коефіцієнти цього ряду можна використовувати для опису об'єкту.

Для спрощення обчислювальних процедур функцію $K(S)$ представляють в параметричному вигляді:

$$\begin{aligned} x(s) &= a_0 + \sum_{n=1}^N \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi ns}{p}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi ns}{p}\right) \right]; \\ y(s) &= c_0 + \sum_{n=1}^N \left[c_n \cos\left(\frac{2\pi ns}{p}\right) + d_n \sin\left(\frac{2\pi ns}{p}\right) \right], \end{aligned} \quad (2.33)$$

де a , b , c і d – еліптичні ознаки, а саме:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k; & c_0 &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y_k; & a_n &= \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x_k \cdot \cos n\tilde{\delta}; & c_n &= \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N y_k \cdot \cos n\tilde{\delta}; \\ b_n &= \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x_k \cdot \sin n\tilde{\delta}; & d_n &= \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N y_k \cdot \sin n\tilde{\delta}; & \tilde{\delta} &= \frac{2\pi\Delta s}{p}; \end{aligned}$$

Δs – приріст дуги при переході з однієї точки до іншої на контурній послідовності.

Для обчислення синусів і косинусів використовуються рекурентні алгоритми:

$$\begin{aligned} \cos n\tilde{\delta} &= [\cos(n-1)\tilde{\delta} + \cos(n-2)\tilde{\delta}] \cdot \cos \tilde{\delta} - \cos(n-2)\tilde{\delta}; \\ \sin n\tilde{\delta} &= [\sin(n-1)\tilde{\delta} + \sin(n-2)\tilde{\delta}] \cdot \cos \tilde{\delta} - \sin(n-2)\tilde{\delta}. \end{aligned} \quad (2.34)$$

Самі ці коефіцієнти не є інваріантними, але для отримання інваріантів використовуються наступні алгоритми: $I_n = a_n^2 + b_n^2 + c_n^2 + d_n^2$;

$$Y_n = \det \begin{pmatrix} a_n & b_n \\ c_n & d_n \end{pmatrix} \text{ та}$$

$L_{nm} = (a_n^2 + b_n^2)(a_m^2 + b_m^2) + (c_n^2 + d_n^2)(c_m^2 + d_m^2) + 2(a_n c_n + b_n d_n)(a_m c_m + b_m d_m)$ - ці числа характеризуватимуть тільки форму зображення. Для позбавлення від впливу масштабу коефіцієнти I_n , J_n , L_{nm} потрібно пронормувати на відповідні значення при $n = m = 1$.

Недоліком інваріантів є можливість випадіння контурних точок під впливом шуму. Основна перевага - відсутня необхідність використання внутрішніх відліків зображення.

Найбільш стійкими є інваріанти, що використовують внутрішні відліки зображення. Такими інваріантами є моменти: $m_{pq} = \sum_i \sum_j E(\bar{x}_i, \bar{y}_j) \cdot \bar{x}_i^p \cdot \bar{y}_j^q$;

$\bar{x}_i = x_i - x_{c.m}$; $\bar{y}_j = y_j - y_{c.m}$, де $x_{c.m}$, $y_{c.m}$ - координати "центру тяжіння" зображення; m_{pq} - центральні моменти функції розподілу освітленості; $\mu_{11} = \sum E(x_i, y_j) \cdot x_i \cdot y_j$ - характеризують координати "центру тяжіння".

Недоліком цього типу ознак є великі обчислювальні витрати. Чим вище порядок моменту, тим він менш надійний.

Процедури обчислення координат «центру тяжіння» і орієнтації базуються на обчисленні відповідних моментів.

РОЗДІЛ 3

РЕЄСТРАЦІЯ ТА ПОПЕРЕДНЯ ОБРОБКА ЗОБРАЖЕНЬ В КАНАЛАХ

Сигнал в будь-якій ОЕСС обробляється відповідно до призначення системи і її складу. В БК ОЕСС така обробка є багатоступовою внаслідок необхідності подальшого суміщення кількох різноформатних матриць зображень. Перед безпосередньо комплексуванням виконується попередня обробка сигналів в кожному каналі окремо та здійснюється прив'язка зображень - приведення всіх зображень сцени до однієї системи координат. Обсяг обчислень першого етапу залежить від загального алгоритму цифрової обробки сигналів в системі. В найпростішому випадку це може бути звичайне підсилення і вирівнювання чутливості в матричних ПВ. В інших випадках здійснюються різні види просторової фільтрації.

В ОЕСС фізично двовимірне оптичне зображення перетворюється в послідовність дискретних імпульсів, кожному з яких відповідає певна просторова координата й рівень квантування.

Таким чином, цифровий сигнал є деяким числом, що записане в обраній системі числення та має кількість розрядів відповідно вимогам до заданої точності. Перетворення безперервного сигналу в цифровий є відображенням безперервних сигналів (безперервної просторової множини) на кінцеву множину (т.зв. « ϵ -мережу», яка розбиває безперервну множину на кінцеву кількість ϵ -областей). У кожній із цих ϵ -областей вибирається якийсь один сигнал-представник і всі інші сигнали, що попадають у цю ϵ -область, вважаються рівними сигналу-представнику. Пронумеровані ϵ -області утворюють цифровий сигнал.

Нумерація областей (коду цифрового сигналу) виконується за допомогою перетворювача «аналог – код» (АЦП). Зворотнє перетворення цифрового сигналу в аналоговий здійснюється за допомогою перетворювача «код – аналог» (ЦАП). Принциповим питанням при аналого-цифровому й цифро-

аналоговому перетворенні є обсяг цифрового подання безперервного сигналу (кількість сигналів-представників).

Зазвичай обсяг цифрового подання сигналу оцінюється числом двійкових розрядів (біт), достатнім для перенумеровування всіх сигналів-представників. Мінімальна кількість двійкових одиниць, необхідна для цифрового опису безперервних сигналів називається ϵ -ентропією. Чисельна оцінка ϵ -ентропії для оптичних сигналів, зокрема таких як зображення, є не вирішеним питанням, тому що кількісний критерій відмінності даного зображення від іншого в конкретних практичних задачах не є однозначним. Наприклад, верхньою границею значення ϵ -ентропії для зображень може бути добуток площі зображення на площу його модуляційної передавальної функції: $X \cdot Y \cdot F_{x\max} \cdot F_{y\max}$. Типове значення цього добутку становить $10^6 - 10^7$ біт. Така оцінка ϵ -ентропії є нижньою межею задовільного обсягу інформації при кодуванні двовимірного масиву даних.

Перетворення безперервного сигналу в цифровий здійснюється шляхом послідовного дискретизації й поелементного квантування. Дискретизація відноситься до класу лінійних процедур, а поелементне квантування – до нелінійних процедур.

Дискретизація полягає в заміні безперервного сигналу послідовністю чисел, тобто подання сигналу в деякому кінцевому базисі. Найбільш зручним з погляду організації роботи й природнім способом дискретизації є подання сигналу у вигляді вибірок його значення (відліків) в окремо регулярно розташованих точках. Такий спосіб дискретизації називається растріванням, а послідовність точок, у яких беруться відліки, називається растром. Найбільш уживаними є прямокутний растр, косокутний растр, гексагональний растр.

Суть вибору растра полягає в зменшенні кількості відліків. Економія кількості відліків при гексагональному растрі в порівнянні із прямокутним становить приблизно 15%.

Поелементне квантування полягає в кодуванні кожного елемента відліку, тобто в заміні безперервної шкали сигналів кінцевою. Воно може бути однорідним і неоднорідним (зональним або адаптивним).

Задачею оптимального квантування є вибір такого розташування шкали, при якому мінімальна кількість ε -областей є найменшою. Спосіб розбивки на інтервали й вибір значення сигналу-представника в будь-якому інтервалі мають бути такими, щоб задовольняти вимогам заданої точності подання безперервного сигналу цифровим. Точність визначається помилкою квантування на кожному інтервалі $\varepsilon^{(r)} = x - \bar{x}^{(r)}$, де x – дійсне значення безперервної величини; $\bar{x}^{(r)}$ - значення відповідного сигналу-представника.

Вимога точності можна сформулювати, використовуючи поняття функції втрат і поняття середнього ризику. Середній ризик при втраті квантування:

$$Q = \sum_{r=0}^M \int_{x^{(r)}}^{x^{(r+1)}} p(x) \cdot R(\varepsilon^{(r)}) dx, \quad (3.1)$$

де M – число рівнів квантування; $p(x)$ – щільність імовірності розподілу безперервної величини на r -му інтервалі; $R(\varepsilon(r))$ – функція втрат.

В формулі (3.1) невідомими є межі квантування на кожному інтервалі. Оптимальним буде такий вибір меж квантування, коли Q наближається до мінімуму.

На практиці розрізняють дві складові помилки квантування – помилка обмеження й помилка квантування внутрішнього інтервалу.

Помилка обмеження визначається як:

$$Q_1 = \int_{-\infty}^{x_1} p(x) \cdot R_1(\varepsilon^{(r)}) dx, \quad Q_2 = \int_{x_2}^{\infty} p(x) \cdot R_2(\varepsilon^{(r)}) dx,$$

а помилка квантування як:

$$Q_q = \sum_{r=1}^{M-2} \int_{x^{(r)}}^{x^{(r+1)}} p(x) \cdot R_0(\varepsilon^{(r)}) dx.$$

Для знаходження мінімуму значення Q_1 , Q_2 , Q_q потрібно продиференціювати усі ці похибки і виразити ці значення по границі інтервалу,

прирівняти нулю й розв'язати систему рівнянь. Тоді одержимо оптимальну шкалу для даної щільності ймовірності сигналу.

На практиці, оптимізація інтервалів квантування обмежується тим, що реальні АЦП мають рівномірну шкалу квантування, а сигнал-представник ототожнюється із серединою інтервалу квантування. Для оптимального (у загальному випадку - нерівномірного) квантування необхідно в систему включити додатковий пристрій (блок попереднього спотворення), у якому здійснюється нелінійне перетворення відповідно до спотворюючої функції $w(x)$.

Для знаходження оптимального виду $w(x)$ можна оцінити помилку квантування по середній функції втрат у межах інтервалів квантування:

$$Q_q = \int_{x^{(r)}}^{x^{(r+1)}} p(x) \cdot R(\Delta_r) dx, \quad (3.2)$$

- де $(r = x(r + 1) - x(r))$.

Нехай функція $w(x)$ – монотонна. Позначимо Δ - рівномірний інтервал; Δ_r – нерівномірний інтервал, $\Delta \approx w'(x) \cdot \Delta_r$, де $w'(x) = (dw(x))/(dx)$.

Мінімізація такого вираження – стандартна процедура варіаційного обчислення.

Відомо, що забезпечити мінімум Q_0 можна шляхом розв'язку рівняння Ейлера-Лагранжа: $\frac{\partial}{\partial w'} \left\{ p(x) \cdot R\left(\frac{\Delta}{w'(x)}\right) \right\}$. Для цього вибирається вид функції втрат.

Нехай функція втрат буде простою: $R(\Delta) = \begin{cases} 0, & |\Delta| \leq \Delta_{пор}; \\ 1, & |\Delta| > \Delta_{пор}, \end{cases}$ де $\Delta_{пор}$ – це гранична

ширина інтервалу квантування, що забезпечує задану похибку. При $\Delta_{пор} = \text{const}$ оптимальною буде рівномірна шкала й число інтервалів квантування буде визначатися величиною: $M = (X_1 - X_2)/(2\Delta_{пор})$.

Якщо обмежується відносна похибка квантування, тобто $\Delta_{пор} = \delta_{0x}$, то, виходячи із психофізичного закону Вебера - Ферхнера вимога до точності квантування:

$$\frac{w(x) - w(x_1)}{w(x_2) - w(x_1)} = \frac{\ln(x/x_1)}{\ln(q)}, \quad (3.3)$$

- де $q = X_2/X_1$.

У цьому випадку число рівнів квантування $M = \ln(q) / \delta_0$, де δ_0 – відносна похибка квантування. Виграш у кількості рівнів квантування в порівнянні з рівномірною шкалою становить $(q - 1)/\ln(q) = g$. Якщо $q = 100$, то $g = 20\%$.

Існують і інші критерії вибору функції w , наприклад, ступеневий критерій по відносній похибці квантування, який дає виграш приблизно в 1,4 рази.

У цілому всі розглянуті надалі алгоритми двовимірної цифрової фільтрації можна розділити на дві групи у відповідності до двох етапів просторової цифрової обробки зображення:

- 1) попередня обробка зображень;
- 2) опис зображень.

Для деяких задач використовується тільки перший етап, а для інших – обидва етапи.

За типом зображення можна розділити на текстурні і детальні. Текстурні зображення - це такі, всі елементи яких несуть корисну інформацію. Детальним зображенням називається таке, на якому можна виділити об'єкти, що заважають, фон і корисні об'єкти.

Зображення текстур піддаються, як правило, тільки першій групі операцій обробки, а детальні - обом.

Типовими процедурами етапу попередньої обробки є:

- фільтрація шумів МПВ;
- корекція фазових спотворень зображень, в тому числі - геометричних спотворень, розфокусувань, аберацій.

Процедура опису зображення призначена для визначення параметрів деталей (атрибутів) зображення і включає:

- знаходження однорідних (по рівню освітленості, за кольором, за ступенем поляризації тощо) областей зображення;
- виділення релевантних ознак (форми зображень, координат особливих

точок об'єктів і їх орієнтації щодо інших точок).

Попередня обробка зображень наразі реалізується двома групами процедур: лінійними і нелінійними алгоритмами цифрової фільтрації.

Лінійні алгоритми виконуються за допомогою двовимірних трансверсальних (з кінцевою імпульсною дискретною характеристикою, КІХ) і рекурсивних (з нескінченною імпульсною дискретною характеристикою, НІХ) фільтрів.

КІХ фільтри реалізуються методом прямої циклічної згортки, а також з використанням швидких алгоритмів перетворень по діагональних функціях, наприклад швидке перетворення Фур'є. Перевагою цих двовимірних фільтрів є наочність, простота і абсолютна стійкість.

НІХ фільтри реалізуються за допомогою різницевих рівнянь і z -перетворень, а саме - методом сигнальних графів. НІХ фільтри зменшують число обчислювальних процедур в порівнянні з КІХ фільтрами, але вони можуть виявитися нестійкими.

Синтез двовимірних фільтрів НІХ істотно відрізняється від синтезу одновимірних рекурсивних фільтрів, оскільки для двовимірної функції в явному вигляді не вдається виділити полюси.

Всі рангові нелінійні фільтри базуються на швидких алгоритмах обчислення локальних гістограм (дискретного розподілу числа рівнів квантування по їх номеру).

Алгоритми етапу опису зображення як правило нелінійні і носять евристичний характер. Зазвичай об'єм обчислень на другому етапі менший, ніж на першому.

Відмінною рисою двовимірних КІХ фільтрів від одновимірних є те, що синтез двовимірного фільтра й визначення його схемної реалізації відбувається одночасно, а не послідовно, як для одновимірних, тому що не вдається виділити полюси.

У задачах обробки зображень детального типу релевантними є невідомі параметри деталей, визначення яких і є кінцевою метою обробки зображення. З

теорії відомо, що оптимальна оцінка параметрів виходить у тому випадку, коли використовується лінійний виннеровський фільтр. Він забезпечує мінімальне СКВ обробленого зображення від деякого ідеального. Оскільки характеристика фільтра – системна функція залежить від спектра оброблюваного зображення X_{r_1, r_2} , то такий фільтр є адаптивним. Розрізняють глобально й локально адаптивні фільтри. Якщо похибка ε усереднюється по всьому полю оброблюваного зображення, то фільтр називається глобально адаптивним, якщо по фрагменту – локально адаптивним. Експериментально показано, що якість зображення при лінійних спотвореннях у першу чергу визначається фазовою характеристикою, а не модулем спектра. Тому для корекції викривлень в принципі досить знати тільки фазову характеристику спектра зображуваного об'єкта.

Препарування полягає в підкресленні дрібних деталей зображень або навпаки – в їх ослабленні. Для підкреслення дрібних деталей зображень необхідно ослабити низькі просторові частоти й підсилити високі. Для того, щоб згладити зображення, навпаки, необхідно ослабити високі просторові частоти. Ідеально гладким можна вважати зображення, яке математично описується кусочно-постійною моделлю, тобто “клаптеве” зображення (у вигляді плям (деталей), які мають постійне значення рівня сигналу в межах своїх границь).

Процедура підвищення детальності є зворотньою згладжуванню та підсилює відмінності в рівні відліків елементів. Ця процедура необхідна для виділення контрастів зображення. Для її реалізації може застосовуватися, наприклад, метод «нерізкої маски», еквілізація (гістограма), що ковзає і т.д. Позаяк у результаті підвищення детальності можуть бути виділені як потрібні, так і непотрібні деталі, то для того, щоб залишалися тільки інформативні об'єкти після процедури еквілізації часто застосовується згладжування.

В БК ОЕСС стандартною процедурою є прецизійне геометричне й радіометричне суміщення зображень з різних каналів, яку називають

реєстрацією. Для цього використовуються різні критерії - фазова кореляція, крос-кореляція, метод взаємної інформації тощо.

Безпосереднє суміщення зображень, як правило, є неможливим по причині різного просторового розділення й відносної просторової деформації вхідних зображень. Відмінність просторового розділення обумовлена різними форматами МПВ каналів. Наразі тепловізійні матриці поступаються телевізійним у просторовому розділенні в кілька разів. Для суміщення полів в цьому разі використовуються ряд програмних методів, одними з найбільш ефективних є багатоканальні методи.

Просторова деформація викликана двома факторами:

- паралаксом - між зображеннями утворюється відносна деформація, що залежить від відстані між паралельними візирними осями каналів. Спостережувані зображення, залежно від дальності спостереження й кута візирної вісі будуть зміщені відносно один одного у вертикальній і горизонтальній площині;

- помилкою виставки візирних вісей у каналах. Даний фактор приводить до того, що спостережувані зображення мають різний масштаб.

Процедури реєстрації зображень розділяють на три типи:

- реєстрація зображень, отриманих одночасно або послідовно з різних ракурсів для збільшення площі двовимірних зображень або створення тривимірних;

- реєстрація зображень, отриманих послідовно в різні проміжки часу одним сенсором;

- реєстрація зображень, отриманих одночасно сенсорами різних типів. Цей вид обробки зображень є найбільш типовим для БК ОЕСС.

Переважає більшість алгоритмів реєстрації містить чотири етапи: 1) виділення ознак в кожному зображенні; 2) пошук збігу ознак різних зображень; 3) визначення моделі приведення одного зображення до іншого; 4) трансформація одного з поточних зображень у відповідності до референтного.

На першому етапі відбувається пошук, виділення і опис окремих інформаційних елементів (контурів, кутів, замкнених областей, текстур тощо) в кожному зображенні з застосуванням різних алгоритмів знаходження однорідних областей зображення і алгоритмів виділення ознак форми зображень, визначення координат особливих точок об'єктів і їх орієнтації щодо інших точок. Далі знайдені елементи двох зображень порівнюються між собою і встановлюється їх взаємна відповідність. Для цього використовуються різноманітні оцінки подібності. На третьому етапі обчислюються геометричні перетворення одного з зображень для забезпечення найкращого просторового суміщення його інформаційних елементів з елементами іншого зображення. На четвертому етапі відбувається безпосередньо це суміщення.

Реалізація кожного з означених етапів пов'язана з вирішенням типових задач. По-перше, необхідно вибрати ознаки зображень, які є релевантними для поточної задачі, легко виявляються і відображають фізичний стан об'єкта при спостереженні датчиками різних типів. Методи виявлення ознак мають бути стійкими до спотворень зображень і забезпечувати достатню точність. Методи порівняння зображень на другому етапі мають бути стійкими до шумів і незначних варіацій ознак зображень. При їх виборі необхідно враховувати, що фізично однакові ознаки можуть мати суттєву розбіжність в сигналах різних датчиків. Важливо не загубити різницеvu інформацію, яка відсутня в одному з каналів, але є релевантною для поточної задачі. Методи оцінки геометричних спотворень і алгоритми трансформації зображень як правило вибираються виходячи з апріорної інформації про умови спостереження в каналах ОЕСС. Якщо така інформація відсутня, то модель трансформації має бути достатньо гнучкою для роботи з усіма можливими типами просторових спотворень.

Методи геометричних перетворень вибираються виходячи з компромісу між необхідною точністю та обсягом обчислень. В багатьох випадках достатньо використання білінійної інтерполяції або методу «найближчого сусіда».

РОЗДІЛ 4

МЕТОДИ КОМПЛЕКСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ

Метою комплексування є підвищення якості вихідної інформації, або – більш узагальнено – ефективності виконання поточної задачі інформаційною системою. Природньо очікувати, що механізми сумісної обробки сигналів мають визначатись типом комплексування. Основними типами комплексування є:

- комплексування зображень з різних сенсорів;
- комплексування зображень з одного сенсора:
- комплексування зображень з різною експозицією;
- комплексування зображень з різним фокусуванням;
- комплексування зображень у часі;
- комплексування зображень з різними викривленнями по полю;
- комплексування зображень різних планів (стерео зображень);
- комплексування зображень з невізуальною інформацією

Для БК ОЕСС характерним є комплексування першого типу, а інколи – і другого.

4.1 Розробка концепції комплексування інформації

Вибір концепції комплексування інформації в МІОЕС насамперед залежить від вимог до оперативності надходження вхідної і вихідної інформації. Очевидно, що в системах реального часу алгоритми комплексування мають бути значно простішими, ніж в стаціонарних системах обробки і прийняття рішень (табл. 4.1).

Рівень абстракції визначається типом оброблюваної і вихідної інформації, що розглядалось раніше. В цілому кожна концепція розробляється виходячи з галузі застосування. До основних галузей, в яких БК ОЕСС використовуються

широко, відносяться:

- 1) Дистанційне зондування Землі з космосу та з повітря;
- 2) Спостереження в військових цілях;
- 3) Спостереження для охорони територій;
- 4) Дистанційна діагностика стану будівель, енергетичного обладнання тощо;
- 5) Медична функціональна діагностика і контроль;
- 6) Спостереження позаземних об'єктів.

Таблиця 4.1 - Порівняння умов комплексування

Тип системи	Реального часу	Стаціонарна
Час обробки інформації	Мілісекунди	Секунди – десятки хвилин
Тип даних	Сигнал МПВ	Сигнал МПВ та інших датчиків
Розмір бази даних	Малий - середній	Великий
Рівень абстракції	Низький	Високий
Участь оператора	Немає	Часто

Інформативність зображення в БК ОЕСС залежить від кількості робочих спектральних діапазонів або фізичних полів, в рамках яких збираються дані про простір об'єктів. Дуже важливим є питання про кількість інформаційних каналів, необхідну для надійного розпізнавання зображення оператором. З теорії розпізнавання образів відомо, що при зростанні числа спектральних каналів, точність розпізнавання зростає лише до певного моменту, а потім, при подальшому збільшенні цього числа, вона падає [56]. Це пояснюється тим, що при збільшенні числа інформаційних каналів необхідна оцінка множини статистик все більш високої розмірності по обмеженому фіксованому числу

вибірок. При цьому помітно ускладнюється система обробки даних в реальній системі, наприклад, значно збільшується машинний час, необхідний для проведення складних обчислень. Таким чином, існує оптимальна кількість спектральних ознак. Наприклад, при дистанційному зондуванні природних ресурсів було встановлено, що максимум вірогідності розпізнавання по спектральних ознаках досягається при трьох релевантних ознаках. Ймовірність розпізнавання при використанні більшого числа ознак істотно менше [56].

В табл. 4.2 наведені приклади інформаційних каналів деяких БК ОЕСС [18, 57 - 59].

Таблиця 4.2 Типи датчиків для вирішення деяких задач дистанційного моніторингу

Задача дистанційного моніторингу	Типи датчиків / інформаційних каналів
Метеорологічні спостереження: температурний профіль атмосфери	Пасивні мікрохвильові датчики, тіньові радіо GPS-датчики, тепловізійні системи високого просторового розділення
Метеорологічні спостереження: атмосферний профіль вологості	Пасивні мікрохвильові датчики, пасивні тепловізійні системи ультрафіолетового та видимого діапазонів, тепловізійні системи середнього інфрачервоного діапазону
Моніторинг озонного шару	Пасивні тепловізійні системи ультрафіолетового та видимого діапазонів, тепловізійні системи, мікрохвильові датчики
Моніторинг аерозолів, визначення метеорологічної дальності бачення	Тепловізійні системи видимого діапазону, тепловізійні системи близького та середнього інфрачервоного діапазонів
Визначення вмісту парникових газів в атмосфері	Тепловізійні системи
Визначення розподілу вітрів	Тепловізійні системи видимого діапазону, тепловізійні системи, доплерівські лазерні вимірювачі швидкості
Визначення рівня океану, стану його поверхні	Лазерні висотоміри, скатерометри
Визначення температури суші та океану	Тепловізійні системи, мікрохвильові датчики
Визначення забарвлення океану, концентрації хлорофілу	Відеспектрометри

Моніторинг та картографування озер	Телевізійні системи видимого діапазону, тепловізійні системи близького інфрачервоного діапазону, радіолокатори з синтезованою апертурою, висотоміри
Моніторинг льодовиків і льодового покриву	Телевізійні системи видимого діапазону, тепловізійні системи близького та середнього інфрачервоних діапазонів високого розділення, висотоміри
Моніторинг снігових покривів	Телевізійні системи видимого діапазону, тепловізійні системи близького та середнього інфрачервоних діапазонів середнього розділення, пасивні мікрохвильові датчики
Визначення альbedo земних поверхонь	Панхроматичні та багатоканальні телевізійні системи видимого діапазону, відеоспектрометри
Глобальний моніторинг земної біомаси	L / P полосні радіолокатори з синтезованою апертурою, лазерні висотоміри
Моніторинг вологості ґрунту (до 100 мм глибини)	Активні та пасивні мікрохвильові датчики
Оглядові системи військового призначення	Телевізійні системи видимого діапазону, тепловізійні системи близького, середнього та довгохвильового інфрачервоних діапазонів, низькорівневі телевізійні системи
Прицільно-оглядові системи військового призначення	Телевізійні системи видимого діапазону, тепловізійні системи, лазерний цілевказівник
Медична діагностика пухлин, маммографія	Телевізійні системи видимого діапазону, довгохвильові тепловізійні системи
Спостереження навколишнього простору самохідними роботизованими пристроями	Лазерні скануючі далекомірні системи, телевізійні системи видимого діапазону
Картографування	Панхроматичні та багатоканальні телевізійні системи видимого діапазону, радіолокатори з синтезованою апертурою, координатні датчики (інерціальні, GPS)
Стереофотограмметрія	Панхроматичні та багатоканальні телевізійні системи, лазерні далекоміри
Огляд транспортних засобів службами безпеки	Телевізійні системи видимого діапазону, тепловізійні системи, лазерні скануючі далекомірні системи, датчики гамма-хвиль та нейтронів

Вихідним сигналом майже всіх БК ОЕСС, що наведені в табл. 4.2, є двомірне зображення на одному моніторі. Це зображення аналізується

оператором шляхом виявлення в ньому релевантних (важливих для заданої задачі) ознак з метою діагностування стану окремих об'єктів чи всього простору об'єктів. Найголовнішою задачею процесу комплексування є об'єднання різних інформаційних потоків для одержання нової інформації про досліджуваний об'єкт, яка не є доступною в кожному окремому каналі. В цьому сенсі роботу окремих каналів можна уявити як перенос інформації від об'єкта до оператора, а функція самої БК ОЕСС полягає в формуванні оптимальної конфігурації інформаційного каналу. Для цього необхідно мати ефективний механізм комплексування каналів [58]. Такий механізм є інтерфейсом між простором об'єктів, окремими інформаційними каналами БК ОЕСС, змістом поточного завдання і зовнішніх умов його виконання, оператором [60]. Тому крім дослідження кожної з наведених складових інформаційного процесу, актуальними напрямками в галузі іконічних систем дистанційного зондування є саме створення механізмів комплексування каналів.

Задачі розпізнавання та ідентифікації об'єкту на комплексованих кольорових зображеннях вирішуються операторами як правило швидше, ніж на зображеннях з окремих каналів, або на комплексованих монохромних зображеннях [61, 62]. В деяких випадках монохромні методи комплексування дають гірші результати, ніж окремі канали [62].

4.2 Програмний інструментарій комплексування інформації

Для дослідження особливостей комплексування інформації в ОЕСС і розробки нових методів узагальнену схему проходження сигналу в БК ОЕСС (рис. 2.1) доцільно конкретизувати в частині обробки сигналів (рис. 4.1).

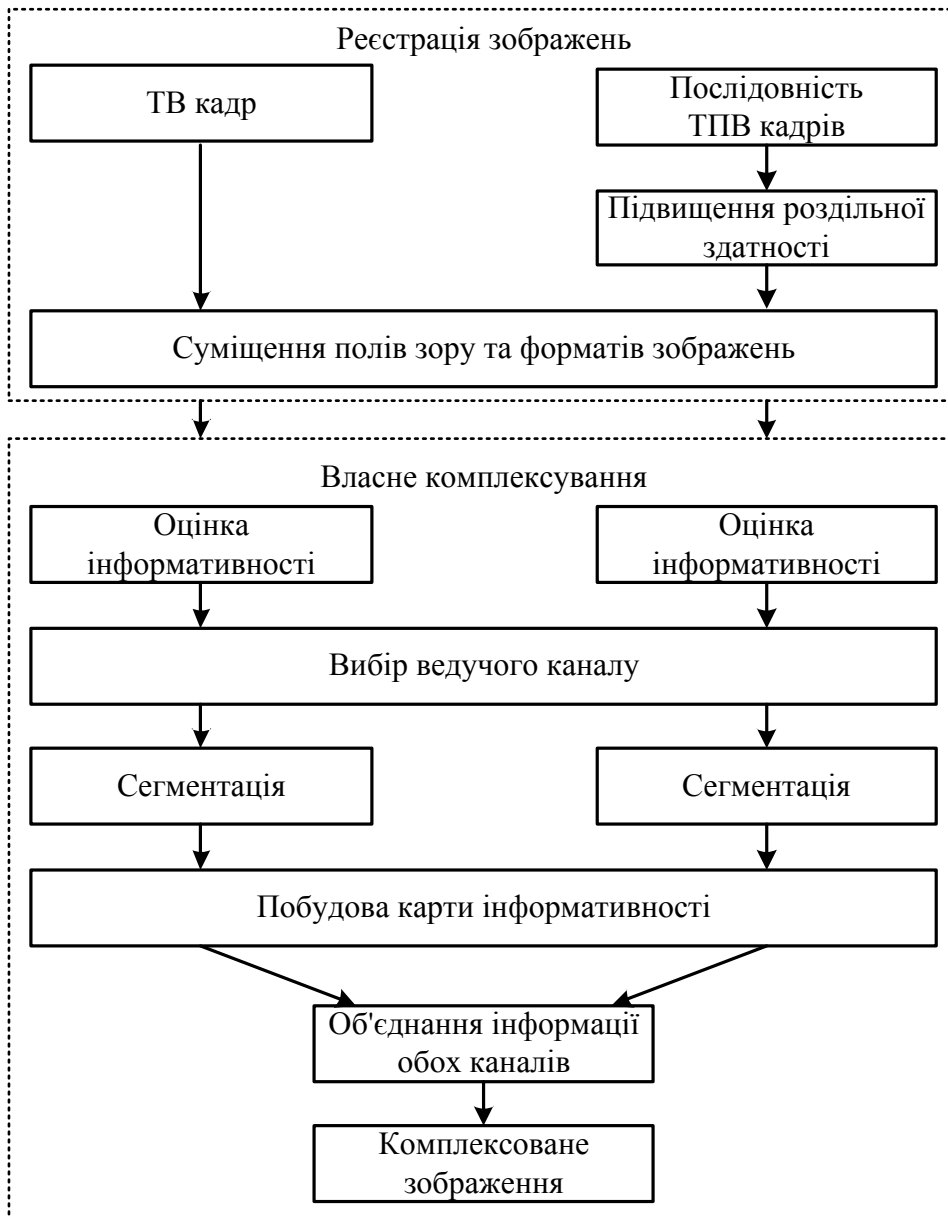


Рис. 4.1 Узагальнена схема комплексування в БК ОЕСС

Питання реєстрації зображень були розглянуті в попередніх підрозділах. Далі дослідимо придатність відомого інструментарія комплексування для вирішення задач, що вирішуються в рамках даної НДР.

Загальновідома модель комплексування інформації [3], що була запропонована американською спілкою директорів лабораторій (JDL), є ієрархічною та багаторівневою (рис. 4.2).

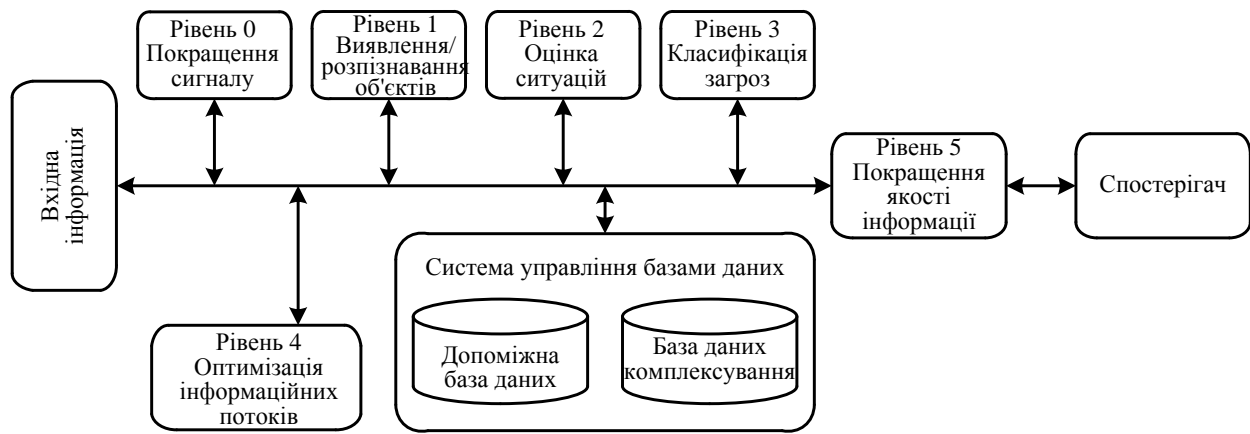


Рис. 4.2 Модель комплексування інформації JDL

Вхідна інформація може надходити з різних локальних або розподілених датчиків, фізично зв'язаних з системою комплексування, з інших джерел знань.

Нульовий рівень (розподілення процесів) обробки сигналу забезпечує підвищення ефективності комплексування шляхом розподілу сигналів по відповідним блокам обробки виходячи з конкретної поточної задачі. Наприклад, ознаки розташування об'єкта направляються на перший рівень виявлення, а ознаки загроз – на другий рівень. На цьому етапі можуть бути задіяні методи виявлення сигналів.

Перший рівень – виділення релевантних ознак – призначений для виявлення з потоку даних характеристик конкретних об'єктів в полі зору. На цьому етапі вирішуються чотири основні задачі: визначення положення всіх об'єктів в полі зору, визначення параметрів руху об'єктів, розподілення інформації між об'єктами, класифікація об'єктів.

На другому рівні (оцінка ситуації) встановлюються взаємні зв'язки між об'єктами і явищам в полі зору. Виявляється характер взаємодії встановлених на першому рівні параметрів окремих об'єктів в контексті ФЦО. При обробці додатково враховується вся доступна інформація про ФЦО і умови роботи (стан атмосфери, час, характер території тощо). Методи обробки на цьому рівні базуються на моделях візуального сприйняття та інтерпретації інформації спостерігачем.

Третій рівень (оцінка загроз) є прогностичним. На цьому етапі оцінюється подальший розвиток поточної ситуації. Тут враховуються апріорні знання і гіпотези про поведінку об'єктів, застосовуються різні методи теорії ігор.

Четвертий рівень (покращення процесу) оптимізує всі інші процеси комплексування. Він обіймає чотири ключові задачі – оцінку поточної і прогнозування майбутньої ефективності комплексування, виявлення інформації, яка є необхідною для покращення процесу комплексування, визначення джерела найбільш релевантної на даному етапі інформації, перерозподіл інформаційних потоків для найкращого виконання задачі. В той час як джерела інформації четвертого рівня і відповідні інформаційні процеси можуть бути відокремленими від аналізованої системи, цей рівень тільки частково належить до локального середовища комплексування.

П'ятий рівень (покращення процесу пізнання) передбачає підвищення якості сприйняття інформації оператором. Причому крім покращення візуального сприйняття (тривимірні монітори, автоматичне розпізнавання жестів та відслідковування напрямку зору, сенсорні монітори) на цьому рівні застосовуються всі можливі впливи – звукові, тактильні тощо. Інтерфейс "комп'ютер – оператор" має бути максимально "дружнім" і сприятливим для діяльності оператора.

В залежності від того, які дані використовуються при комплексуванні можна виділити наступні категорії комплексування [63]:

- комплексування зображень, отриманих від приймачів одного типу в один і той же час, але з різних точок зору (multiview fusion)
- комплексування зображень, отриманих від приймачів різних типів: інфрачервоні зображення з телевізійними, дані панхроматичної та спектральної зйомки і т.п. (multimodal fusion)
- комплексування зображень, отриманих в різний час з метою виявлення змін між ними або для синтезу зображень, в яких усунуті перешкоди, що заважають спостереженню об'єктів в певні періоди часу (multitemporal fusion)

- комплексування зображень, отриманих при різних фокусних відстанях об'єктиву (multifocus fusion)
- комплексування двох або більше зашумлених, спотворених зображень однієї і тієї ж картини з метою отримання комбінованого зображення покращеної якості – вільного від шуму та змазу (fusion for image restoration)
- комплексування спотворених зображень низького розділення з метою отримання комбінованого зображення високого розділення (super resolution fusion)

У випадку БК ОЕСС найбільш актуальним є комплексування зображень, отриманих від приймачів різних типів, зокрема ТВ та ТПВ зображень.

Для кожної категорії комплексування використовують відповідні методи, що визначаються рівнем комплексування (рис. 4.3):

- пристрої комплексування на рівні пікселів (датчиків);
- пристрої комплексування на рівні релевантних ознак (узагальнених параметрів);
- пристрої комплексування на рівні прийняття рішень.

Методи комплексування на рівні пікселів є найбільш простими в плані математичних розрахунків, а отже й найбільш поширеними [64]. При комплексуванні на рівні пікселів результуюче зображення отримуємо шляхом математичних операцій над окремими пікселями або невеликими по площі областями пікселів вхідних зображень. Необхідною умовою ефективності методів даної групи є якісна попередня реєстрація вхідних зображень.

Об'єктами для комплексування на рівні релевантних ознак є не окремі пікселі, а певні характерні області вхідних зображень. В даному випадку виділення релевантних ознак здійснюється незалежно в кожному каналі.

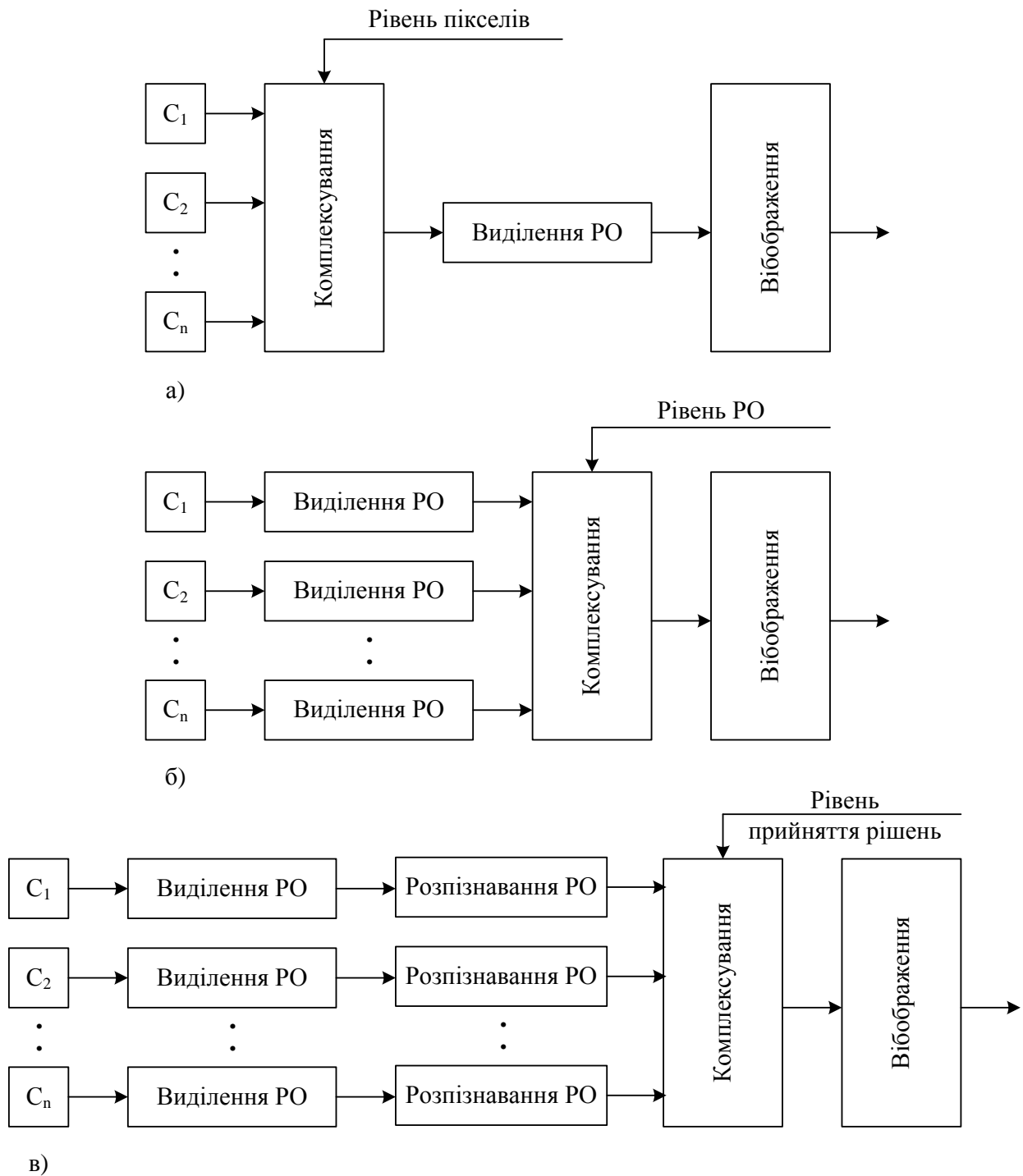


Рис. 4.3 Структури комплексування в БК ОЕСС

Методи комплексування на рівні релевантних ознак розвинуті значно менше і з'явилися значно пізніше, ніж алгоритми комплексування на рівні пікселів. Це пов'язано з обчислювальною складністю даних алгоритмів, а також відсутністю універсальних алгоритмів сегментації та розпізнавання. Проте алгоритми комплексування на рівні релевантних ознак мають суттєві переваги над алгоритмами комплексування на рівні пікселів, якщо застосовуються для

обмеженого класу зображень. Основна різниця між алгоритмами даного класу полягає в принципі сегментації, що використовується для виділення характерних ознак вхідних зображень [65 - 67].

Комплексування на рівні прийняття рішень є менш поширеним та дещо ізольованим. Причиною цього є те, що результатом комплексування є не комбіноване зображення, а деяке судження, яке містить більш інформативний опис реальної картини [68 - 69].

Рішення про застосування кожного з алгоритмів потрібно приймати в залежності від джерел інформації (категорії комплексування). Комплексування на рівні пікселів застосовується, коли джерела зображень близькі по своїм характеристикам, наприклад при комплексуванні зображень одного спектрального діапазону, але з різною роздільною здатністю, або отриманих в різний час. Комплексування на рівні релевантних ознак необхідно застосовувати, коли ступінь розбіжності між джерелами зображень вище, але області підвищеного інтересу можуть бути асоціативно пов'язані. Комплексування на рівні прийняття рішень застосовується в тих випадках, коли вхідні зображення значно відрізняються по своїм характеристикам одне від одного.

Для БК ОЕСС, які застосовуються для запобігання аварійним ситуаціям за рахунок аномальних тепловиділень, перспективним є поєднання алгоритмів комплексування на рівні пікселів та рівні релевантних ознак.

На кожному рівні комплексування використовують відповідні методи комплексування (рис. 4.4).

Методи комплексування на рівні пікселів поділяють на методи багатомасштабного розкладу (Multiscale Decomposition Based Methods) та методи без багатомасштабного розкладу (Non Multiscale Decomposition Based Methods).

До методів без багатомасштабного розкладу відносять: лінійні методи, методи спектрального кодування та нелінійні методи.



Рис. 4.4 Ієрархія методів комплексування [70]

Найбільш простими є лінійні методи. Суть даних методів полягає в тому, що кожен піксель результуючого (комплексованого) зображення отримують шляхом додавання значень яскравості відповідних пікселів вхідних зображень, помножених на певний ваговий коефіцієнт. Вагові коефіцієнти можуть бути попередньо задані або розраховані в процесі виконання алгоритму комплексування. В останньому випадку мають справу з методами адаптивного визначення коефіцієнтів, які в свою чергу поділяються на дві групи: з використанням апіорних даних та без використання апіорних даних. Згідно закордонних джерел, найбільш ефективними лінійними методами з використанням апіорних даних для визначення вагових коефіцієнтів є статистичні методи, а без використання апіорних даних – методи із застосуванням нейронних мереж. Одним з найбільш розповсюджених адаптивних методів є метод аналізу головних компонент.

Суть методів спектрального кодування полягає в тому, що кожному вхідному зображенню виділяється свій піддіапазон із діапазону видимих

частот. Таким чином, на результуючому зображенні будуть присутні всі елементи вхідних зображень, але забарвлені різним кольором в залежності від того, на якому із вхідних зображень вони є більш інформативними. Методи спектрального кодування часто використовуються в поєднанні з іншими методами.

Принцип роботи нелінійних методів полягає в тому, що вхідні зображення поділяються на дві складові, частіше за все низькочастотні та високочастотні. Кожна із складових підлягає подальшій обробці (фільтрації) незалежно від іншої. Потім відбувається комплексування відповідних компонент як самостійних зображень за допомогою будь-якого лінійного методу з подальшим їх об'єднанням в результуюче зображення.

Методи багатомасштабного розкладу передбачають багатомасштабний розклад вхідних зображень (MST – multiscale transform) з подальшим об'єднанням утворених складових згідно певного правила комплексування в комбіноване багатомасштабне представлення результуючого зображення. Саме ж результуюче зображення отримують шляхом оберненого багатомасштабного розкладу. На рис. 4.5 представлена загальна схема комплексування зображень, основана на методах багатомасштабного розкладу.

Найбільш розповсюдженими методами багатомасштабного розкладу є: пірамідальні схеми (піраміда Лапласа [71], контрастна піраміда [72], градієнтна [73], морфологічна [74], управляюча [75]), дискретне вейвлет перетворення (discrete wavelet transform - DWT) [76, 77], перетворення дискретних вейвлет кадрів (discrete wavelet frame – DWF) [78] та інваріантне до зсувів вейвлет перетворення [79].

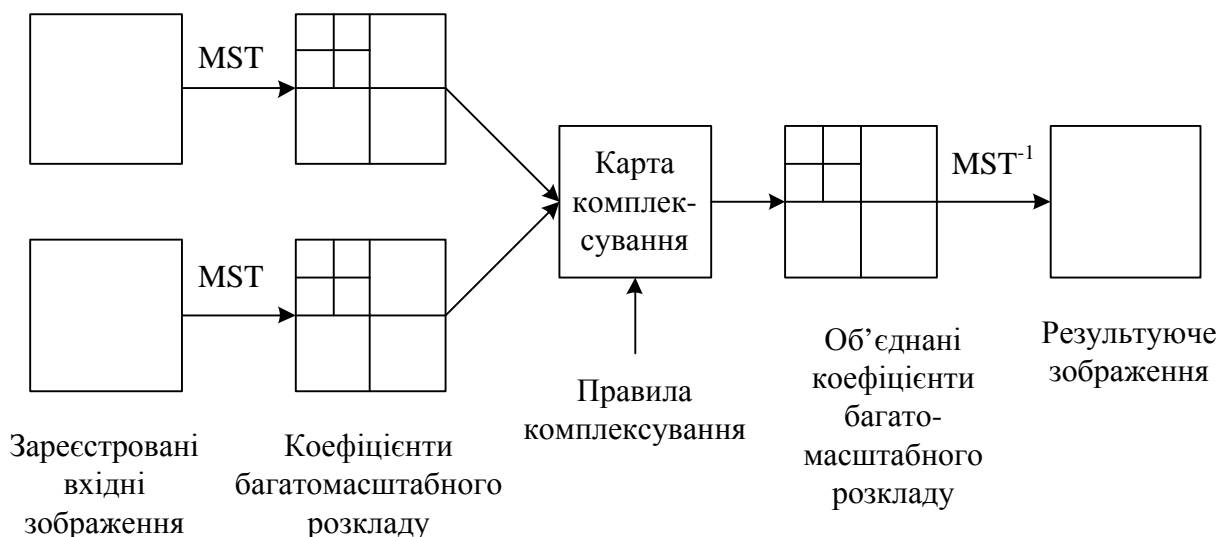


Рис. 4.5 Загальна схема комплексування зображень

Методи комплексування на рівні характерних ознак поділяються за двома критеріями – методи прямої та опосередкованої оцінки, одноступеневі та багатоступеневі. Методи прямої оцінки працюють безпосередньо з яскравістю вхідних зображень. За допомогою спеціальної функції на зображеннях виділяються потенційно інформативні області. При застосуванні методів опосередкованої оцінки вхідне зображення попередньо обробляється спеціальними операторами з метою усунення імпульсного шуму та/або підкреслення інформативних зон.

Одноступеневі методи працюють з оригінальними вхідними зображеннями. Багатоступеневі – із зображеннями, обробленими низькочастотними та високочастотними фільтрами. Відповідно області інтересу виділяються окремо на низькочастотних та високочастотних складових вхідних зображень.

Принцип подальшої обробки майже однаковий для всіх методів даного рівня. Після знаходження меж та виділення областей проводиться їх аналіз. Він виконується по ряду ознак, що мають потенційний інтерес для спостерігача. Це можуть бути морфологічні, топологічні, ознаки яскравості та інші. Після аналізу здійснюється перенесення областей інтересу із вхідних зображень в єдине результуюче.

Отже, найбільш розповсюдженими на сьогоднішній день методами комплексування є метод усереднення, метод головних компонент, піраміда Лапласа, контрастна піраміда, градієнтна піраміда, морфологічна піраміда, вейвлет перетворення та інваріантне до зсувів вейвлет перетворення.

На основі вищесказаного, задачею комплексування є така обробка вхідних зображень, яка дозволяла б отримувати результуюче зображення з:

- 1) Максимальною кількістю інформативних елементів, що присутні у вхідних зображеннях;
- 2) Мінімальною кількістю завад, що присутні у вхідних зображеннях.

Складність вирішення поставленої задачі полягає у відсутності кількісної міри, що дозволяла б однозначно оцінити ступінь інформативності або зашумленості того чи іншого зображення. Крім того відсутні універсальні методи оцінки якості результату комплексування, які максимально корелювались би із суб'єктивним сприйняттям оператора.

Методи оцінки якості результату комплексування. Оцінку якості зображень зазвичай здійснюють за допомогою суб'єктивної експертизи, оскільки вона дає найбільш достовірні дані. Поряд з тим, активно ведуться розробки по створенню об'єктивних методів, які б максимально співпадали із суб'єктивними оцінками операторів.

4.3 Комплексування при спостереженнях в тумані чи в диму

Серед систем цілодобового візуального спостереження найбільш поширеними є пасивні двоканальні БК ОЕСС. Вони працюють здебільшого в видимому і середньому ($\Delta\lambda=8 - 14$ мкм) ІЧ діапазонах спектру та дозволяють проводити цілодобові спостереження: вдень – за допомогою видимого каналу, вночі – ІЧ каналу. Вибір робочого каналу як правило здійснюється при зменшенні освітленості простору предметів ввечері, або його збільшенні вранці. Проте навіть вдень можливі різкі зміни розподілення освітленості в просторі предметів і контрасту на вході БК ОЕСС. Наприклад, при

спостереженнях в тумані об'єктів, які розміщені на різних відстанях від БК ОЕСС. За таких умов ефективність візуального спостереження видимих або ІЧ зображень змінюватиметься і може виникнути доцільність використання не тільки видимого, але й ІЧ каналу. На практиці використовуються два режими роботи двоканальної БК ОЕСС – паралельний і послідовний. Зазвичай складні алгоритми обробки зображень використовуються при відкладеному в часі комплексуванні, а для відображення інформації в реальному масштабі часу застосовуються найпростіші алгебраїчні алгоритми комплексування. Прості алгоритми комплексування є ефективними здебільшого при спостереженнях об'єктів на рівномірних фонах. Для виявлення та розпізнавання об'єктів у складних ФЦО без суттєвого ускладнення БК ОЕСС доцільнішим може виявитись використання послідовного режиму роботи каналів.

З огляду на здебільшого матричний характер зображень в кожному спектральному каналі типовим і ефективним алгоритмом комплексування на рівні датчиків є попіксельне обчислення нормованої суми зважених сигналів двох (або більшої кількості) каналів [80]:

$$U_k^i = \frac{U_B^i (w_B^i + v_B^i) + U_{IЧ}^i (w_{IЧ}^i + v_{IЧ}^i)}{(w_B^i + v_B^i) + (w_{IЧ}^i + v_{IЧ}^i)}, \quad (4.1)$$

де U_k^i - комплексований сигнал i -го пікселя; U_B^i , $U_{IЧ}^i$ - сигнал з i -го пікселя в видимому та інфрачервоному піддіапазонах відповідно; w_B^i , $w_{IЧ}^i$ - вагові коефіцієнти «поточної важливості» видимого та інфрачервоного каналів відповідно; v_B^i , $v_{IЧ}^i$ - локальні відношення «сигнал/шум» в каналах.

В сигналах U_B^i , $U_{IЧ}^i$ в формулі (4.1) мають бути попередньо скомпенсовані геометричні викривлення (наприклад, ті, що викликані турбулентністю атмосфери) та видалені імпульсні шуми. Поняття «поточної важливості» залежить від контексту виконуваної задачі. Наприклад, для візуального каналу цим показником може бути величина локальної зміни яскравості зображення (тобто – контурна інформація), для інфрачервоного

каналу – виважений енергетичний контраст.

Така ж ситуація мала місце в натурному експерименті при спостереженнях міського ландшафту в умовах туману взимку (рис. 4.6).



а) ТВ канал



б) ТПВ канал

Рис. 4.6 Зображення залізничної сортувальної станції

Було встановлено, що на близьких дистанціях візуальне виявлення і візуальне розпізнавання об'єктів ефективніше при роботі з видимим каналом. При збільшенні відстані спостереження переваги видимого каналу зменшувались. На великих відстанях ТВ канал практично ставав неефективним: стан будівель на горизонті (рис. 4.6, $l = 850 - 900$ м) цілком задовільно оцінювався по ТПВ зображенню, в той час, як видимий канал не давав змоги їх навіть виявити. Головними причинами такої ситуації очевидно є, по-перше, більш різкий спад $\tau_a(\lambda, l)$ в умовах туману на короткохвильових ділянках спектру; по-друге, перевага для заданих погодних умов теплових контрастів над видимими для штучних об'єктів, які мають джерела енергії. Ймовірно, що другий фактор залежить від часу дня, кліматичних і сезонних умов. Тому при подальших дослідженнях ці чинники мають бути включені в математичну модель в явному вигляді.

Виявлені закономірності дають змогу оптимізувати послідовний режим роботи двоканальної БК ОЕСС з врахуванням особливостей зорового сприйняття оператора або розробити алгоритм комплексування зображень для відображення одного синтетичного зображення.

Серед трьох основних рівнів комплексування [64] найпростішим і найшвидшим є рівень пікселів. Ефект від такого комплексування є особливо відчутним при роботі в квазіреальному масштабі часу з зображеннями з однаковими релевантними ознаками, або ж з задачами, які можуть бути зведені до виявлення об'єктів з відносно невеликим алфавітом. Класичним прикладом є ОЕС для дистанційної діагностики і енергоаудиту будівель. В цьому випадку спостереження ведуться вдень, значні завади відсутні, ослаблення випромінювання атмосферою мінімальне і зображення в кожному з каналів в значній мірі формуються елементами конструкцій. Інформація в каналах зазвичай має форму двох паралельних відеопослідовностей, кожна з яких складається з окремих повних кадрів. Для сумісної обробки сигналів двох амплітудних матриць, якими є кадри, можна застосувати один з показників подібності. Наприклад, коефіцієнт кореляції, показник взаємної інформації MI (mutual information), статистичну розбіжність.

Показник взаємної інформації MI як ентропійна міра взаємної залежності двох випадкових дискретних сигналів A і B (а саме такі сигнали формуються матричними ПВ) має вигляд:

$$MI(A,B) = \sum_i \sum_j P(A_i, B_j) \log_2 \frac{P(A_i, B_j)}{P(A_i) \cdot P(B_j)}, \quad (4.7)$$

де $P(A_i, B_j)$ - умовна ймовірність реалізацій A і B ; $P(A_i)$, $P(B_j)$ - безумовні ймовірності реалізацій A і B .

Цей показник останнім часом набуває все більшої популярності і видається доцільним його використання для виявлення витоків тепла з допомогою БК ОЕСС енергоаудиту будівель при остаточній постобробці зображень. Для перевірки цього твердження був проведений натурний

експеримент з реєстрацією змістовного зображення міського ландшафту (рис.4.7). Він підтвердив ефективність показника МІ для суміщення зображень за наявності контрастних релевантних елементів.



а) діапазон $\Delta\lambda_2=7,5 - 13,0$ мкм



б) діапазон $\Delta\lambda_1=0,45 - 0,85$ мкм

Рис. 4.7 Зображення будівлі з допомогою БК ОЕСС

Іншою важливою задачею діагностики стану інженерних споруд є виявлення тріщин. Обчислення за критерієм максимуму показника МІ при спостереженні тріщин в пофарбованій вапном стелі не дало задовільних результатів. Тобто виявлення та діагностика тріщин в будівлях є прикладом, коли взаємна інформація як критерій комплексування дає неадекватний результат. Отже для БК ОЕСС, каналні зображення в яких значно відрізняються одне від одного, показник МІ не може використовуватись внаслідок слабкої статистичної залежності між сигналами. До таких БК ОЕСС очевидно належать і медичні системи.

В системах з слабкою статистичною залежністю між сигналами каналів часто інформативна якість каналів є різною і апріорно невідомо, який з каналів слід вважати основним. Очевидно, що в цьому разі алгоритм комплексування має враховувати процедуру прийняття рішень кінцевою ланкою всієї інформаційної системи (в випадку іконічних систем необхідно враховувати особливості зорового сприйняття оператора).

Одним з напрямків комплексування зображень є аналіз і комбінуванні спектрів Фур'є локальних околиць зображень. Такі методи, як правило, можуть бути застосованими для будь-якої кількості каналів спостереження і не залежать від їх спектрального діапазону. Для формування фази комплексованого зображення можна аналізувати ступінь анізотропії поточної околиці кожного з початкових зображень. Вибирається канал з максимальною анізотропією. Амплітуда комплексованого зображення поступає з каналу, вибраного апріорі, або з каналу, який в процесі роботи є кращим по критерію максимуму дисперсії.

Таким чином, для формування підсумкового зображення $u_S(m,n)$ з декількох результатних необхідно вибрати зображення $u_1(m,n)$ із спектром $F_1(\omega_1, \omega_2)$, що поставляє амплітудну частину, і зображення $u_2(m,n)$ із спектром $F_2(\omega_1, \omega_2)$, що поставляє фазову частину. Причому зображення $u_1(m,n)$ і $u_2(m,n)$ можуть співпадати. Синтезована спектральна матриця формується таким чином:

$$F_S(0,0) = F_1(0,0), FS(\omega_1, \omega_2) = F_2(\omega_1, \omega_2), \text{ при } \omega_1, \omega_2 \neq 0. \quad (4.3)$$

Швидкий алгоритм комплексування відновлює елемент $u_S(0,0)$, для чого не потрібно обчислювати спектр Фур'є:

$$u_S(0,0) = u_2(0,0) + (F_1(0,0) - F_2(0,0))/N^2, \quad (4.4)$$

де N - лінійний розмір околиці.

4.4 Комплексування при вібраціях і зсувах

В сенсі зменшення змазування та геометричних спотворень комплексування не може точно відновити оригінальне зображення $o[x,y]$, але дозволяє підвищити просторове розділення порівняно з одиничним кадром.

Комплексування зображення g_k складається з трьох етапів: реєстрації зображення (з компенсацією геометричних деформацій W_k), подальшої зворотної згортки (багатоканальної чи багатокadroвої в залежності від типу БК

ОЕСС) та підвищення просторового розділення. Другий етап безпосередньо стосується усунення впливу просторового змазування зображення. Його доцільно об'єднати з третім етапом, в результаті якого має бути одержане досить якісне зображення.

4.5 Комплексування для розширення інформаційного об'єму в просторі предметів

Найбільш наочно ефект розширення інформаційного об'єму проявляється при комплексуванні ознак в семантичному просторі.

Перед безпосередньо процесом комплексування виконується радіометрична і геометрична корекція сигналів в каналах. На цьому етапі в разі комплексування на рівні чутників необхідно витримати дуже високу точність – адже всі алгоритми цього рівня є дуже чутливими до геометричної неузгодженості. Також в залежності від вибраної стратегії комплексування на попередньому етапі можуть відфільтровуватись шуми (особливо – спекл-шуми для радарів з синтезованою апертурою, в системах з активним каналом).

Іноді, при великій різниці в роздільній здатності комплексованих зображень, передискретизація у більш високо роздільний формат може супроводжуватись виникненням блочної структури зображення. Для уникнення цього на попередньому етапі використовують згладжуючу фільтрацію.

Допустима кількість окремих інформаційних каналів відрізняється в різних алгоритмах комплексування, наприклад, відомий метод IHS є обмеженим за цим параметром. Тому в ряді випадків необхідно відібрати тільки ті канали, інформація в яких є потенційно найбільш цінною для поточної задачі. Широкого розповсюдження набули статистичні алгоритми, за якими інформаційна місткість каналу визначається максимальною мінливістю даних в ньому.

Іншими алгоритмами зменшення кількості інформаційних каналів є аналіз головних компонентів (PCA) [81], статистичні алгоритми оцінки кореляції між зображеннями в каналах [82].

Великий обсяг алгоритмів комплексування розробляється для кольорових зображень. В цілому ці алгоритми можна розділити на дві великі групи: ті, що використовують як аргумент функцій координати кольору; ті, що використовують кольоровість. В першому випадку результуючий колір визначається за координатами на хроматичних діаграмах. Представлення другої групи використовують яскравість об'єкта, інтенсивність тону і насиченість. Часто для визначення кольору використовується декартова система координат RGB. Це зручно з огляду на те, що в цій системі визначаються кольори на моніторі.

Метод композитних кольорів (RGB). Цей метод дозволяє відтворювати кольорове зображення як суміш трьох чистих кольорів – червоного, зеленого, голубого [83]. Він дозволяє реалізовувати багато варіантів за рахунок співставлення шкали сірого з окремими кольорами з різними ваговими коефіцієнтами. Легко здійснюється виділення потенційно цікавих об'єктів кольором. Комплексування методом композитних кольорів успішно використовується при обробці космічних зображень з радарів з синтезованою апертурою, наприклад для супутника ERS-1 [83], а також для сумісної обробки таких зображень з інформацією оптичних каналів. Часто цей метод використовують разом з іншими (IHS, PCA тощо) позаяк він не може забезпечити чітку кореляцію інформації між спектральними каналами.

Метод "інтенсивність – тон – насиченість" (IHS) є одним з найпоширеніших для обробки і комплексування зображень високого просторового розділення з панхроматичного каналу і низького просторового розділення зі спектральних каналів [84, 85]. Цей метод використовується для покращення передачі кольорів, виділення релевантних ознак, підвищення просторового розділення. Алгоритм IHS побудовано з досвіду вивчення зорового сприйняття людини. Він ефективно розділяє просторову

(інтенсивність) і спектральну (тон, насиченість) інформацію у стандартних RGB зображеннях і полягає в обрахуванні трьох величин [86]:

$$\begin{pmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}; \quad H = \tan^{-1}\left(\frac{v_2}{v_1}\right); \quad S = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}. \quad (4.5)$$

В усіх модифікаціях алгоритмів IHS закладений механізм заміщення однієї з трьох компонентів сигналом з іншого інформаційного каналу. Найчастіше заміщується інтенсивність. На практиці використовуються пряме IHS-перетворення і метод з заміщенням кольорових координат. В першому випадку обробляються сигнали про інтенсивність, тон і насиченість, які поступають по окремим інформаційним каналам. В другому випадку кольори трансформуються з RGB-простору в IHS координати. Фізичною інтерпретацією IHS координат приблизно можна вважати шорсткість поверхні об'єкта для інтенсивності, максимальну спектральну смугу відбиття для тону і чистоту поверхні для насиченості. Потім одна з компонент заміщається деякою четвертою функцією (здебільшого – контрастом), яка є основою для подальшого відновлення зображення. Комплексування здійснюється шляхом зворотнього перетворення з IHS координат в RGB координати [87]:

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix}. \quad (4.6)$$

Таким шляхом (заміщенням розподілу інтенсивностей в спектральних каналах інтенсивністю з панхроматичного каналу високого просторового

розділення з подальшим зворотнім перетворенням в RGB координати) формуються високороздільні кольорові зображення земної поверхні з космосу.

В різних модифікаціях описаного методу допускаються лінійні перетворення, масштабування однієї з компонент перед зворотнім перетворенням, до того ж це масштабування може бути різним для кожної з величин. Одним з близьких до IHS методом є трансформування в координати тону, насиченості, амплітуди (т.зв. метод HIS або HSV [88]).

Метод яскравості-цвітності використовує перетворення сигналу з RGB координат в YIQ координати. В YIQ-просторі Y описує яскравість монохромного зображення, яке комбінується з блакитного, зеленого і червоного сигналів пропорціонально до спектральної чутливості зорової системи. Компоненти I і Q є кольорами, що введені для полегшення обробки сигналу в реальних системах: I – це різницевий сигнал "червоний мінус блакитний (cyan)", Q – "пурпурний (magenta) мінус зелений). Пряме перетворення з RGB координат в YIQ координати описується формулою (4.7) [89]:

$$\begin{pmatrix} Y \\ I \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ 0,596 & -0,274 & -0,322 \\ 0,211 & -0,523 & 0,312 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}, \quad (4.7)$$

а зворотнє перетворення – формулою (4.9):

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,000 & 0,956 & 0,621 \\ 1,000 & -0,272 & -0,647 \\ 1,000 & -1,106 & -1,703 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y \\ I \\ Q \end{pmatrix}. \quad (4.8)$$

Компоненти Y , I , Q є менш корельованими між собою, ніж R , G , B , тому даний метод є більш ефективним для покращення зображень.

Якщо позначити панхроматичне зображення високого розділення як $D = D(m, n)$, а $B_k = B_k(m, n)$, $k = \overline{1, K}$ – зображення, отримані в K спектральних діапазонах одночасно з $D(m, n)$, і вважати, що всі ці зображення після

проведення координатної обробки геометрично сполучені. одержання для $D(m,n)$ спектрозональних компонентів $D_k = D_k(m,n)$, $k = \overline{1, K}$, приблизно такого ж розділення включає два етапи.

На першому етапі по спектрозональним зображенням B_k , $k = \overline{1, K}$, виконується оцінка спектральної яскравості точок земної поверхні у вигляді полінома $G(\lambda) = \sum_{r=0}^{K-1} a_r \lambda^r$.

На другому етапі на основі зображень D , B_k , $k = \overline{1, K}$, і функції $G(\lambda)$ з використанням того або іншого алгоритму виконується формування D_k , $k = \overline{1, K}$.

Існують кілька підходів до рішення цієї задачі.

На основі B_k , $k = \overline{1, K}$ оцінимо спектральну яскравість спостережуваної сцени $G(\lambda) = \sum_{r=0}^{K-1} a_r \lambda^r$. Потім, використовуючи механізм модуляції сигналом D спектрозональних компонентів, які визначаються $G(\lambda)$ і границями спектральних діапазонів λ'_k, λ''_k , $k = \overline{1, K}$, одержимо:

$$D_k = D \frac{\int_{\lambda'_k}^{\lambda''_k} G(\lambda) d\lambda}{\frac{1}{k} \int_{\lambda'_1}^{\lambda''_k} G(\lambda) d\lambda} = D \frac{\sum_{r=0}^{K-1} \left(a_r \frac{(\lambda'_k)^{r+1} - (\lambda''_k)^{r+1}}{r+1} \right)}{\frac{1}{K} \sum_{r=0}^{K-1} \left(a_r \frac{(\lambda''_K)^{r+1} - (\lambda'_1)^{r+1}}{r+1} \right)}, \quad k = \overline{1, K}. \quad (4.9)$$

Вираз, що стоїть в знаменнику (4.10), впливає на розподіл енергетичної яскравості по діапазонах пропорційно співвідношенню спектрозональних сигналів B_k , $k = \overline{1, K}$.

По зображеннях D, B_2, B_3, \dots, B_K оцінимо $G_1(\lambda) = \sum_{r=0}^{K-1} a_{1r} \lambda^r$, після чого по виразу (2.10) одержимо перший компонент D_1 . По зображеннях B_1, D, B_3, \dots, B_K

оцінимо $G_2(\lambda) = \sum_{r=0}^{K-1} a_{2r} \lambda^r$, після чого по виразу (4.10) одержимо D_2 . Далі за аналогією одержимо D_3, D_4, \dots, D_k . Тобто в даному підході для формування спектрозональної компоненти D_k використовується функція $G_k(\lambda)$, отримана по зображеннях B_j , $j \neq k$, і зображенні D , яке виступає замість B_k .

Аналогічно другому підходу одержимо $G_k(\lambda)$, $k = \overline{1, K}$. Далі сформуємо шукані зображення D_k , $k = \overline{1, K}$, наступним чином:

$$D_k = \int_{\lambda'_k}^{\lambda''_k} G_k(\lambda) d\lambda, \quad k = \overline{1, K}. \quad (4.10)$$

Аналогічно другому й третьому підходам одержимо $G_k(\lambda) = \sum_{r=0}^{K-1} a_{kr} \lambda^r$. Далі

знайдемо середню характеристику $\overline{G}(\lambda) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K G_k(\lambda) = \sum_{r=0}^{K-1} \overline{a_r} \lambda^r$,

$$\text{де } \overline{a_r} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K a_{kr}.$$

Після цього одержимо

$$D_k = \int_{\lambda'_k}^{\lambda''_k} \overline{G}(\lambda) d\lambda, \quad k = \overline{1, K}. \quad (4.11)$$

Експериментально встановлено, що при $K \geq 3$ найбільш якісні результати дає перший підхід, при $K = 2$ - другий підхід.

На рис. 4.8 представлені панхроматичний знімок (а)), спектрозональний знімок (б)), результат комплексування (в)) у вигляді спектрозонального зображення високого просторового розділення [89]. Очевидно, що рис. 4.8 в) по просторовому розділенню близький до панхроматичного знімку.

Серед арифметичних алгоритмів комплексування одними з найпростіших є різноманітні комбінації додавання та множення. Наприклад, один з таких алгоритмів ефективно працював з інформацією в космічних місіях Landsat-TM та SPOT [90]. Алгоритми комплексування сигналів двох каналів мали вигляд:

$$DN_f = A(w_1 DN_a + w_2 DN_b) + B, \quad (4.12)$$

$$DN_f = ADN_a DN_b + B, \quad (4.13)$$

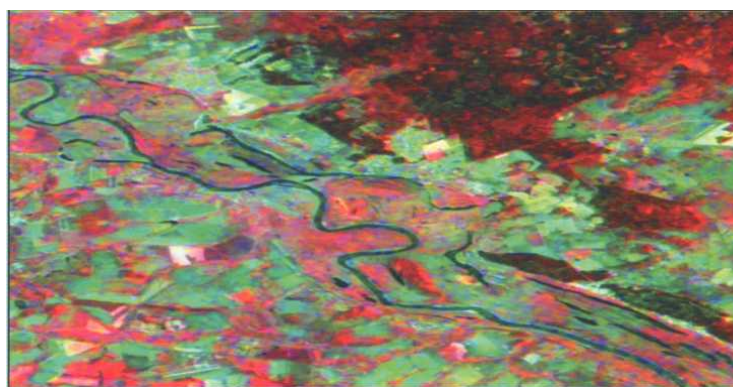
де A , B – масштабні коефіцієнти; w_1 , w_2 – вагові коефіцієнти.



а) панхроматичний знімок



б) спектрозональний знімок



в) результат комплексування

Рис. 4.8 Комплексування спектрозональних зображень з даними панхроматичної зйомки

Успішний вибір коефіцієнтів в формулах (4.13), (4.14) забезпечує хороші результати комплексування [91 - 93]. Ці методи широко застосовуються для комплексування панхроматичних і спектральних каналів космічних БК ОЕСС.

Принципово не відрізняються від розглянутих методи комплексування відніманням та діленням (досить замінити додатні коефіцієнти від'ємними). Часто на практиці такі методи є більш результативними, адже дозволяють реєструвати зміни в сигналах, які бувають дуже інформативними [94]. Враховуючи, що обчислена різниця може прийняти від'ємне значення, часто в різницевих алгоритмах вводять додатню підставку. У диференційних методах

важливим є вибір верхнього і нижнього порогу різниці або відношення сигналів в пікселях комплексованих зображень: з одного боку важливо не допустити виникнення шумових викидів при наявності великих різниць вимірюваних величин, з другого – не пропустити малої зміни вимірюваної величини. Для цього використовують нормалізацію сигналів в каналах, наприклад, за алгоритмом (4.14) [95]:

$$\frac{XS_3 - XS_2}{XS_3 + XS_2} - \frac{TM_4 - TM_3}{TM_4 + TM_3} + C . \quad (4.14)$$

Для підвищення просторового розділення без помітних втрат радіометричного розділення використовується алгоритм [93]:

$$DN_{HybridXS(j)} = DN_{PAN} \frac{DN_{XS(i)}}{DN_{SynPAN}} , \quad (4.15)$$

де $DN_{HybridXS(j)}$ – результуючий піксел обробленого зображення; DN_{PAN} – поточний піксел панхроматичного каналу високого розділення; $DN_{XS(i)}$ – поточний піксел i -го спектрального каналу; DN_{SynPAN} – поточний піксел синтезованого панхроматичного каналу низького просторового розділення, який складається з усіх пікселів спектральних каналів.

Схожі принципи закладені в алгоритм Брові (Brovey Transform), який використовується в RGB моніторах для нормалізації при покращенні якості зображень [88]:

$$DN_{fused} = \frac{DN_{b1}}{DN_{b1} + DN_{b2} + DN_{bn}} DN_{highres} , \quad (4.16)$$

де DN_{b1} – значення сигналів в поточному пікселі i -го спектрального каналу; $DN_{highres}$ – поточний піксел каналу високого розділення.

Суттєві обмеження на прості арифметичні методи накладають досить часті випадки реверсивних контрастів однакових об'єктів в різних каналах.

Наприклад, контрасти в видимому діапазоні спектру вранці та ввечері є майже однаковими, а в ІЧ діапазоні більш масивні тіла ввечері мають додатній контраст за рахунок накопиченої енергії, а вранці – від’ємний. Відповідно, комплексування складанням дасть в різний час доби неоднакові результати.

Аналіз головних компонент – метод, що широко застосовується в стисненні та кодуванні зображень, виділенні релевантних ознак, в тому числі – контурів зображень, виявленні міжкадрових різниць, послідовному комплексуванні підвищенні відношення сигнал/шум [96] тощо. Цей алгоритм є статистичним і полягає в перетворенні набору взаємно пов’язаних багатоваріантних даних в нову комбінацію некорельованих перемінних. Тобто багатовимірний простір координат замінюється на більш простий з набором ортогональних осей. Аналіз головних компонент включає в себе обчислення кореляційної або коваріаційної матриці, власного вектора або характеристичного числа матриці, власне головних компонент. Зворотнє перетворення переводить набір даних в оригінальний параметричний простір. Кореляційні матриці викликають масштабування осей таким чином, що ознаки набувають одиничної дисперсії. Це дозволяє уникнути домінування одної з великих за абсолютним значення ознак в описі зображень. Збільшення простору ознак покращує результати обробки [97].

Аналіз головних компонент може виконуватись двома способами – стандартним та вибіркоким. В першому випадку використовуються всі доступні інформаційні канали, а в другому – тільки кілька попередньо відібраних. Такий відбір здійснюється на основі апріорних даних, наприклад, по максимальній мінливості сигналу в каналі.

Однією з найбільш вживаних методик з використанням даного алгоритму є отримання високороздільного кольорового зображення шляхом заміщення головної компоненти спектральних каналів з низьким просторовим розділенням даними з панхроматичного каналу, причому просторова інформація залишається єдиною для всіх каналів, а спектральна є індивідуальною для кожного [98]. Замість процедури заміщення однієї з компонент іншою даними

алгоритм використовується також для обрахування єдиного комплексованого зображення з набору [99].

Для запобігання погіршення результату обробки внаслідок малого об'єму простору ознак для кожного з інформаційних каналів виконується т.зв. деко реляційне розширення. Воно полягає в переформатуванні мультиспектральної інформації в просторі головних компонент у кульове скупчення шляхом зміни масштабів осей [100].

Ще одним методом підвищення просторової роздільної здатності є високочастотна фільтрація з селекцією спектральних каналів. Зазвичай ця процедура полягає в високочастотній фільтрації даних в каналі з високою роздільною здатністю і в наступному попиксельному додаванні отриманої інформації у каналах з низькою роздільною здатністю [96]. Одним з обмежень даної методики є небезпека втрати важливої інформації про текстури з зображенні під час фільтрації.

В результаті багаторазової регресії з набору змінних можна сформувати змінну, що є максимально корельованою з незмінними даними. В комплексуванні зображень така процедура називається регресійним заміщенням змінних і використовується для визначення лінійної комбінації взаємо замінимих інформаційних каналів. Звичайно, для ефективного комплексування одержана лінійна комбінація має враховувати більшість релевантних ознак, що містяться у вхідних зображеннях. Цей алгоритм є досить розповсюдженим у задачах виявлення між кадрових різниць, наприклад, при супроводженні об'єктів [94].

Ще одним з алгоритмів заміщення є аналіз канонічних величин, який на основі існуючих інформаційних каналів і лінійних операторів дозволяє формувати композитні канали з максимальним значенням варіацій вимірюваних величин. Ця методика потребує також ефективного механізму визначення малозмінних областей на зображеннях [101].

Потужним інструментом обробки зображень із змінною роздільною здатністю (multiresolution image processing) є вейвлет-перетворення [102, 103].

Значною перевагою цього інструменту порівняно з Фур'є перетворенням є локалізованість в площині об'єкту (зображення), недолік полягає в великій складності аналітичних обчислень. В основу вейвлет-перетворення покладені ієрархічні алгоритми згортки вхідного сигналу з деяким ядром із змінним масштабом. Такий підхід робить вейвлет-перетворення дуже ефективним при аналізі текстур, кодуванні сигналів, стеженні за об'єктами та розпізнаванні образів. З допомогою вейвлет-перетворення можна якісно комплексувати інформацію з каналів з різною роздільною здатністю, наприклад, «БК ОЕСС – радар з синтезованою апертурою». Основою комплексування з допомогою вейвлет-перетворення є накладення спектральної інформації низького розділення на інформацію високого розділення на етапі розкладу останньої по вейвлет-базисам. Це можна зробити заміщенням, додаванням або вибором відповідних коефіцієнтів [104, 105].

В ряді випадків одного алгоритму може бути не достатньо для вирішення задачі комплексування. Наприклад, це може бути при обробці зображень, що спотворені вібраціями, хмарністю та турбулентністю атмосфери, мають викривлену передачу кольорів тощо. В нагоді стають гібридні методики, яких існує дуже багато. Так можливі всілякі варіанти комбінацій методів композитних кольорів, IHS, аналізу головних компонент [106]. Наприклад, для комплексування видимого та ІЧ зображень широко застосовується поєднання методу IHS з арифметичними алгоритмами для покращення візуального сприйняття вихідного зображення [90], або з аналізом головних компонент. Підсилення контурної інформації за рахунок високочастотної фільтрації і подальшого комплексування перемноженням телевізійного і радарного зображень [107] можуть значно покращити якість зорового сприйняття інформації.

Окрема група методів призначена для відновлення зображень, які мають втрати інформації по полю кадру. Це явище спостерігається при частковому затіненні ФЦО, під впливом дефокусування або турбулентності атмосфери тощо. Для його усунення використовуються алгоритми зшивання єдиного

зображення як мозаїки кількох зображень. Мозаїчні методи також комбінуються з іншими. Наприклад, при спостереженні на вертикальних хмарних трасах частину інформації видимого телевізійного каналу можна доповнити даними радару з синтезованою апертурою (нажаль практичне застосування такого комплексування є неефективним на гористих фонів).

Виходячи з реальних ситуацій, коли в БК ОЕСС співіснують кілька різноформатних МПВ, особливу увагу необхідно приділяти методам багатомасштабного комплексування.

Для отримання найбільшої ефективності виконання завдання всією інформаційною системою, до складу якої входить оператор, необхідно забезпечити як умова більший об'єм вхідної інформації для подальшого аналізу. Першим і універсальним напрямом у цьому є підвищення роздільної здатності вхідних каналів, або БК ОЕСС в цілому. Традиційними для обробки аерокосмічної інформації є алгоритми підвищення просторової роздільної здатності за рахунок комплексування панхроматичного високороздільного зображення з спектральними зображеннями низької роздільної здатності [160]. Також використовуються методи підвищення роздільної здатності при послідовному комплексуванні сигналів з одного каналу. В будь-якому випадку необхідною умовою успішної обробки є достатньо висока точність реєстрації зображень. В принципі, якщо комплексування відбувається не на рівні чутників, то вимоги до геометричної точності суміщення різних кадрів знижуються, але на практиці намагаються як найбільш точно сумістити зображення [108, 109]. Для цього розробляються спеціальні алгоритми геометричної прив'язки, наприклад, табличні [98, 110].

Іншим напрямком підвищення інформативності вхідних даних є одержання стереоскопічних зображень, коли замість просторово двомірного сигналу аналізується тримірний. Сучасна стереофотограмметрія використовує комплексування різних телевізійних, ТПВ каналів, радарів з синтезованою апертурою. З точки зору комплексування однією з основних складностей є радіометрична відмінність між кадрами стереопар [111, 112].

Виділення рухомих об'єктів є ще одним з ефективних механізмів збільшення інформативних ознак. Для цього як правило використовується послідовне комплексування сигналу в одному каналі з наступною різницевою обробкою або методи головних компонентів [113]. Подібні алгоритми можна використовувати також і для спостереження за зміною стану нерухомих об'єктів.

При комплексуванні мультиспектральних субпіксельно зміщених зображень досягається підвищення просторової роздільної здатності по одній координаті. У цьому випадку лінійки встановлюються таким чином, щоб миттєві поля зору однойменних пікселів були зміщені відносно один одного на долю пікселя.

Нехай в кожному спектральному каналі встановлено по K ($k = \overline{1, K}$) однотипних лінійних МПВ так, що поле зору $(k + 1)$ -ї лінійки зміщене відносно k -ї на величину d/K , де d — відстань між центрами сусідніх пікселів. В результаті сцена спостерігається в більш частій просторовій решітці з кроком d/K при полі зору окремого елемента рівному d , тобто апертура кожного елемента лінійного МПВ накриває K елементів решітки. Для випадка трьох лінійок розташування та геометрія полів зору зображена на рис. 4.9 [114].

У цьому випадку друга лінійка зміщена щодо першої на $d/3$, третя щодо першої на $-2d/3$, а апертура кожного елемента дорівнює d .

B_1, B_2, B_3 є зображеннями з лінійних МПВ з M пікселями, миттєві поля зору яких субпіксельно зміщені. ФРТ МПВ моделюється оператором розфокусування $H(t, p)$. При виконанні цієї операції масив елементів вихідного зображення $B' = B'(m, n)$, $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$ формується шляхом дискретної згортки вихідного зображення $B = B(m, n)$ з фільтром $H = H(t, p)$, $t = \overline{-0.5T, 0.5T}$, $p = \overline{-0.5P, 0.5P}$ (T і P парні):

$$B'(m, n) = \sum_{t=-0.5T}^{0.5T} \sum_{p=-0.5P}^{0.5P} B(m, n) H(t, p). \quad (4.17)$$

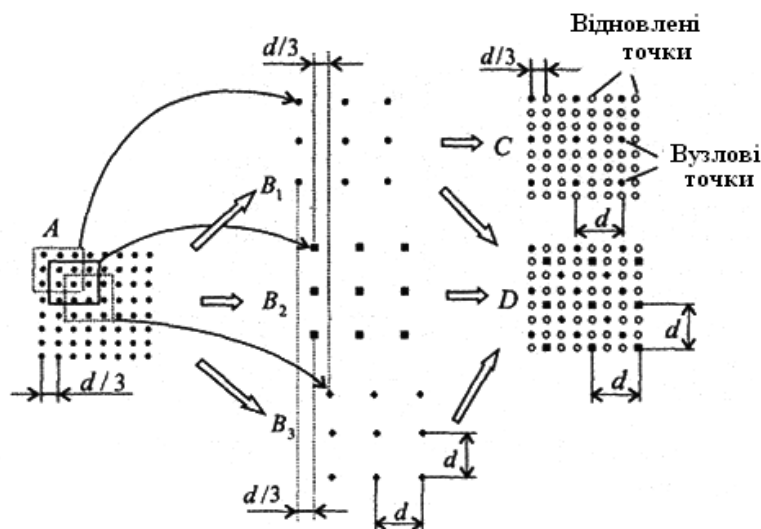


Рис. 4.9 Модель формування даних з трьох лінійних МПВ: А - реальне зображення; B_1, B_2, B_3 - зображення, отримані з А за допомогою операцій розфокусування, проріджування та зміщення; С - відновлене зображення від однієї лінійки МПВ; D - результат комплексування зображень B_1, B_2, B_3

Для більшості реальних МПВ кожний піксел є квадратним, а сусідні елементи мають між собою проміжок, який значно менший у порівнянні з розмірами піксела. Тому ФРТ має форму, близьку до Π – подібної, і загальна ФРТ є матрицею H , у якій усі елементи рівні й у сумі становлять 1. Розміри цієї матриці визначаються числом лінійок МПВ й частотою їх опитування.

Операцією проріджування моделюється в рядковому напрямку число елементів в лінійці МПВ, а в кадровому напрямку — частота опитування лінійок. Вона виконується шляхом заповнення нулями непотрібних рядків і стовпців у зображенні, отриманому на основі розфокусування зображення А.

Операцією зміщення в рядковому напрямку моделюється взаємний зсув лінійок МПВ, а в кадровому напрямку - часовий інтервал між початками опитування лінійок. Ця операція виконується на етапі проріджування, коли в кожному зображенні стовбці й рядки, що обнуляються, задаються таким чином, щоб вузлові точки цих зображень були зміщені відносно один одного.

Шляхом зіставлення зображення С з зображенням D можна оцінити ступінь поліпшення якості зображення D за рахунок комплексування. Використання двох лінійних МПВ, зміщених на 0,5 пікселя, підвищує

роздільну здатність зйомки приблизно в 1,3 рази в порівнянні із зображенням, отриманим від однієї лінійки; використання трьох зміщених на $1/3$ пікселя лінійок дає підвищення роздільної здатності приблизно в 1,5 рази при відповідному виборі частоти опитування цих лінійок.

При комплексуванні субпіксельно зміщених знімків, одночасно отриманих в різних спектральних діапазонах, якість зображень підвищується як за рахунок огляду ФЦО в більш частій ґратці просторової дискретизації, так і за рахунок об'єднання інформації з різних спектральних діапазонів. На відміну від звичайних датчиків у цьому випадку поля зору лінійних МПВ субпіксельно зміщуються один відносно одного.

На рис. 4.19 зображений випадок комплексування трьох різноспектральних зображень ($K = 3$). На цій схемі представлено три вхідні спектральнональні зображення A_1, A_2, A_3 . Відстань між сусідніми пікселями для зображень A_1, A_2, A_3 становить $d/3$. Спектральнональні зображення B_1, B_2, B_3 сформовані трьома лінійками МПВ (з M елементами кожний), миттєві поля зору яких субпіксельно зміщені на $d/3$.

Зображення D отримане шляхом комплексування зображень B_1, B_2, B_3 . Зображення F отримане в частій ґратці шляхом комплексування зображень від лінійок, що не мають субпіксельних зсувів полів зору, тобто зображень C_1, C_2, C_3 .

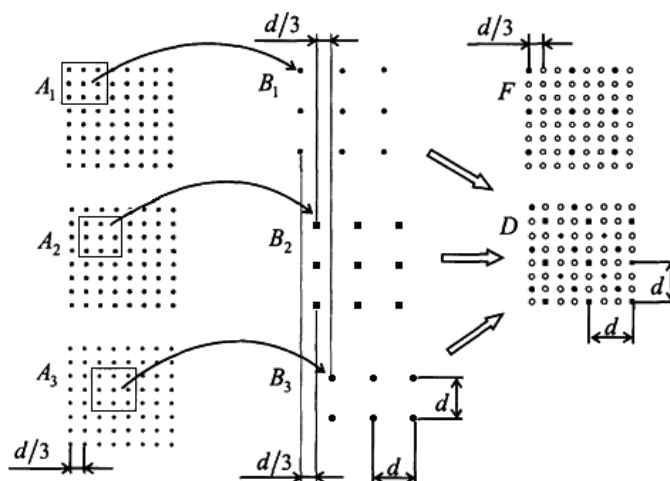
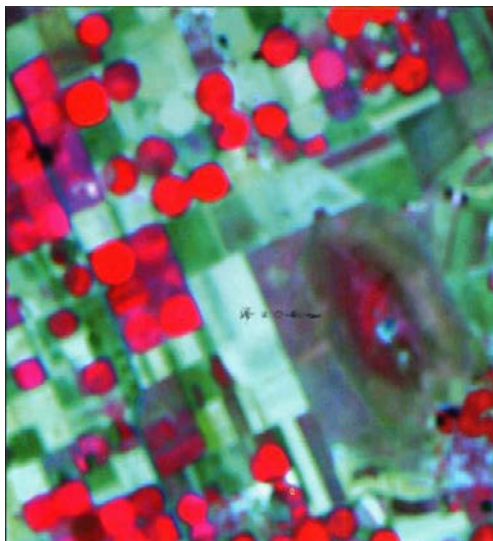
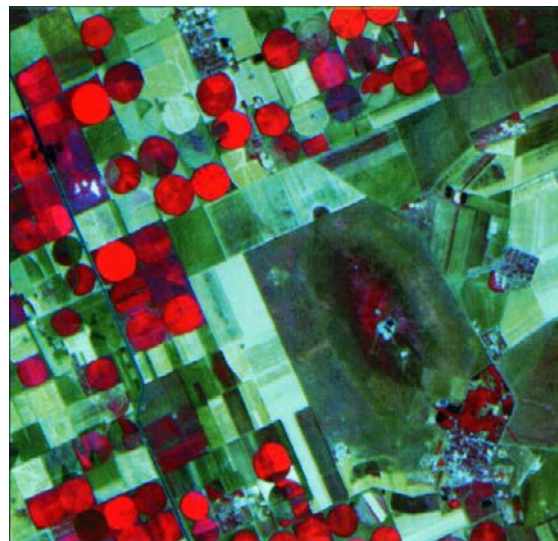


Рис. 4.19 Модель комплексування при субпіксельному зміщенні у різних спектральних каналах

На рис. 4.20 наведено приклад комплексування даних від субпіксельно зміщених ПЗЗ- лінійок, установлених в різних спектральних каналах [114].



а) зображення з однією лінійкою МПВ



б) зображення з 3-ма субпіксельно зміщеними лінійками

Рис. 4.20 Комплексування субпіксельно зміщених зображень

Очевидне підвищення просторової роздільної здатності в обробленому зображенні.

РОЗДІЛ 5

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЛЕКСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ В БК ОЕСС

Оцінка ефективності БК ОЕСС не є тривіальною задачею. Очевидно, що кінцевий результат функціонування всього інформаційного комплексу має оцінюватись ефективністю виконання оператором поточної задачі. Такий комплексний показник в повному обсязі має містити характеристики фоно-цільової обстановки, окремих каналів, які входять до складу БК ОЕСС, людини-оператора і умов її роботи, зміст поточної задачі. Варіант ієрархічної структури оцінок якості функціонування різних ланок інформаційної моделі в БК ОЕСС показаний на рис. 5.1 [115]. Дослідження кожної з перелічених складових пов'язане з вирішенням великої кількості розрахункових задач. При цьому важливо виділити пріоритетні для комплексування вихідні параметри - незалежні від конкретного оператора та ОЕСС і такі, що можуть бути змінені (задані) в ході роботи або при проектуванні ОЕСС. Тоді процес комплексування зображень полягатиме в визначенні таких величин змінних параметрів, які при відомих незалежних параметрах дозволяють досягти найкращого значення оцінки ефективності виконання поточної задачі системою «ОЕСС – оператор».

Традиційно ефективність іконічних систем визначається показниками якості зображень, які формуються в полі зору оператора. З іншого боку в багатьох галузях застосування БК ОЕСС загально вживаними є інтегральні ймовірнісні показники якості функціонування системи «ОЕСС – оператор». Крім того, існують багато варіантів оцінки безпосередньо процесу комплексування зображень. Наразі а ні перший, а ні другий, а ні третій підходи не дають прийняттого механізму оцінки всіх ланок системи «ФЦО – БК ОЕСС – оператор», який дозволив би виконувати проектування та оптимізацію каналів ОЕСС. Розглянемо вказані показники ефективності для подальшого створення розрахункових методик.

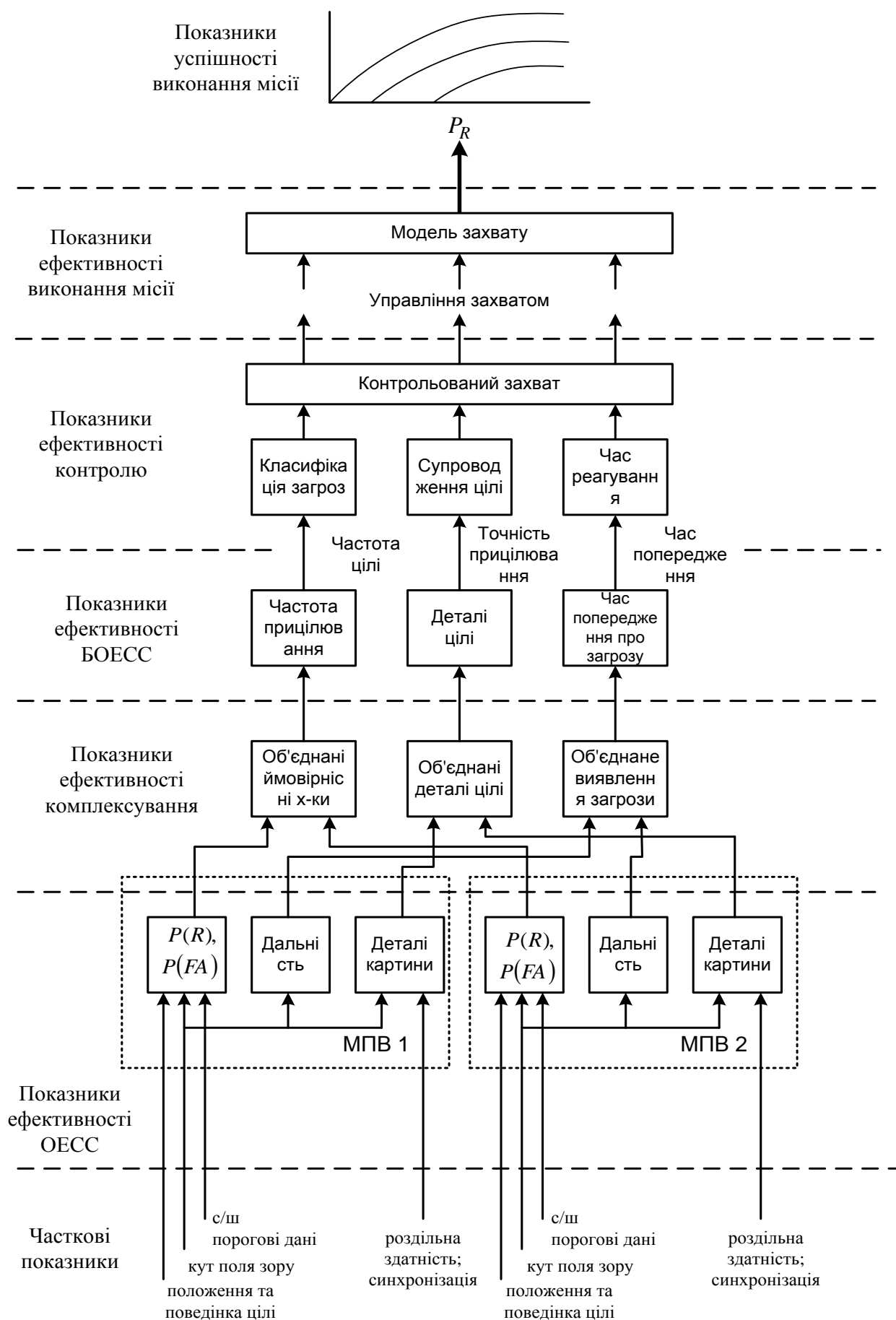


Рис. 5.1 Показники ефективності БК ОЕСС

5.1 Оцінка якості візуальних зображень

Визначення ефективності роботи БК ОЕСС як інтерфейсу між ФЦО і оператором має відбуватись за деякими споживчими критеріями, що є загально визнаними в галузі застосування конкретної системи. В цьому разі показники ефективності системи і якості зображення на виході БК ОЕСС не є тотожними. З іншого боку, з огляду на те, що всі методики проектування та оптимізації, методи обробки інформації в системі «ФЦО - атмосфера - БК ОЕСС – спостерігач» націлені на підвищення якості виконання поточної задачі, в складі якої основною є візуальна, оцінка ефективності цих методів може виконуватись в двох напрямках. В основі першого лежить аналіз самого зображення на наявність (або відсутність) релевантних ознак і їх властивостей; другий полягає в дослідженні відхилень даного зображення від деякого ідеального (референтного). Першу групу методів можна назвати повністю референтними, другу – безвідносними. Між цими двома групами є прошарок, що стосується оцінок при частковій доступності референтної інформації – звичайно в формі деяких ознак ідеального зображення.

Звичайно часто показника якісної оцінки безпосередньо зображення є недостатньо для визначення ефективності функціонування системи. В таких випадках використовуються більш узагальнені показники, в які інтегровані оцінки якості зображень.

Комплексування зображень є процесом, який призводить до спотворення вихідної візуальної інформації в кожному каналі і формує практично нове зображення. Тому оцінка ефективності комплексування може виконуватись як для традиційних зображень або як для процесу. В контексті даного проекту важливою є оцінка самого зображення. Крім того в алгоритмі оцінювання необхідно врахувати як умога більше характеристик як БК ОЕСС, так і спостерігача. Дослідженням якості зображень з урахуванням суб'єктивних факторів присвячено багато робіт [116]. Незважаючи на те, що до повного розуміння механізмів зорового сприйняття ще дуже далеко, навіть спрощені

моделі візуальної діяльності людини дозволяють отримувати більш адекватні розрахункові результати ніж об'єктивні оцінки [117 - 122].

Щодо практичного застосування методик оцінки якості, слід зазначити наявність кількох відокремлених класів оцінки – для чорно-білих (монохромних) зображень і для кольорових, динамічних (відеопослідовностей) і статичних. Досліджуються можливості створення універсальних методик оцінки, наприклад, розділення поліхроматичної інформації на кілька монохромних каналів, які можуть бути оцінені незалежно один від одного [123].

Результати комплексування частіше оцінюються за суб'єктивними критеріями [124 - 126]. В той же час безпосередньо суб'єктивні експертизи є дуже дорогими, займають багато часу і інших ресурсів, залежать від багатьох чинників, які важко формалізувати. Більш того, в таких експериментах по-суті оцінюється якість монітора. Тому на практиці частіше використовуються різні розрахункові методики, в основу яких покладені вже вивчені алгоритми функціонування зорової системи.

Існуючі методики оцінки ефективності БК ОЕСС можна приблизно розділити на ті, що є «ергономічно-орієнтованими» і «фактично-орієнтованими». В першому випадку оцінюється якість зображення як об'єкта візуального сприйняття; в другому встановлюється повнота передачі в зображенні інформації про стан ФЦО.

Нажаль багато з загальноживаних методик оцінки якості, як наприклад - середньоквадратична похибка, пікове значення сигнал/шум, не можуть бути напряму використані для БК ОЕСС внаслідок значної відмінності алгоритмів в них закладених з діяльністю зорової системи людини [127 - 128]. Значно адекватніші результати можна отримати з допомогою математичних моделей зорової системи, які також є значно складнішими. Особливо це стосується методик оцінки кольорових зображень. На практиці їх застосовується небагато [129 - 132]. Безпосереднє застосування оціночних методик чорно/білих зображень до кольорових через їх попереднє перетворення в кольорові

координати (наприклад, RGB) і подальше масштабування ваговими коефіцієнтами також далеке від дійсних процесів в системі. Адже зорова система сприймає кольори зовсім інакше і за сучасних уявлень в ній майже відсутня кореляція інформаційних каналів контрастної і кольорової складових зображень. На відміну від корельованого простору RGB, були розроблені нові взаємоортогональні кольорові координати. Наприклад, в [123] запропоновано колір визначати в некорельованих координатних осях яскравості, червоно-зеленого та жовто-голубого кольорів.

Об'єктивну оцінку часто виконують за допомогою показників двох типів:

- 1) стандартне відхилення, що використовує стандартні показники якості зображень [133];
- 2) показники, що містять інформацію як про результуюче, так і про вхідні зображення (інформаційний показник, оцінка анізотропії зображень, $Q^{AB/F}$) [134].

Стандартне відхилення

Стандартне відхилення зображення розміром $N \times M$ визначають за формулою

$$SD = \sqrt{\frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (C_f(i, j) - \bar{m})^2}, \quad (5.1)$$

де $C(i, j)$ – інтенсивність (i, j) пікселя, \bar{m} – середнє значення всіх пікселів зображення.

Інформаційний показник

Взаємна інформація міряє ступінь залежності між двома випадковими змінними A і B та описується критерієм Кульбака-Лейблера [135]:

$$I_{AB}(a, b) = \sum_{a, b} p_{AB}(a, b) \cdot \log \frac{p_{AB}(a, b)}{p_A(a) \cdot p_B(b)}, \quad (5.2)$$

де $p_{AB}(a, b)$ – спільний розподіл, а $p_A(a) \cdot p_B(b)$ – випадок повністю незалежного розподілу. Для двох вхідних зображень A і B , та результуючого зображення F кількість інформації, яка міститься в результуючому зображенні F із A :

$$I_{F,A}(f,a) = \sum_{f,a} p_{FA}(f,a) \cdot \log \frac{p_{FA}(f,a)}{p_F(f) \cdot p_A(a)}, \quad (5.3)$$

а кількість інформації, яка міститься в результуючому зображенні F із B :

$$I_{F,B}(f,b) = \sum_{f,b} p_{FB}(f,b) \cdot \log \frac{p_{FB}(f,b)}{p_F(f) \cdot p_B(b)}. \quad (5.4)$$

Інформаційний показник якості зображення визначають за формулою:

$$M_F^{AB} = \frac{I_{F,A}(f,a) + I_{F,B}(f,b)}{2}. \quad (5.5)$$

Оцінка анізотропії зображення

Даний показник оснований на визначенні ентропії Ренні [136].

Спочатку знаходять розподіл Вігнера [137] для зображення

$$W_z[n,k] = 2 \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} z[n+m] z^*[n-m] e^{-2i(2nm/N)k}, \quad (5.6)$$

де n і k – часова та частотна дискретні змінні відповідно, m – параметр зсуву (також дискретний); $z[n]$ – одномірний масив, що містить інформацію про інтенсивність N пікселів зображення в заданому напрямку. Повний розподіл Вігнера знаходять шляхом зсуву вікна розміром в N пікселів в усіх можливих напрямках по зображенню.

Після нормалізації розподіл Вігнера ототожнюють з розподілом ймовірності \tilde{P}_n і ентропію Ренні розраховують за формулою:

$$R_3[n] = -\frac{1}{2} \log_2 \left(\sum_{k=1}^N \tilde{P}_n^3[k] \right). \quad (5.7)$$

Після формалізації отримують наступний вираз для визначення ентропії Ренні:

$$\bar{R}[t, \theta_s] = \sum_n R_3[n, \theta_s] / M, \text{ де } \theta_s \in [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_S] - S \text{ орієнтацій, взятих для}$$

визначення ентропії, де M – розмір зображення.

Тоді показник якості, оснований на анізотропії зображення визначають за формулою:

$$\sigma(t) = \sqrt{\sum_{s=1}^S (\mu_t - \bar{R}(t, \theta_s))^2 / S}, \quad (5.8)$$

де μ_t – середнє значення $\bar{R}[t, \theta_s]$, $\mu_t = \sum_{s=1}^S \bar{R}(t, \theta_s) / S$.

Показник Петровіка ($Q^{AB/F}$)

Даний показник визначає яка частка інформації про контури перенесена із вхідного зображення в результуюче [138].

Оператор Собеля використовують для того, щоб отримати інформацію про інтенсивність контуру $g(n, m)$ та його напрямок $\alpha(n, m)$ для кожного пікселя вхідного та результуючого зображення

$$p(n, m), 1 \leq n \leq N \text{ і } 1 \leq m \leq M. \quad (5.9)$$

Зміни інтенсивності та напрямку $G^{AF}(n, m)$ і $A^{AF}(n, m)$ вхідного зображення A відносно результуючого F визначають за формулою:

$$G^{AF}(n, m) = \begin{cases} \frac{g_F(n, m)}{g_A(n, m)}, \\ \text{якщо } g_A(n, m) > g_F(n, m) \\ \frac{g_A(n, m)}{g_F(n, m)}, \\ \text{в інших випадках} \end{cases}, \quad (5.10)$$

$$A^{AF}(n, m) = \frac{|\alpha_A(n, m) - \alpha_F(n, m)| - \pi/2}{\pi/2}.$$

Ці величини використовують для визначення коефіцієнтів збереження інформації про інтенсивність та напрям контуру:

$$Q_g^{AF}(n, m) = \frac{\Gamma_g}{1 + e^{K_g(G^{AF}(n, m) - \sigma_g)}}, \quad (5.11)$$

$$Q_\alpha^{AF}(n, m) = \frac{\Gamma_\alpha}{1 + e^{K_\alpha(A^{AF}(n, m) - \sigma_\alpha)}}.$$

Константи $\Gamma_g, k_g, \sigma_g, \Gamma_\alpha, k_\alpha, \sigma_\alpha$ визначають точну форму сігма-функції, що використовується для визначення інтенсивності та напрямку контурів.

Тоді загальний коефіцієнт збереження інформації про контур:

$$Q^{AF}(n, m) = Q_g^{AF}(n, m)Q_\alpha^{AF}(n, m),$$

$$0 \leq Q^{AF}(n, m) \leq 1.$$
(5.12)

Показник якості розраховуємо за формулою:

$$Q^{AB/F} = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M Q^{AF}(n, m)w^A(n, m) + Q^{BF}(n, m)w^B(n, m)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (w^A(i, j) + w^B(i, j))},$$
(5.13)

де $w^A(i, j)$ і $w^B(i, j)$ – вагові коефіцієнти.

$w^A(i, j) = [g_A(n, m)]^L$, $w^B(i, j) = [g_B(n, m)]^L$, де L – константа.

Серед повністю референтних оцінок якості найпростішою і широковживаною є середньоквадратична похибка, яка обчислюється усередненням квадратів попиксельної різниці яскравостей поточного і референтного зображень з врахуванням пікового відношення сигнал/шум. При безпосередньому прямому застосуванні такі алгоритми погано моделюють суб'єктивне сприйняття зображення [139 - 140]. Однак не зважаючи на це відносна простота базового алгоритму, його зрозумілість і інтерпретабельність викликали велику кількість розробок, що більш адекватно моделюють зорову діяльність.

Кінцеве зображення завжди можна подати в вигляді суми функції деякого ідеального (за його реальної наявності – референтного) зображення і сигналу похибки. Тоді погіршення суб'єктивної якості можна пов'язати з видимістю сигналу похибки. Найпростішим шляхом реалізації подібної концепції було б застосування середньоквадратичної похибки, яка якраз є ефективним показником сигналу похибки. Але на практиці це спрощення не є допустимим – різні зображення з однаковими середньоквадратичними похибками скоріш за все матимуть дуже різну суб'єктивну якість. Крім того такі характеристики добре працюють в основному з адитивними шумами. Тому в показниках якості зображень зазвичай враховуються різні аспекти психофізіології зорової діяльності [141 - 143].

Більшість моделей референтної оцінки якості зображень мають структуру, подібну до тої, що зображена на рис. 5.2.

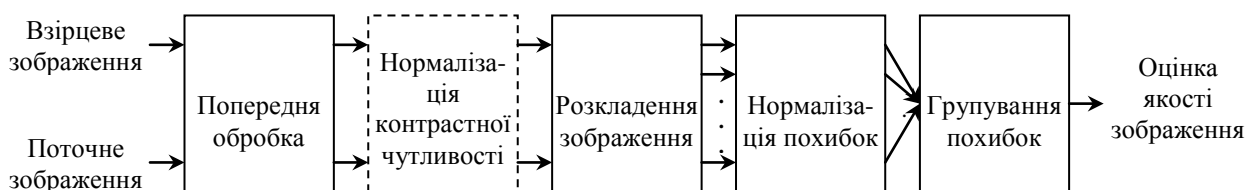


Рис. 5.2 Типова структура моделі оцінки зображень в системі «БК ОЕСС – оператор»

На етапі попередньої обробки виконуються базові операції врахування можливих відхилень в порівнюваних зображеннях: геометрична корекція, фотограмметрична корекція, трансформування в простір кольорів, який більш адекватно моделює зорову діяльність. Можливі також низькочастотне фільтрування або нелінійні перетворення для врахування МПФ та механізму світлової адаптації зорової системи. На другому етапі можливе врахування функції контрастної чутливості зору шляхом відповідної нормалізації. Наступним етапом є розкладення зображення в частотних, часових координатах тощо (вважається, що подібні процеси відбуваються і в мозку людини [144 - 145]). Для цього застосовується широкий спектр інструментарію – від відносно простого дискретного косинус-перетворення [146] до вейвлет-перетворень [147] і нейромереж [148]. Необхідність нормалізації похибок обумовлена тим, що після підрахунку різниці між поточним сигналом в даному каналі і референтним сигналом подальше комплексування спричинить маскуванню одних інформаційних полів іншими. Тому виходячи з моделі формування зображення в системі потрібно відповідним чином підкреслити або послабити деякі з цих полів. В основі алгоритму нормалізації лежить т.зв. матриця граничної видимості [149]. Вона розраховується в кожній точці за середньою чутливістю каналу та за розподілом просторових коефіцієнтів інтенсивності найближчого оточення в даному каналі або з врахуванням інших каналів.

Процес нормалізації має привести розраховані величини похибок до порогових одиниць (найменш помітних різниць). Групування помилок виконується на останньому етапі оцінки якості. Цей процес полягає в інтегруванні нормалізованих похибок по всьому зображенню та з усіх каналів для отримання єдиної оцінки. Більшість методик використовують такий алгоритм групування:

$$E(\{e_{l,k}\}) = \left(\sum_l \sum_k |e_{l,k}|^\beta \right)^{1/\beta}, \quad (5.14)$$

де $e_{l,k}$ – похибка k -го коефіцієнту в l -му каналі; β – коефіцієнт в діапазоні (1 - 4).

Для оцінки якості комплексування в типових БК ОЕСС доцільно дослідити процес виявлення об'єкта (як ймовірність, так і час виявлення), а також суб'єктивну якість відносно ідеального зображення.

Після попереднього обрахування похибок комплексування референтним методом [210] можна визначити відстань між парою зображень в заданому просторі ознак. Одна з найпростіших оцінок відмінностей між парою чорно-білих зображень полягає в попільсьельному порівнянні

$$Q = |P(I_0) - P(I_1)|^2 = \sum_x \sum_y (p_{0,x,y} - p_{1,x,y})^2, \quad (5.15)$$

де $i_1(x;y)$, $i_2(x;y)$ – значення інтенсивності в кожному з зображень в точках з координатою $(x;y)$.

В більшості випадків показник суб'єктивної якості вказує на скільки спостерігач буде менш задоволений зображенням на екрані БК ОЕСС порівняно з ідеальним зображенням. Іноді (особливо при оцінці якості кодування) визначається показник видимості похибок зображень [150].

В залежності від виду інформації, яка є вхідною для аналізу методики оцінки якості зображень можна розділити за змістом на шість груп:

- різниці піксельного рівня;
- кореляційні піксельного рівня;
- крайові методики;
- за неузгодженням просторово-частотних характеристик;

- семантичні (контекстно-базовані);
- базовані на різних моделях зорової системи спостерігача.

Деякі з цих методик наведені в табл. 5.1 [151]. В таблиці використані такі позначення:

$C_k(i, j)$ – зображення (i, j) -го пікселя k -го каналу БК ОЕСС;

$C(i, j)$ - (i, j) -й піксельний вектор з K каналами;

C – мультиспектральне зображення;

C_k – k -й канал мультиспектрального зображення C ;

$\varepsilon_k = C_k - \hat{C}_k$ - сумарна похибка по всім пікселям – k -го каналу зображення C .

Різницеві показники піксельного рівня.

До цієї групи відносяться перші шість показників з таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 Показники якості

Середньоквадратична похибка	$Q_0 = \frac{1}{K} \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=0}^{N-1} \ C(i, j) - \hat{C}(i, j)\ ^2$
Абсолютна середня похибка	$Q_1 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \ \varepsilon_k\ ^2$
Модифікована нескінченна норма	$Q_2 = \sqrt{\frac{1}{r} \sum_{m=1}^r \Delta_m^2 (C - \hat{C})}$
Похибка сприйняття	$Q_3 = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=0}^{N-1} [\Delta L^*(i, j)^2 + \Delta a^*(i, j)^2 + \Delta b^*(i, j)^2]$
Похибка найближчого оточення	$Q_4 = \sqrt{\frac{1}{2(N-w)^2} \sum_{i,j=w/2}^{N-w/2} \left(\min_{l,m \in w_{i,j}} \{d[C(i, j), \hat{C}(l, m)]\}^2 + \min_{l,m \in w_{i,j}} \{d[C(i, j), \hat{C}(l, m)]\}^2 \right)}$
Похибка змінного розділення	$Q_5 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^R d_r^k$
Структурний зміст	$Q_6 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{\sum_{i,j=0}^{N-1} C_k(i, j)^2}{\sum_{i,j=0}^{N-1} \hat{C}_k(i, j)^2}$
Нормалізована кроскореляція	$Q_7 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{\sum_{i,j=0}^{N-1} C_k(i, j) \hat{C}_k(i, j)}{\sum_{i,j=0}^{N-1} C_k(i, j)^2}$

Кореляція Ценаковського	$Q_8 = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=0}^{N-1} \left(1 - \frac{2 \sum_{k=1}^K \min[C_k(i,j), \hat{C}_k(i,j)]}{\sum_{k=1}^K [C_k(i,j) + \hat{C}_k(i,j)]} \right)$
Середня кутова подібність	$Q_9 = \mu_\chi = 1 - \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \left(\frac{2}{\pi} \cos^{-1} \frac{\langle C_k(i,j), \hat{C}_k(i,j) \rangle}{\ C_k(i,j)\ \ \hat{C}_k(i,j)\ } \right)$
Середня амплітудно- кутова подібність	$Q_{10} = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \chi_{ij}$
Крайовий показник Претта	$Q_{11} = \frac{1}{\max\{n_d, n_t\}} \sum_{i=1}^{n_d} \frac{1}{1 + ad_i^2}$
Показник крайової зв'язності	$Q_{12} = \frac{1}{n_d} \sum_{i,j=0}^{n_d} [Q(i,j) - \hat{Q}(i,j)]^2$
Спектральна фазова похибка	$Q_{13} = \frac{1}{N^2} \left(\sum_{u,v=0}^{N-1} M(u,v) - \hat{M}(u,v) ^2 \right)$
Спектральна амплітудно-фазова похибка	$Q_{14} = \frac{1}{N^2} \sum_{u,v=0}^{N-1} \varphi(u,v) - \hat{\varphi}(u,v) ^2$ $Q_{15} = \frac{1}{N^2} \left(\lambda \sum_{u,v=0}^{N-1} \varphi(u,v) - \hat{\varphi}(u,v) ^2 + (1-\lambda) \sum_{u,v=0}^{N-1} M(u,v) - \hat{M}(u,v) ^2 \right)$
Блокова спектральна амплітудна похибка	$Q_{16} = \text{median}_l J'_m$
Блокова спектральна фазова похибка	$Q_{17} = \text{median}_l J'_\phi$
Блокова спектральна фазово-амплітудна похибка	$Q_{18} = \text{median}_l J'$
Відстань Хелінгера	$Q_{19} = \frac{1}{2} \int (\sqrt{\hat{p}} - \sqrt{p})^2 d\lambda$
Узагальнена відстань Матусіти	$Q_{20} = \sqrt{\int p^{1/r} - \hat{p}^{1/r} ^r d\lambda}$
Рангова кореляція	$Q_{21} = \sum_{u=1}^b \max_{k=1,\dots,K} \{SRC_u^k\}$
Абсолютна норма зорової моделі	$Q_{22} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{\sum_{i,j=0}^{N-1} U\{C_k(i,j)\} - U\{\hat{C}_k(i,j)\} }{\sum_{i,j=0}^{N-1} U\{C_k(i,j)\} }$
Норма зорової моделі L2	$Q_{23} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left[\frac{1}{N^2} \sum_{i,j=0}^{N-1} U\{C_k(i,j)\} - U\{\hat{C}_k(i,j)\} ^2 \right]^{1/2}$
Подібність перегляду	$Q_{24} = \sum_{i=1}^n \omega_i d_i$

Середньоквадратична похибка (форм. 5.16) обраховується як середнє значення Мінковського для просторових різниць пікселів в усіх спектральних каналах. Можна також спочатку обрахувати середнє Мінковського для пікселів між спектральними каналами, а вже потім знайти просторові різниці:

$$\varepsilon = \frac{1}{K} \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=0}^{N-1} \|C(i, j) - \hat{C}(i, j)\|^{1/\gamma}. \quad (5.16)$$

Якщо в рівнянні (5.16) $\gamma=1/2$, то одержимо добре відомий показник абсолютної середньої похибки (5.17):

$$Q_1 = \frac{1}{K} \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=0}^{N-1} \|C(i, j) - \hat{C}(i, j)\|^2. \quad (5.17)$$

Поділивши середній сигнал на середню похибку, одержимо відношення сигнал/шум. Ця характеристика дуже часто використовується при оцінці якості БК ОЕСС, в тому числі - зображуючих систем, але вона не завжди адекватно оцінює реальну якість. І нарешті, якщо знайти максимальні середні різниці Мінковського, ранжирувати їх по величині і обчислити суму, одержимо показник якості, який можна назвати модифікованою нескінченною нормою:

$$Q_2 = \sqrt{\frac{1}{r} \sum_{m=1}^r \Delta_m^2 (C - \hat{C})}. \quad (5.18)$$

Вимірювання ступеня суб'єктивної схожості двох кольорових зображень мають бути такими, щоб координатний простір кольорів не впливав на результат. Координати RGB не відповідають цим умовам і тому Міжнародною комісією по освітленню були розроблені два кольорових координатних простори - L_{uv} і L_{ab} [152]. Якщо, наприклад, задати в кольоровому просторі L_{ab} різницю між двома зображеннями по кожній з компонент як

$$\Delta L^*(i, j) = L^*(i, j) - \hat{L}^*(i, j), \Delta a^*(i, j) = a^*(i, j) - \hat{a}^*(i, j),$$

$\Delta b^*(i, j) = b^*(i, j) - \hat{b}^*(i, j)$, то в прямокутній системі координат одержимо похибку сприйняття кольорового зображення [153] Q_3 (табл. 5.1). Така оцінка є

справедливою для реальних кольорових зображень видимої області спектру і не може використовуватись як узагальнена для багатоспектральних БК ОЕСС (таких як аерокосмічні, наприклад).

На рівні чутників різниця (спотворення) у зображеннях можуть виникати у рівнях сірого та в просторових координатах. Для оцінки обох цих аспектів використовується похибка найближчого оточення:

$$Q_4 = \sqrt{\frac{1}{2(N-w)^2} \sum_{i,j=w/2}^{N-w/2} \left(\min_{l,m \in w_{i,j}} \{d[C(i,j), \hat{C}(l,m)]\} \right)^2 + \left(\min_{l,m \in w_{i,j}} \{d[C(i,j), \hat{C}(l,m)]\} \right)^2}. \quad (5.19)$$

Цей показник для кожного заданого пікселя $C(i, j)$ вибирає найбільш схожий піксель з деякої околиці (області) порівнюваного зображення $\hat{C}_w(i, j)$. Для зменшення часу розрахунку розмір околиці як правило є невеликим (3x3 – 5x5), а її форма – квадратною або хрестоподібною.

Одним з недоліків стандартних об'єктивних різницевого показників якості є необхідність виконання обчислень з кожним пікселем зображення. Для врахування механізмів зорового сприйняття можна ввести вагові коефіцієнти для елементів різного просторового розділення. Якщо визначати просторове розділення цілими числами починаючи з одиниці, то зображенню з найменшим просторовим розділенням (визначається одиницею) відповідатиме один блок розміром у весь кадр з рівнем сірого g_1 . Наступному просторовому розділенню (визначається двійкою) відповідатиме чотири блоки розміром $(m/2)*(n/2)$ з рівнями сірого від g_1 до g_4 і так далі. Тоді усереднене значення різниці рівнів сірого для просторового розділення ρ матиме ваговий коефіцієнт $1/2^\rho$, а відповідне викривлення зображення визначається формулою:

$$d_r = \frac{1}{2^{2r-2}} \sum_{i,j=1}^{2^{r-1}} |g_{i,j} - \hat{g}_{i,j}|, \quad (5.20)$$

де 2^{r-1} – кількість блоків вздовж стовбців та рядків МПВ (по індексах i та j).

Для розширення цієї оцінки на зображення багатоканальних БК ОЕСС можна просто знайти суму всіх різниць по кожному спектральному каналу:

$$Q_5 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^R d_r^k, \quad (5.21)$$

де d_r^k - похибка змінного розділення в k -му спектральному каналі.

Кореляційні показники піксельного рівня. Очевидною мірою подібності двох зображень є показник їх кореляції серед часто вживаних показників:

- структурний зміст

$$Q_6 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{\sum_{i,j=0}^{N-1} C_k(i,j)^2}{\sum_{i,j=0}^{N-1} \hat{C}_k(i,j)^2}; \quad (5.22)$$

- нормалізована кроскореляція

$$Q_7 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{\sum_{i,j=0}^{N-1} C_k(i,j) \hat{C}_k(i,j)}{\sum_{i,j=0}^{N-1} C_k(i,j)^2}; \quad (5.23)$$

кореляція Ценаковського (інша назва – відсоток подібності [154]) – цей показник є досить ефективним для оцінки кольорових зображень:

$$Q_8 = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=0}^{N-1} \left(1 - \frac{2 \sum_{k=1}^K \min[C_k(i,j), \hat{C}_k(i,j)]}{\sum_{k=1}^K [C_k(i,j) + \hat{C}_k(i,j)]} \right). \quad (5.24)$$

Очевидно, що зменшенні відмінності між двома зображеннями $\varepsilon = C - \hat{C} \rightarrow 0$ будь-який з кореляційних показників наближається до одиниці, а при $\varepsilon^2 \rightarrow G^2$, будь-який з них наближається до нуля.

Іншим підходом до формування кореляційних показників є оцінка статистики кутів між векторами в точках референтного та поточного зображень в деякому просторі ознак. Показниками в цьому разі можуть бути спектральних векторних різниць, наприклад, середня кутова подібність [154]

$$Q_9 = \mu_\chi = 1 - \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \left(\frac{2}{\pi} \cos^{-1} \frac{\langle C_k(i,j), \hat{C}_k(i,j) \rangle}{\|C_k(i,j)\| \|\hat{C}_k(i,j)\|} \right), \quad (5.25)$$

або середня амплітудно-кутова подібність [215]

$$Q_{10} = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \chi_{ij}, \quad (5.26)$$

$$\text{де } \chi_{ij} = 1 - \left[1 - \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \frac{\langle C_k(i,j), \hat{C}_k(i,j) \rangle}{\|C_k(i,j)\| \|\hat{C}_k(i,j)\|} \right] \cdot \left[1 - \frac{\langle C_k(i,j), \hat{C}_k(i,j) \rangle}{\sqrt{3 \cdot 255^2}} \right].$$

Тут введений множник $2/\pi$ для нормалізації з врахуванням, що всі вектори зображень є додатними і максимальне значення в першому квадранті декартових координат дорівнює $\pi/2$.

Крайові методика. Загальновизнаним є факт, що контури містять найбільш цінну інформацію для розпізнавання зображення не тільки людиною-оператором, але й автоматичними системами. Для оцінки якості зображення або порівняння двох зображень можна використати усереднену по площі різницю градієнтів в вертикальному та горизонтальному напрямках в кожному каналі БК ОЕСС. Інший підхід запропоновано в т зв. «крайовому показнику Претта» [155]. Тут обраховуються як точність позиціювання контурів, так і їх відсутність або наявність зайвих контурів. Для порівняння необхідно мати вірцеву карту контурів (бажано товщиною в один піксел). Показник якості в цьому випадку матиме вигляд:

$$Q_{11} = \frac{1}{\max\{n_d, n_t\}} \sum_{i=1}^{n_d} \frac{1}{1 + ad_i^2}, \quad (5.27)$$

де n_d та n_t – відповідно номери контурних точок поточного та референтного зображень; d_i – відстань від поточної i -ї точки до контуру.

Множник $\max\{n_d, n_t\}$ враховує пропущені або надлишкові контури, а сума – можливі похибки в позиціюванні контурів.

Показники крайової зв'язаності [156] визначають ступінь нерозривності контурів при різних масштабах зображення. Для їх визначення також

використовуються референтні карти контурів. Середньоквадратичну похибку крайової зв'язності в одному каналі можна визначити як нормалізовану суму

$$Q_{12} = \frac{1}{n_d} \sum_{i,j=0}^{n_d} [Q(i,j) - \hat{Q}(i,j)]^2, \quad (5.28)$$

де $Q(i,j)$, $\hat{Q}(i,j)$ - відповідно зв'язаність контурів в референтному та поточному зображеннях; n_d - кількість пікселів в повному кадрі.

Для багатоканальної системи похибка визначається усередненням.

Оцінки за *неузгодженістю просторово-частотних характеристик* обчислюються з допомогою перетворення Фур'є. Можна визначити як амплітудно-частотну похибку:

$$Q_{13} = \frac{1}{N^2} \left(\sum_{u,v=0}^{N-1} |M(u,v) - \hat{M}(u,v)|^2 \right), \quad (5.29)$$

так і фазово-частотну похибку:

$$Q_{14} = \frac{1}{N^2} \sum_{u,v=0}^{N-1} |\varphi(u,v) - \hat{\varphi}(u,v)|^2, \quad (5.30)$$

або ж сумарну амплітудно-фазову похибку:

$$Q_{15} = \frac{1}{N^2} \left(\lambda \sum_{u,v=0}^{N-1} |\varphi(u,v) - \hat{\varphi}(u,v)|^2 + (1 - \lambda) \sum_{u,v=0}^{N-1} |M(u,v) - \hat{M}(u,v)|^2 \right), \quad (5.31)$$

де $M(u,v)$, $\hat{M}(u,v)$ - амплітудні спектри референтного та поточного зображень; $\varphi(u,v)$, $\hat{\varphi}(u,v)$ - фазові спектри референтного та поточного зображень; λ - масштабний коефіцієнт, який забезпечує співрозмірність спектрів.

Для прискорення розрахунків застосовують також розділення кадру зображення на блоки, які можуть перекриватись або ж ні. Тоді спектральні похибки розраховуються окремо для кожного блоку. Сумарна похибка в

зображенні може обчислюватись різними методами, наприклад, методом медіани:

$$Q_{16} = \text{median}_l J_m^l, Q_{17} = \text{median}_l J_\phi^l, Q_{18} = \text{median}_l J^l, \quad (5.32)$$

де J_m^l , J_ϕ^l , J^l відповідно амплітудна, фазова та амплітудно-фазова похибка у l -му блоці зображення.

Семантичні (контекстно-базовані) показники якості, по-суті, оцінюють стан зображення в деякій околиці. Якщо для кожної точки зображення одержана функція ймовірносної міри, то можна обчислити т.зв. «відстань Хелінгера» [157]

$$Q_{19} = \frac{1}{2} \int (\sqrt{\hat{p}} - \sqrt{p})^2 d\lambda, \quad (5.33)$$

де \hat{p} , p – відповідно функція ймовірносної міри поточного та референтного зображень;

або ж узагальнену відстань Матусіти

$$Q_{20} = \sqrt{\int |p^{1/r} - \hat{p}^{1/r}|^r d\lambda}, \quad (5.34)$$

де показник r обирається експериментально (і дорівнює приблизно (3 – 5)).

В даному випадку найбільші складності виникають внаслідок дуже великих обсягів обчислень імовірнісних функцій.

Інший показник якості цієї групи обчислюється як сумарна рангова кореляція Спіермена для i блоків зображення в k спектральних каналах:

$$Q_{21} = \sum_{u=1}^b \max_{k=1, \dots, K} \{SRC_u^k\}. \quad (5.35)$$

Звичайно для БК ОЕСС важливим є оцінка зображень і методик комплексування в контексті зорового сприйняття інформації. Для цього

використовуються показники, що базовані на різних моделях зорової системи спостерігача. Такі показники значно спрощують реальні інформаційні процеси, але в деяких випадках є досить ефективними. Абсолютний нормалізований показник якості в K -му спектральному каналі з врахуванням зорової моделі має вигляд [116]:

$$Q_{22} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{\sum_{i,j=0}^{N-1} |U\{C_k(i,j)\} - U\{\hat{C}_k(i,j)\}|}{\sum_{i,j=0}^{N-1} |U\{C_k(i,j)\}|}, \quad (5.36)$$

де $U\{\bullet\}$ - оператор дискретного косинусного перетворення;

або ж:

$$Q_{23} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left[\frac{1}{N^2} \sum_{i,j=0}^{N-1} |U\{C_k(i,j)\} - U\{\hat{C}_k(i,j)\}|^2 \right]^{1/2}. \quad (5.37)$$

В розділі 1 описувалась багатоканальна модель зорового сприйняття. Відповідна оцінка якості, що враховує релевантність кольору, контрасту, просторової орієнтації тощо, може бути отримана як суперпозиція відповідних оцінок:

$$Q_{24} = \sum_{i=1}^n \omega_i d_i, \quad (5.38)$$

де ω_i – ваговий коефіцієнт i -ї релевантної ознаки; d_i - i -а релевантна ознака.

Релевантна ознака може бути обчислена у різні способи, наприклад, як попиксельна середньоквадратична похибка.

Наприклад, в [158] використаний векторний простір з 102 ознаками (тобто $n=102$) при різних масштабах та орієнтації як кольорової компоненти, так і яскравості.

Деякі з показників якості створені для вирішення вузьких задач, наприклад, псевдокольорового кодування, стиснення сигналу. В задачах оцінки якості комплексованих зображень такі показники не є прийнятними. Для цього потрібні методики, які дозволяють оцінювати всі типи перетворень або спотворень сигналу. Наприклад, в [159] запропонований алгоритм оцінювання чорно/білих зображень з будь-якими викривленнями. В основі алгоритму лежить обчислення трьох показників – втрати кореляції, зміни яскравості та зміни контрасту кінцевого зображення відносно вихідного:

$$Q = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \frac{2\bar{x}\bar{y}}{(\bar{x})^2 + (\bar{y})^2} \frac{2\sigma_x \sigma_y}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}, \quad (5.39)$$

$$\text{де } \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i; \quad \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i; \quad \sigma_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2; \quad \sigma_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$$

$$; \quad \sigma_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}); \quad x = x(m,n), \quad y = y(m,n) - \text{відповідно дискретні}$$

вхідний та вихідний сигнали; \bar{x}, \bar{y} - середні значення яскравості вхідного та вихідного сигналів.

Показник якості змінюється від -1 при $y_{m,n} = 2\bar{x} - x_{m,n}$ для всіх m,n до максимального значення $+1$ при $y_{m,n} = x_{m,n}$, тобто при повністю ідентичних зображеннях. Перший множник формули (5.39) оцінює ступінь лінійної корельованості між сигналами і досягає максимуму ($+1$) при умові $y_{m,n} = a \cdot x_{m,n} + b$. При цьому звичайно між сигналами можуть бути відмінності, які враховуються другим і третім множниками. Другий множник показує різницю між двома значеннями середньої яскравості, а третій – між значеннями середнього контрасту. Обидва множники змінюються від 0 до $+1$ і набувають максимальних значень при однакових показниках сигналів.

Такий спрощений підхід, нажаль, рідко можна застосувати до реальних зображень, в яких викривлення сигналу не є однаковими по площі. Тому доцільно вимірювати показники якості для окремих ділянок зображення, а потім їх комбінувати. Наприклад, це можна зробити шляхом застосування

ковзаючого вікна. Вибравши певний розмір вікна (очевидно вікно має бути квадратним) будемо обчислювати показник якості (5.39) в цьому розмірі для кожного положення по горизонталі та по вертикалі. В залежності від розміру вікна $a*b$ і розмірності МПВ $M*N$ при попіксельному зміщенні вікна одержимо $[(M - a) + 1] \cdot [(N - b) + 1]$ вимірів показника Q . Тоді узагальнений по всьому зображенню показник дорівнюватиме:

$$Q = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M Q_j. \quad (5.40)$$

Для розширення цього алгоритму на оцінку кольорових зображень згадаємо гіпотезу (див. розділ 1) про каналне зорове сприйняття, коли інформація обробляється незалежно в каналі яскравості і двох різницево-кольорових каналах. Як вже згадувалось, хроматична інформація сприймається трьома типами колбочок як різницевий сигнал для зменшення надлишкової інформації шляхом декореляцій сигналів. Отже вважаючи один ахроматичний і два різницево-кольорові канали незалежними [160] можна обчислити показник якості кольорового зображення як

$$Q_{кол} = \sqrt{w_l(Q_l)^2 + w_\alpha(Q_\alpha)^2 + w_\beta(Q_\beta)^2}, \quad (5.41)$$

де Q_l – показник якості для поля яскравості; Q_α , Q_β – показники якості полів різницевих кольорів, наприклад, червоний-зелений, жовтий-голубий; w_i – відповідні вагові коефіцієнти, що враховують значимість ознаки для зорового сприйняття.

Незважаючи на відмічені раніше недоліки й обмеження, для оцінки комплексованих зображень дуже корисними є різні модифікації середньоквадратичної похибки відхилення від референтного зображення:

$$Q_{компл} = \left(\frac{1}{MN} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (x_R(n, m) - x_F(n, m))^2 \right)^{1/2}, \quad (5.42)$$

де x_R – взірцеве референтне зображення; x_F - комплексоване зображення; M, N – розмір кадру зображення.

На засадах статистичної теорії побудований показник взаємної інформації [161], який дозволяє досить ефективно оцінити зміни в комплексованому зображенні x_F відносно деякого ідеального x_R :

$$I(x_R, x_F) = \sum_{n=1}^L \sum_{m=1}^L \left(h_{R,F}(n, m) \log_2 \frac{h_{R,F}(n, m)}{h_R(n)h_F(m)} \right), \quad (5.43)$$

де h_R, h_F – нормалізовані гістограми яскравості відповідно зображень x_R та x_F ; $h_{R,F}$ - об'єднана гістограма зображень; L – кількість пікселів БК ОЕСС.

За відсутності референтного зображення для оцінки якості комплексування необхідно залучати додаткові моделі, наприклад, модель зорової системи спостерігача. В цьому випадку якість асоціюється з релевантними ознаками зображення – в основному – з контурною інформацією [162]. На нинішньому етапі питання розробки нереперентних методів оцінки якості комплексування має небагато відповідей та потребує значних досліджень. Більшість методів є низькорівневими, тобто реалізовані на піксельному рівні.

Суб'єктивні експертизи засвідчують, що при виконанні задачі пошуку об'єкту з допомогою двоканальної БК ОЕСС найменш ефективним є методи комплексування з підсиленням контурів, трохи кращі результати дає метод головних компонент. Помітно підвищує якість зображення псевдокольорове кодування та складання зображень. Останній з перерахованих методів є до того ж найпростішим.

5.2 Нові методи оцінки ефективності роботи системи «ФЦО – БК ОЕСС – спостерігач»

Більш комплексно ефективність окремих каналів БК ОЕСС зазвичай оцінюють за допомогою такої «споживчої» характеристики як ймовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації. Ефективність комплексування в свою чергу оцінюють за допомогою відповідних показників якості

комплексованого зображення. Ці два процеси здійснюються абсолютно незалежно та без прив'язки один до одного. Але безперечним є той факт, що комплексування інформації різних каналів БК ОЕСС буде впливати на ефективність всієї системи. Тому доцільно розробити методику, яка давала б змогу об'єднати показники якості комплексованого зображення з показниками ефективності окремих каналів БК ОЕСС для того, щоб оцінити ефективність всієї системи при комплексуванні інформації різних каналів. В основі такої методики має бути показник, який враховує як процеси формування зображень в окремих каналах, так і особливості комплексування інформації та зорового сприйняття зображення оператором. За основу такого показника доцільно взяти один з найбільш адекватних на сьогодні – показник успішності виконання завдання.

Показник успішності виконання завдання є середнім геометричним горизонтальної ($TPRH$) та вертикальної ($TPRV$) складових:

$$TPR = \sqrt{TPRH \cdot TPRV}, \quad (5.44)$$

Кожна складова є інтегралом відношення сигналу до функції порогового контрасту (ФПК) системи в діапазоні всіх просторових частот $[f_H, f_B]$, де ФПК не перевищує сигнал [163]:

$$TPRH = \int_{f_{xH}}^{f_{xB}} \left(\frac{C_R}{\Phi_{ПКГ}_{OEC}(f_x)} \right)^{1/2} df_x, \quad (5.45)$$

$$TPRV = \int_{f_{yH}}^{f_{yB}} \left(\frac{C_R}{\Phi_{ПКВ}_{OEC}(f_y)} \right)^{1/2} df_y, \quad (5.46)$$

де f_x – горизонтальна просторова частота в мрад^{-1} , f_y – вертикальна просторова частота в мрад^{-1} , $\Phi_{ПКГ}_{OEC}(f_x)$, $\Phi_{ПКВ}_{OEC}(f_y)$ – горизонтальна та вертикальна складові ФПК системи відповідно, C_R – сигнал від об'єкта.

Графічно розрахунок показника успішності виконання завдання для ТПВ каналу показано на рис. 5.3.

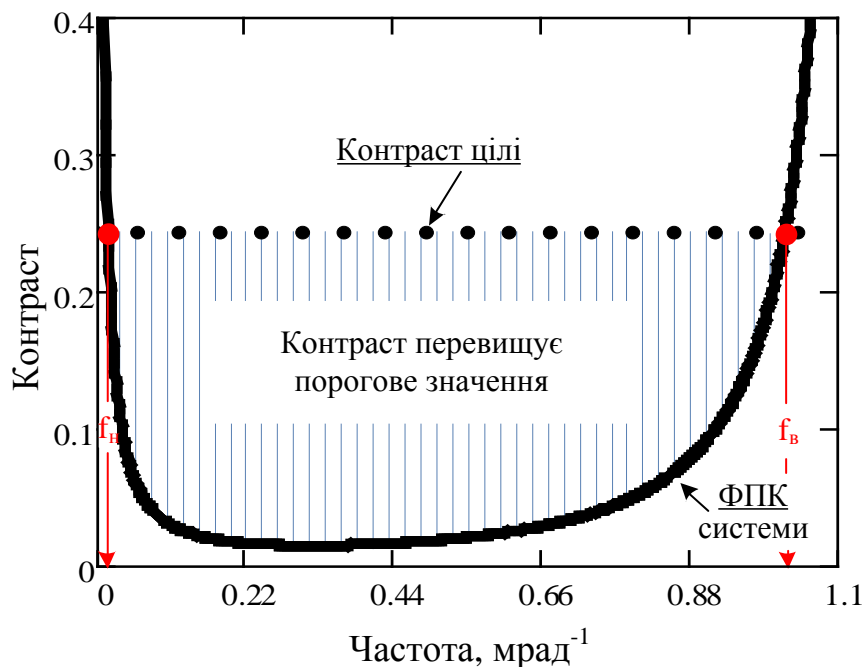


Рис. 5.3 Розрахунок показника успішності виконання завдання

В формулах (5.45) та (5.46) функція C_R описує контраст цілі на дисплеї, тобто враховує особливості ФЦО після проходження зовнішнього середовища (атмосфери). ФПК системи $\Phi_{ПК}_{OEC}(f_x, f_y)$ враховує параметри і характеристики ОЕСС через МПФ ОС, МПВ, електронного тракту та дисплея; рух та вібрації платформи через відповідні МПФ; особливості зорової системи спостерігача через ФПК і МПФ ока; а також вплив шуму.

Для одномірної моделі БК ОЕСС показник успішності виконання можна визначати наступним чином [164]:

$$TTP_{\kappa} = \sum_l (TTP_{1,l} \cdot r_{1,l} + TTP_{2,l} \cdot r_{2,l} + \dots + TTP_{k,l} \cdot r_{k,l}), \quad (5.47)$$

де $TPR_{k,l}$ – показник успішності виконання завдання k -го зображення l -тої октави; $r_{k,l}$ – кореляція Пірсона між комплексованим та k -им зображенням.

Кореляцію Пірсона між комплексованим зображенням та вхідними розраховуємо за формулою [165]:

$$r_{k,l} = \frac{\sum_m \sum_n (F_{k,l} - \overline{F_{k,l}})(S_{k,l} - \overline{S_{k,l}})}{\sqrt{\sum_m \sum_n (F_{k,l} - \overline{F_{k,l}})^2 \sum_m \sum_n (S_{k,l} - \overline{S_{k,l}})^2}}, \quad (5.48)$$

де $F_{k,l}$ – матриця значень яскравості комплексованого зображення в l -тій октаві просторової частоти; $S_{k,l}$ – матриця значень яскравості k -го вхідного зображення в l -тій октаві просторової частоти; $\overline{S_{k,l}}$ – усереднене значення яскравості зображення в октаві.

ФПК системи при наявності шумів дисплея можна визначити наступним чином [6]:

$$\Phi PK_{OEC}(f_x) = \frac{\Phi PK_{ока}(f_e)}{M\Phi_{\delta}(f_x)M_{OC}(f_x)M_{МПВ}(f_x)} \left(1 + \frac{\alpha^2 \sigma^2 QH_{гор}(f_x)QV_{гор}}{L^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5.49)$$

де $\Phi PK_{ока}(f_e)$ – ФПК ока спостерігача при спостереженнях з екрану; f_e – просторова частота на сітківці; $M_{OC}(f_x)$, $M_{МПВ}(f_x)$, $M\Phi_{\delta}(f_x)$ – модуляційна передавальна функція оптичної системи, матричного приймача випромінювання (МПВ) та дисплея відповідно; $QH_{гор}(f_x)$ – горизонтальна шумова смуга; $QV_{гор}$ – вертикальна шумова смуга; σ – середнє квадратичне значення шуму дисплея; α – коефіцієнт пропорційності; L – середня яскравість дисплея.

Оцінимо ефективність двоканальної ОЕСС у складі типових каналів – ТВ і ТПВ. Основою ТПВ каналу є ІЧ камера зовнішнього спостереження Thermal-eye, а ТВ каналу – камера РІН 750А. Параметри камер наведені в табл. 5.2.

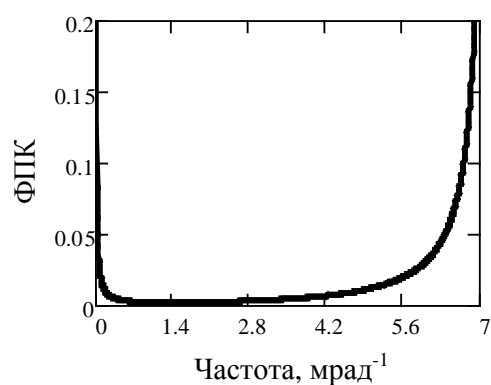
Таблиця 5.2 Параметри ТВ та ТПВ каналів

Параметри		ТВ канал	ТПВ канал
Оптичної системи	Діаметр вхідної зіниці, мм	22	26
	Фокусна відстань, мм	50	16
МПВ	Розмір пікселя, мкм ²	7×7	30×30
	Робочий спектральний діапазон, мкм	0,42...0,76	8...12
	Формат	500×582	320×240

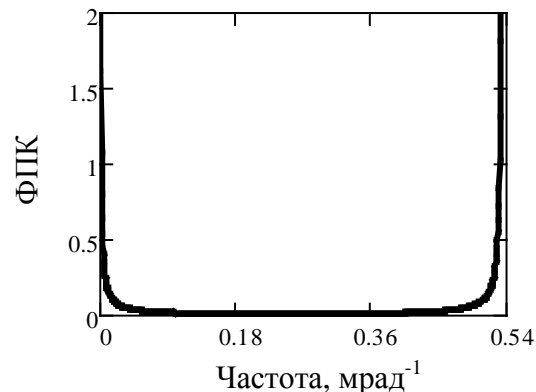
Для моделювання об'єкта скористаємось стандартом НАТО 4347, згідно якого тест-об'єктом є АЧТ, що має розмір $2,3 \times 2,3 \text{ м}^2$ з температурним контрастом $\Delta T = 2K$ на фоні температурою $T_b = 288K$. В цьому ж стандарті визначено показник ослаблення атмосфери $\alpha = 0,2 \text{ км}^{-1}$ (за хороших погодних умов).

МПФ оптичної системи, вважаючи, що вона дифракційно обмежена, знаходимо за формулою, наведеною в [6], МПФ МПВ та дисплея – [166], МПФ ока – [163], ФПК ока – [167], шумові смуги – [168]. Вхідними даними для розрахунків будуть [168, 169]: коефіцієнт пропорційності для ТПВ каналу $\alpha = 862\sqrt{Гц}$, коефіцієнт пропорційності для ТВ каналу $\alpha = 169,6\sqrt{Гц}$, $\sigma = 0.02 \text{ с} \cdot \text{мрад}^2 \text{ кд/м}^2$, середня яскравість дисплея – 17 кд/м^2 .

Графіки розрахованих по формулі (5.49) ФПК для ТВ та ТПВ каналів зображені на рис. 5.4.



ТВ канал



ТПВ канал

Рис. 5.4 ФПК каналів ОЕСС

Як видно з рисунку, діапазон частот, який передається ТВ каналом є значно більшим, ніж діапазон частот, що передається ТПВ каналом. Спільним для обох каналів є діапазон частот від 0 мрад^{-1} до $0,53 \text{ мрад}^{-1}$.

Отримані сигнали комплексуються різними методами. Проведемо оцінку двоканальної ОЕСС при використанні таких найбільш вживаних методів комплексування, як метод усереднення, метод головних компонент, піраміда Лапласа, градієнтна піраміда, морфологічна піраміда, контрастна піраміда, піраміда ФВП (фільтрація-віднімання-проріджування), вейвлет перетворення, інваріантне до зсувів вейвлет перетворення.

Для оцінки методу усереднення та методу головних компонент (методів без перетворення масштабу) визначаємо показник успішності виконання завдання в діапазоні частот, що передаються. В результаті інтегрування згідно формул (5.45), (5.46) отримаємо: для ТПВ каналу в діапазоні частот від 0 мрад^{-1} до $0,53 \text{ мрад}^{-1}$ – $TTP = 4,98$; для ТВ каналу в діапазоні частот від 0 мрад^{-1} до $0,53 \text{ мрад}^{-1}$ – $TTP = 2,5$, в діапазоні частот від $0,53 \text{ мрад}^{-1}$ до $6,5 \text{ мрад}^{-1}$ – $TTP = 34$.

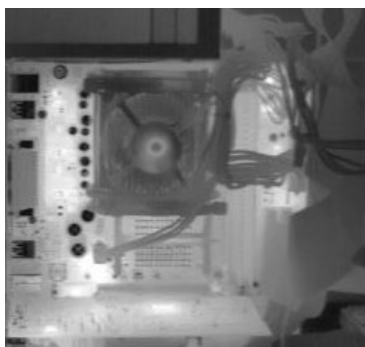
Решта методів є методами з перетворенням масштабу. Для них діапазон частот від 0 мрад^{-1} до $0,53 \text{ мрад}^{-1}$ розбиваємо на октави. При 4-х рівневому розкладі для даних методів комплексування октав також буде чотири: $L_1 = 0 \dots 0,54$, $L_2 = 0 \dots 0,398$, $L_3 = 0 \dots 0,265$, $L_4 = 0 \dots 0,1325$.

Оцінимо ефективність комплексування інформації за наявності задимленості в лабораторних умовах в двоканальній ОЕСС за наведеною методикою при застосуванні таких найбільш розповсюджених на сьогоднішній день методів, як: метод усереднення; метод головних компонент; піраміда Лапласа; градієнтна піраміда; морфологічна піраміда; контрастна піраміда; вейвлет перетворення; інваріантне до зсувів вейвлет перетворення; а також розробленого методу.

Вхідні ТВ та ТПВ зображення показані на рис. 5.5 (відповідно а) і б)).



а) вхідне ТВ зображення



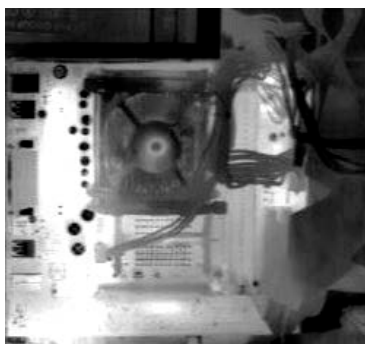
б) вхідне ТПВ зображення



в) піраміда ФВП



г) метод усереднення

д) метод головних
компонент

е) піраміда Лапласа

ж) контрастна
піраміда

з) градієнтна піраміда



і) морфологічна піраміда



к) вейвлет перетворення

л) інваріантне до зсувів
вейвлет перетворенням) запропонований
метод

Рис. 5.5 Вхідні зображення та результати комплексуювання

Розрахуємо спочатку показник успішності виконання завдання для ТВ та ТПВ каналів. Для цього визначаємо діапазон частот, що передається ТВ та ТПВ каналами, тобто діапазон частот, в межах якого контраст об'єкта перевищує ФПК системи. ТВ канал (відповідно до рис. 5.4) передає сигнал в діапазоні частот від 0 мрад^{-1} до 4 мрад^{-1} , ТПВ канал передає сигнал в діапазоні частот від 0 мрад^{-1} до 7 мрад^{-1} .

Діапазон частот, що передає ТПВ канал більший за діапазон частот, що передає ТВ канал. Тому спочатку визначаємо спільний для обох каналів діапазон частот – від 0 мрад^{-1} до 4 мрад^{-1} .

Для оцінки методу усереднення та методу головних компонент – методів без перетворення масштабу, визначаємо показник успішності виконання завдання в діапазоні частот, що передаються:

$$HTTP_{IR} = (f_{igtincx}) \cdot \sum_{i=0}^4 \left(\frac{\tau_{beers}(R_r) \cdot C_{tgt}}{CTFH_i} \right)^{\frac{1}{2}} = 21,3$$
 – горизонтальна складова показника успішності виконання завдання ТПВ каналу (для спільного діапазону частот з ТВ каналом);

$$VTTP_{IR} = (f_{igtincy}) \cdot \sum_{i=0}^4 \left(\frac{\tau_{beers}(R_r) \cdot C_{tgt}}{CTFV_i} \right)^{\frac{1}{2}} = 44$$
 – вертикальна складова показника успішності виконання завдання ТПВ каналу (для спільного діапазону частот з ТВ каналом);

$$TTP_{IR} = \sqrt{HTTP_{IR} \cdot VTTP_{IR}} = 30,6$$
 – показник успішності виконання завдання ТПВ каналу (для спільного діапазону частот з ТВ каналом);

$$HTTP_{TV} = (f_{igtincx}) \cdot \sum_{i=0}^4 \left(\frac{\tau_{beers}(R_r) \cdot C_{tgt}}{CTFH_i} \right)^{\frac{1}{2}} = 5$$
 – горизонтальна складова показника успішності виконання завдання ТВ каналу;

$$VTTP_{TV} = (f_{igtincy}) \cdot \sum_{i=0}^4 \left(\frac{\tau_{beers}(R_r) \cdot C_{tgt}}{CTFV_i} \right)^{\frac{1}{2}} = 7,8$$
 – вертикальна складова показника успішності виконання завдання ТВ каналу;

$TTP_{TV} = \sqrt{HTTP_{TV} \cdot VTTP_{TV}} = 6,2$ – показник успішності виконання завдання ТВ каналу;

ТПВ канал має також додаткову інформацію в діапазоні частот від 4 мрад^{-1} до 7 мрад^{-1} .

$HTTP_{IR} = (f_{igtincy}) \cdot \sum_{i=4}^7 \left(\frac{\tau_{beers}(R_r) \cdot C_{tgt}}{CTFH_i} \right)^{\frac{1}{2}} = 17,5$ – горизонтальна складова показника

успішності виконання завдання ТПВ каналу (додаткова інформація);

$VTTP_{IR} = (f_{igtincy}) \cdot \sum_{i=4}^7 \left(\frac{\tau_{beers}(R_r) \cdot C_{tgt}}{CTFV_i} \right)^{\frac{1}{2}} = 24,5$ – вертикальна складова показника

успішності виконання завдання ТПВ каналу (додаткова інформація);

$TTP_{IR} = \sqrt{HTTP_{IR} \cdot VTTP_{IR}} = 20,7$ – показник успішності виконання завдання ТПВ каналу (додаткова інформація).

Решта методів є методами з перетворенням масштабу. Для них діапазон частот від 0 мрад^{-1} до 4 мрад^{-1} розбиваємо на октави. При 4-х рівневому розкладі для даних методів комплексування октав також буде чотири.

В табл. 5.3 наведені значення показника успішності виконання завдання ТВ та ТПВ каналів для 4-х октав.

Таблиця 5.3 Показник успішності виконання завдання ТВ та ТПВ каналів для 4-х октав

Канали	Октави			
	L_1	L_2	L_3	L_4
ТВ	6,2	4,9	3,6	2,1
ТПВ	30,6	24,5	17,96	11

За допомогою пакету Matlab знаходимо кореляцію Пірсона між комплексованим і ТВ зображеннями, а також між комплексованим і ТПВ зображеннями в кожній октаві за формулою (5.48). Результати наведені на рис. 5.5, в) –Б.1, м) і в табл. 5.4, 5.5.

Таблиця 5.4 Кореляція Пірсона між комплексованим зображенням і ТВ для 4-х октав

Метод комплексування	Октави			
	L_1	L_2	L_3	L_4
Метод усереднення	0,52	–	–	–
Метод головних компонент	0,38	–	–	–
Піраміда Лапласа	0,42	0,33	0,24	0,14
Гرادієнтна піраміда	0,47	0,37	0,27	0,16
Піраміда ФВП	0,46	0,36	0,27	0,16
Морфологічна піраміда	0,45	0,36	0,26	0,15
Контрастна піраміда	0,54	0,41	0,3	0,18
Вейвлет перетворення	0,49	0,39	0,29	0,17
Інваріантне до зсувів вейвлет перетворення	0,48	0,38	0,28	0,16
Запропонований метод	0,32	0,09	0,07	0,04

Таблиця 5.5 Кореляція Пірсона між комплексованим зображенням і ТПВ для 4-х октав

Метод комплексування	Октави			
	L_1	L_2	L_3	L_4
Метод усереднення	0,67	–	–	–
Метод головних компонент	0,92	–	–	–
Піраміда Лапласа	0,78	0,63	0,46	0,28
Градієнтна піраміда	0,76	0,61	0,45	0,27
Піраміда ФВП	0,75	0,6	0,44	0,27
Морфологічна піраміда	0,69	0,55	0,41	0,25
Контрастна піраміда	0,74	0,54	0,39	0,24
Вейвлет перетворення	0,76	0,61	0,45	0,27
Інваріантне до зсувів вейвлет перетворення	0,77	0,62	0,45	0,28
Запропонований метод	0,94	0,75	0,55	0,34

За допомогою пакету Matlab знаходимо кореляцію Пірсона між вхідними зображеннями (табл. 5.6).

Таблиця 5.6 Кореляція Пірсона між ТВ та ТПВ зображеннями для 4-х октав

Кореляція	Октави			
	L_1	L_2	L_3	L_4
ТВ і ТПВ	0,17	0,14	0,1	0,06

Визначаємо показник успішності виконання завдання для системи з комплексуванням за формулою (5.47). Результати розрахунків представлено в табл. 5.7.

Таблиця 5.7 Показник успішності виконання завдання для системи з комплексуванням (TTP_{κ}) при використанні різних методів комплексування

№	Метод комплексування	Значення показника
1	Метод усереднення	30
2	Морфологічна піраміда	30,2
3	Піраміда ФВП	31,8
4	Контрастна піраміда	31,9
5	Градiєнтна піраміда	32,1
6	Вейвлет перетворення	32,2
7	Піраміда Лапласа	32,3
8	Інваріантне зо зсувів вейвлет перетворення	32,4
9	Метод головних компонент	35,7
10	Запропонований метод	35,9

Враховуючи додаткову інформацію ТПВ каналу в діапазоні частот від 4 мрад⁻¹ до 7 мрад⁻¹, отримаємо значення показника успішності виконання завдання, наведені в табл. 5.8.

Таблиця 5.8 Показник успішності виконання завдання для системи з комплексуванням (TTP_{κ}) при використанні різних методів комплексування

№	Метод комплексування	Значення показника
1	Метод усереднення	50,7
2	Морфологічна піраміда	50,9
3	Піраміда ФВП	52,5
4	Контрастна піраміда	52,6
5	Градiєнтна піраміда	52,8
6	Вейвлет перетворення	52,9
	Піраміда Лапласа	53
8	Інваріантне зо зсувів вейвлет перетворення	53,1
9	Метод головних компонент	56,4
10	Запропонований метод	56,6

Згідно з розрахунками найкращі результати дають інваріантне до зсувів вейвлет перетворення, метод головних компонент та запропонований метод.

Аналогічні дослідження були виконані для зображень, отриманих в польових умовах (рис. 5.6). Але визначались не тільки узагальнені показники якості комплексування, але і ймовірнісні характеристики виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта.



а) зображення в ТВ каналі

б) зображення в ТПВ каналі

Рис. 5.6 Зареєстровані зображення в польових умовах

Результати комплексування показані на рис. 5.7, а) - Б.3, і) та в табл. 5.9.



а) метод усереднення

б) метод головних
компонент

в) піраміда Лапласа

г) контрастна
піраміда

д) градієнтна піраміда



е) морфологічна піраміда



ж) вейвлет перетворення з) інваріантне до зсувів вейвлет перетворення і) запропонований метод

Рис. 5.7 Результати комплексуювання

Таблиця 5.9 Оцінка результатів комплексуювання по рис. 5.7

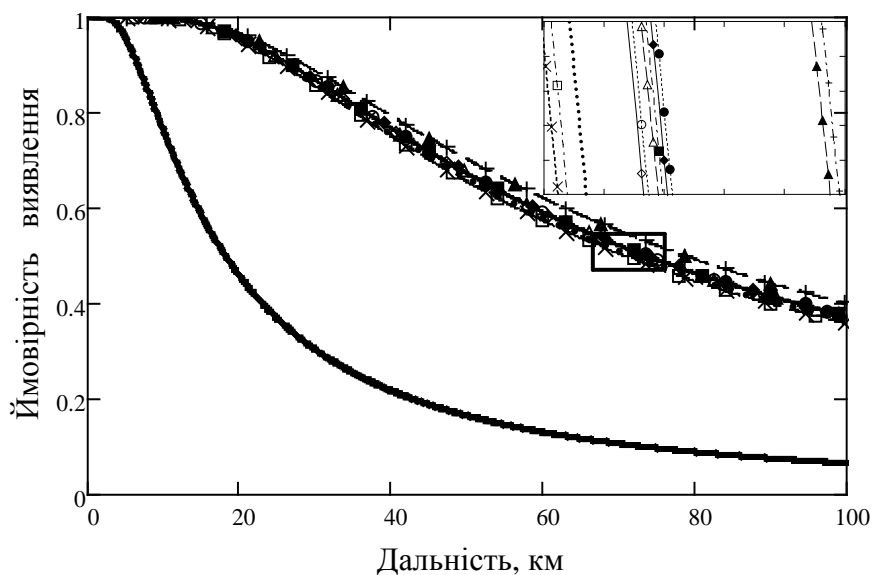
Метод комплексуювання	Стандартне відхилення	Інформаційний показник	$Q^{AB/F}$	Анізотропія	TTP_{κ}	Суб'єктивна оцінка
Метод усереднення	39,6317	2,8185	0,3254	0,0023	25	3
Метод головних компонент	49,6429	3,3522	0,5839	0,0033	27	2
Піраміда Лапласа	54,5903	2,7926	0,5788	0,0068	30	4
Контрастна піраміда	51,7377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

Ймовірності виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта двоканальною ОЕСС розраховуються за формулою

$$P_{\kappa}(R) = \frac{\left(\frac{V_{\kappa}(R)}{V_{50}(3)}\right)^E}{1 + \left(\frac{V_{\kappa}(R)}{V_{50}(3)}\right)^E}, \text{ де } V_{\kappa} = \frac{\sqrt{A_0 TTP_{\kappa}}}{R}$$

для різних відстаней спостереження. Графіки цих залежностей при числі штрихів, що розділяються, необхідних для забезпечення 50 % ймовірності

правильного виявлення – $V_{50} = 2,7$, розпізнавання – $V_{50} = 14,5$, ідентифікації – $V_{50} = 18,8$ показані на рис. 5.8, 5.9, 5.10 (номери методів згідно з табл. 5.9). З рисунків видно, що комплексування дозволяє підвищити ефективність двоканальної ОЕСС порівняно з ефективністю окремих каналів.



- | | |
|--------------------------------|---------------------------------|
| — ТВ канал | —△— Двоканальна ОЕСС, метод №5 |
| ••• ТПВ канал | —■— Двоканальна ОЕСС, метод №6 |
| —×— Двоканальна ОЕСС, метод №1 | —◆— Двоканальна ОЕСС, метод №7 |
| —□— Двоканальна ОЕСС, метод №2 | —●— Двоканальна ОЕСС, метод №8 |
| —◇— Двоканальна ОЕСС, метод №3 | —▲— Двоканальна ОЕСС, метод №9 |
| —⊙— Двоканальна ОЕСС, метод №4 | —+— Двоканальна ОЕСС, метод №10 |

Рис. 5.8 Ймовірність виявлення об'єкта двоканальною ОЕСС за різних методів комплексування

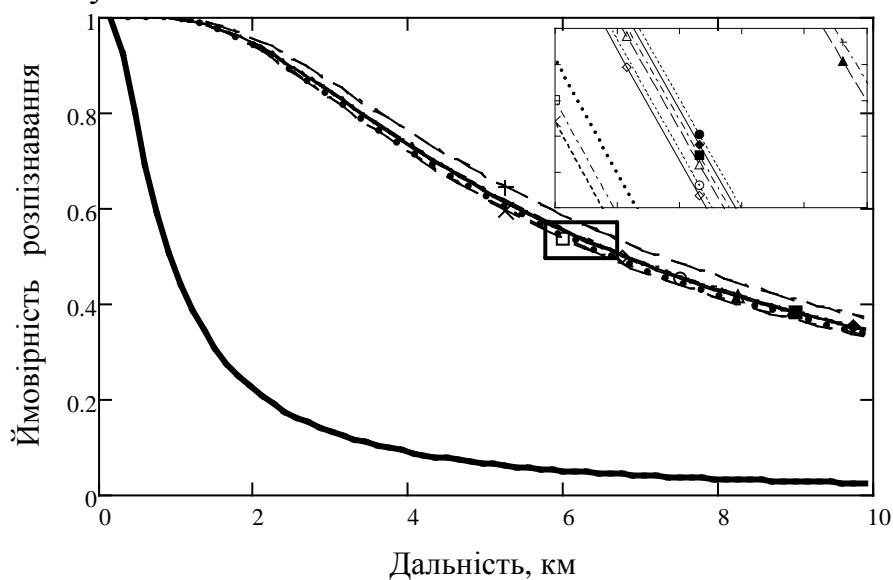


Рис. 5.9 Ймовірність розпізнавання об'єкта двоканальною ОЕСС за різних методів комплексування

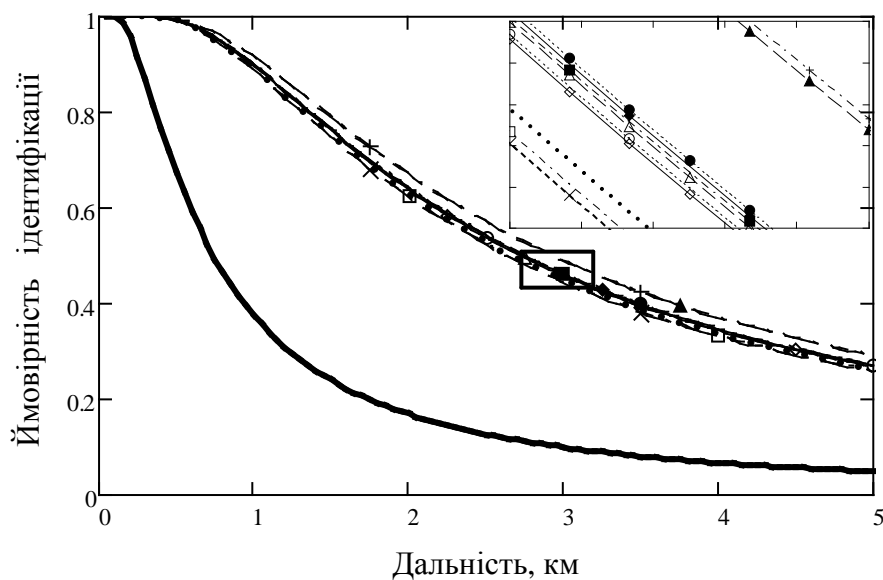


Рис. 5.10 Ймовірність ідентифікації об'єкта двоканальною ОЕСС за різних методів комплексування

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

ВИСНОВКИ

Завдяки останнім досягненням в конструкції і технологіях малогабаритних МПВ і матричних дисплеїв стало очевидно, що БК ОЕСС наразі є найперспективнішим типом іконічних систем. Ці пристрої здатні працювати в ультрафіолетовому, видимому і в ІЧ діапазонах спектру. Галузь їх застосування необмежена – від мобільних телефонів, цифрових фотоапаратів, медико-діагностичної техніки до оглядових комплексів військового призначення та космічних сканерів.

Стало очевидним, що покращення споживчих характеристик БК ОЕСС за рахунок вдосконалення технічних параметрів окремих блоків системи наближається до теоретичної межі. З огляду на постійні вимоги до підвищення ефективності БК ОЕСС значно актуалізувався попит на вдосконалення БК ОЕСС шляхом розробки нових методів обробки сигналів в оптичному і електричному трактах з врахуванням властивостей об'єктів спостереження і фонів з одного боку і спостерігача з іншого боку. Одним з найперспективніших напрямків вдосконалення БК ОЕСС, який останнім часом стає основним, є комплексування інформації. Така процедура в найпростішому випадку передбачає сумісний аналіз однорідних даних з двох спектральних каналів, а в найбільш узагальненому вигляді потребує врахування будь-якої доступної інформації про ФЦО з різних датчиків та інформаційних джерел.

Показано, що підвищення якості зображень в БК ОЕСС є триєдиною задачею:

по-перше, необхідно динамічно адаптувати параметри вхідного оптичного блоку з МПВ до просторово-частотних, часових і спектральних характеристик об'єктів і фонів спостереження з обов'язковим урахуванням умов функціонування узагальненої системи "ФЦО – МІ ОЕС";

по-друге, необхідно пристосовувати параметри вихідного зображення на матричному дисплеї до вимог ефективної роботи зорової системи оператора з урахуванням змісту поточної виконуваної задачі і умов спостереження;

по-третє, виконання перших двох завдань має відбуватись з обов'язковим періодичним взаємним узгодженням параметрів МПВ і матричного дисплею.

Для вирішення проблеми підвищення ефективності пошуку, виявлення та розпізнавання об'єктів в реальному масштабі часу оператором БК ОЕСС з комплексуванням інформаційних каналів було створено методику покращення інформативних характеристик зображень в системі «ФЦО - БК ОЕСС – оператор» з урахуванням особливостей їх формування та зорового сприйняття. Розроблено новий метод оцінки ефективності БК ОЕСС на основі показника успішності виконання завдання для системи з комплексуванням, який дозволяє погоджувати просторово-частотні характеристики МПВ і об'єктивів каналів, а також визначати ймовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта БК ОЕСС при застосуванні різних методів комплексування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Левшин В.Л. Биокрибернетические оптико-электронные устройства автоматического распознавания изображений. - М.: Машиностроение, 1987.
2. R.R.Tenney, N.R.Sandell Detection with distributed sensors // IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst. – AES-17(4), -1981. – P.501-510.
3. U.S. Department of Defense, Data Fusion Subpanel of the Joint Directors of Laboratories, Technical Panel for C3, "Data fusion lexicon," 1991.
4. Викторов А.С. Рисунок ландшафта. – М.: Мысль, 1986. – 179с.
5. Ллойд Дж. Системы тепловидения / Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 417 с.
6. Колобродов В. Г. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження: Підручник / В. Г. Колобродов, М. І. Лихоліт. – К. : НТУУ «КПІ», 2007. – 364 с.
7. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов / Ю. Г. Якушенков. – М. : Логос, 2004. – 480 с.
8. P. Kerekes and J.E. Baum, "Full Spectrum Spectral Imaging System Analytical Model," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 43, No. 3, March 2005, pp. 571-580.
9. Tanre D., Herman M., Deschamps P. Y. Influence of the background contribution upon space measurements of ground reflectance / Applied Optics, Volume 20, Issue 20, October 15, 1981, pp.3676-3684
10. Jones, W. P. Air Conditioning: Applications and Design, 2nd ed., London, Arnold, 1997.
11. Incropera, F.P., DeWitt D.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 5th ed., John Wiley & Sons 2002.
12. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение / Пер. с франц. – М. : Мир, 1988. - 416 с.

13. G. THUILLIER, M. HERSÉ, D. LABS / THE SOLAR SPECTRAL IRRADIANCE FROM 200 TO 2400 nm AS MEASURED BY THE SOLSPEC SPECTROMETER FROM THE ATLAS AND EURECA MISSIONS / Solar Physics, №177, 41-61. (2003)
14. Bird R., Riordan C. Simple Solar Spectral Model for Direct and Diffuse Irradiance on Horizontal and Tilted Planes at the Earth's Surface for Cloudless Atmospheres / J. of Climatol. Appl.Meteorology, v.25, pp. 87-97.
15. U.S. Standard Atmosphere, 1976, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1976
16. Ребрин Ю.К. Оптико-электронное разведывательное оборудование летательных аппаратов. – Киев: КВВАИУ, 1988. – 450с.
17. Волков В.Г. Активно-импульсные приборы наблюдения / Вопросы оборонной техники. Сер. 11, 1994. Вып. 3(142)-4(143). С. 18-25.
18. Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года / http://www.gisa.ru/concept_drs.html
19. Микитенко В.І. Дослідження релевантних ознак зображень в ОЕП телевізійного типу / Вісник НТУУ “КПІ”. Серія приладобудування.- 2006. – Вип. 31. – С. 24 - 31.
20. Глезер В.Д. Зрение и мышление // СПб.: Наука, 1993. – 283 с.
21. Ratches J.A. Static performance model for thermal imaging systems. Opt.Eng., 15(6), №3, 1976, p.525-530.
22. Leachtenauer J.C. National imagery interpretability rating scales: overview and product description / ASPRS/ASCM Annual Convention and Exhibition Technical Papers: Remote Sensing and Photogrammetry. - №1, 1996, p.262-272.
23. Зинченко В.П., Мунипов В.М. Основы эргономики. – М: Изд.МГУ. – 1979. – 344 с.
24. Erickson R. A. Human factors, 1978, vol. 20, №5, pp. 573 — 588.

25. Biberman L.M. Perception of Displayed Information. Plenum Press, N.York, 1973. - 340 p.
26. Кошавцев Н. Ф., Короневская Т. И., Хальзов А. Х.— Труды МЭИ, 1980, вып. 488, с. 18 — 22.
27. Луизов А.В. Инерция зрения. М.: Оборонгиз, 1961. - 247 с.
28. Гуторов М.М., Иванова В.П., Мурашов М.А. Исследование пороговой видимости подвижных объектов на равнорном фоне / Труды МЭИ, 1976.- вып.289. – С.11-15.
29. Веселова Е.К. Экспериментальное исследование зрительного поиска объекта на движущемся изображении. Труды ГОИ им. С.И.Вавилова, том 57, вып. 191.- Л.: 1984. - С. 158-165.
30. Романов Г.М., Туркина Н.В., Колпашиков Л.С. Человек и дисплей. М.: Машиностроение, 1986.- 256 с.
31. Christie R.E. Review and analysis of color coding research for visual displays // Human factors. – 1975. – v.17. - №6. – pp.542-570.
32. Юхно П.М., Огреб С.М., Марек Я.Л. Исследование особенностей визуального поиска в условиях временных ограничений и неопределенности относительно наличия объекта в зоне поиска // Оптический журнал. –т.69. -№5. – С.52-55.
33. Травникова Н.П. Эффективность визуального поиска. -М.: Машиностроение, 1985. - 126 с.
34. Козюлина Н.Л., Романов С.С. — Техника кино и телевидения, 1978, №10, с. 60
35. Козюлина Н.Л., Короневская Т.Н., Романов С.С. - Светотехника, 1978, №8, с. 7 - 9.
36. Красильников Н. Н. Статистическая теория передачи изображений. М.: Связь, 1976, 184 с.
37. Байданов М. П., Красильников Н.Н., Пастухов О.В.— Автометрия, 1973, №1, с. 7 — 14.
38. Вифанский Ю.К., Мироненко И.А. Об опознавательных признаках

- объектов. Труды ГОИ им. С.И.Вавилова, том 57, вып. 191.- Л.:1984. - С. 153-158.
39. Mocharnuk J. B., Gaudio D. F., Suwe C. L. Human factors. – 1981, vol. 23, №5, pp. 561 — 580.
40. Миракян А.И., Панов В.И. Восприятие скорости движения в процессе отражения формы объекта / Вопросы психологии, 1985, №1, с.148-154
41. Endsley M. R. Situation awareness global assessment technique (SAGAT) // Proceedings of the National Aerospace and Electronics Conference (NAECON). (New York: IEEE). – 1988. – P. 789-795.
42. Krebs W.K, Sinai M.J. Psychophysical Assessments of Image-Sensor Fused Imagery // Human Factors. – 2002. - V.44. - №2. – P. 257-271.
43. Акимов П.С., Бакут П.А., Богданович В.А. и др. Теория обнаружения сигналов – М.: Радио и связь, 1984. – 440 с.
44. Мосягин Г.М., Немтинов В.Б., Лебедев Е.Н. Теория оптико-электронных систем: Учеб. для студентов вузов для оптических специальностей / М.: Машиностроение, 1990. – 432 с.
45. Бенуни А.А., Колючкин В.Я. Модель зрительной системы человека-оператора / Вестник МГТУ. Приборостроение, 2002. - №4. – С.43 – 52.
46. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: Учеб. пособие для приборостроительных вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1983. – 696 с.
47. Шредер Г., Трайбер Х. Техническая оптика – М.: Техносфера, 2006. – 424 с.
48. W. James, The Principles of Psychology, Harvard University Press, Cambridge, 1890
49. J. Atick et al.:“ Understanding retinal color coding from first principles / Neural computation 4:559–572, 1992.
50. R. D. Valois, K. D. Valois A multi-stage color model / Vision Res.

- 33(8):1053–1065, 1993. S. Guth Model for color vision and light adaptation / J. Opt. Soc. Am. 8(6):976–993, 1991
51. S. Guth “Model for color vision and light adaptation.” J. Opt. Soc. Am. 8(6):976–993, 1991
52. Красильников Н.Н., Шелепин Ю.Е., Красильникова О.И. Математическая модель цветовой константности зрительной системы человека. - Оптический журнал, 2002, т. 69, № 5, с. 38-44.
53. T.N. Cornsweet. Visual Perception. Academic Press, New York, 1970
54. Teogolo D. Shape Analysis for Image Retrieval // Proc. SPIE. – V. 2185. – P.59 – 69.
55. Manmatha R., Ravela S., Chitti Y. On Computing Local and Global Similarity in Images // Proc. SPIE. Human Vision and Electronic Imaging . – 1998. – V. 3299. – P.540 – 551
56. Дистанционное зондирование: количественный подход / Ш.М.Дейвис, Д.А.Ландгребе, Т.Л.Филипс и др. Под ред. Ф.Свейна и Ш.Дейвиса. Пер. с англ. - М.: Недра, 1983
57. Systematic Observation Requirements for Satellite-based Products for Climate, September 2006 / http://gosis.org/ios/GCOS_main_page.htm
58. Schuler J. Image Registration Techniques for Image Fusion / www.logostech.net/imagefusion2005/MasterClass_Image_Registration.pdf
59. Chen C. H., Cheng C., Page D., Koschan A., Abidi M. Modular Robotics and Intelligent Imaging for Unmanned Systems / Proc. SPIE Unmanned Systems Technology VIII. April 2006.- Vol. 6230.- Pp. 43-52.
60. Микитенко В.І. Комплексування інформації в оглядово-візирних системах керованих рухомих об’єктів / Вісник НТУУ “КПІ”. Серія приладобудування.- 2005. – Вип. 30. – С. 36 - 41.
61. Steele P.M., Perconti P., (1997). Part task investigation of multispectral image fusion using gray scale and synthetic color night vision sensor imagery for helicopter pilotage // Proceedings of SPIE. – 1997. - V. 3062. - P. 88-100.

62. Essock E. A., Sinai M. J., DeFord J. K., Hansen B. C., Srinivasan N. Human Perceptual Performance With Nonliteral Imagery: Region Recognition and Texture-Based Segmentation // *Journal of Experimental Psychology*. – 2004. - V. 10, №. 2. – P. 97–110.
63. Flusser J. Image fusion: principles, methods, and applications / J. Flusser, F. Sroubek, B. Zitova // *European Signal Processing Conference EUSIPCO*, 2007.
64. Rockinger O. Pixel-level image fusion: the case of image sequences / O. Rockinger, T. Fechner // *Proc. SPIE*. – 1998. – Vol. 3374. – pp. 378-388.
65. Shapiro L. G. *Computer vision* / Linda G. Shapiro, George C. Stockman. – Prentice Hall? 2001. – 580p.
66. Frucci M. From segmentation to binarization of gray-level images / Maria Frucci, Gabriella Sanniti di Baja // *Journal of Pattern recognition Research*. – 2008. – № 1. – pp. 1-13.
67. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms / N. Otsu // *IEEE Transactions on Systems. Man and Cybernetics*. – 1979. – Vol. SMC-9, № 1, pp. 62-66.
68. A comparison of decision-level sensor-fusion methods for anti-personnel landmine detection / F. Cremer, K. Schutte, J. G. M. Schavemaker [et al.] // *Information Fusion*. – 2001. – №2. – pp. 187-208.
69. Liggins M. E. Extensions to adaptive Boolean decision fusion / Martin E. Liggins // *Proceedings of SPIE*. – 2002. – Vol. 4729. – pp. 288-296.
70. Смагин М. С. Разработка методики синтеза структуры вычислительных устройств слияния изображений: дис. канд. техн. наук: 05.13.05 / М. С. Смагин. – М., 2008. – 198 с.
71. Burt P. T. The Laplacian pyramid as a compact image code / P. T. Burt, E. H. Andelson // *IEEE Trans. Commun*. – 1983. – № 31. – pp. 532-540.
72. Toet A. Merging thermal and visual images by a contrast pyramid / A. Toet, L. J. van Ruyven, J. M. Valeton // *Optical Engineering*. – 1989. – № 28. – pp. 789-792.

73. Burt P. J. A gradient pyramid basis for pattern-selective image fusion / P. J. Burt // Society for Information Display. Digest of Technical Papers. – 1992. – pp. 447-467.
74. Toet A. Image fusion by a ratio of low-pass pyramid / A. Toet // Pattern Recognition Letters. – 1989. – Vol. 9, № 4. – pp. 245–253.
75. Image fusion by using steerable pyramid / Z. Liu, K. Tsukada, Y. K. Ho [et al.] // Pattern Recognition Letters. – 2001. – Vol. 22. – pp. 929-939.
76. Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation / S. Mallat // IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. – 1989. – Vol.11. – pp. 674-693.
77. Li H. Multisensor image fusion using the wavelet transform / H. Li, B. Manjunath, S. Mitra // Graphical Models Image Process. – 1995. – № 57. – pp. 235-245.
78. Rockinger O. Pixel-level fusion of image sequences using wavelet frames / O. Rockinger // Proceedings in Image Fusion and Shape Variability Techniques. – 1996. – pp. 149–154.
79. Rockinger O. Image sequence fusion using a shift-invariant wavelet transform / Oliver Rockiger // Proceedings of the 1997 International Conference on Image Processing (ICIP'97). – 1997. – Vol. 3. – pp. 288-291.
80. Котовський В.Й., Микитенко В.І. Багатоканальні системи технічного зору для дистанційного енергоаудіту складних об'єктів / Вісті академії інженерних наук України. – 2008. - № 2(36). – С.16 – 19.
81. Senthil Kumar S. PCA-based image fusion / Kumar S. Senthil, S. Muttan // Proc. SPIE. – 2006. – Vol. 6233. – pp. 62331T.
82. Sharma R. K. Adaptive and statistical image fusion / R. K. Sharma, Misha Pavel // SID Digest. – 1996. – Vol. XXVII. – pp. 969-972.
83. Comhaire A. L., Ozer A., Jaspard A. The contribution of ERS-1 and SPOT data in the morphologic and bathymetric study of the north sea and

the Scheldt / Proceedings of First ERS-1 Pilot Project Workshop, Toledo, Spain, 22 - 24 June 1994, SP-365 (Paris: European Space Agency), pp. 297 - 302.

84. Gillespie A. R., Kahle A. B., Walker R. E. Colour enhancement of highly correlated images. I. Decorrelation and HSI contrast stretches // *Remote Sensing and Environment*, 1987, №20, pp. 209 - 235.
85. Daily M. Hue-saturation-intensity split-spectrum processing of SEASAT radar imagery // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1983, №49, pp. 349 - 355.
86. Harrison B. A., Jupp D.L.B. Introduction to image processing // *MicroBRIAN Resource Manual, Part 2.* -Melbourne: CSRIO Publications, 1990.
87. Carper W. J., Lillesand T. M., Kieffer R.W. The use of Intensity-Hue-Saturation transformations for merging SPOT Panchromatic and multispectral image data // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1990, №56, pp. 459 - 467.
88. Chiesa C. C., Tyler W. A. Data fusion of off -nadir SPOT panchromatic images with other digital data sources. *ACSM-ASPRS Annual Convention // Image Processing and Remote Sensing*, 1990, №4, pp.86 - 98.
89. Guo H.D., Pinliang D. Integrated MSS-SAR-SPOT-geophysical geochemical data for exploration geology in Yeder // *CAS-IRSA*, 1989, pp. 1- 8.
90. Ye'sou H., Besnus Y., Rolet J., Pion J. C. Merging Seasat and SPOT imagery for the study of geologic structures in a temperate agricultural region // *Remote Sensing of Environment*, №43, pp.265 - 280.
91. Welch R., Ehlers M. Merging multiresolution SPOT HRV and Landsat TM data // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, №53, 1987, pp.301 - 303.
92. Price J. C. Combining panchromatic and multispectral imagery from dual resolution satellite instruments // *Remote Sensing of Environment*,

- 1987, №21, pp.119 - 128.
93. Munechika C. K., Warnick J. S., Salvaggio, C., Schott J. R. Resolution enhancement of multispectral image data to improve classification accuracy // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1993, №59, pp.67 - 72.
 94. Singh A. Digital change detection techniques using remotely-sensed data // *International Journal of Remote Sensing*, 1989, №10, pp.989 - 1003.
 95. Griffiths G. H. Monitoring urban change from Landsat TM and SPOT satellite imagery by image differencing // *Proceedings IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '88)*, Edinburgh, Scotland, 13 - 16 September 1988, pp. 493 - 497.
 96. Shettigara V. K. A generalized component substitution technique for spatial enhancement of multispectral images using a higher resolution data set // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1992, №58, pp.561 - 567.
 97. Fung T., LeDrew, E. Application of Principal Component Analysis to change detection // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1987, №53, pp.1649 - 58.
 98. Chavez P. S., Sides S. C., Anderson J. A. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: TM & SPOT pan // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1991, №57, pp.295 - 303.
 99. Richards J. A. Thematic mapping from multitemporal image data using the principal component transformation // *Remote Sensing of Environment*, 1984, №16, pp.35 - 46.
 100. Jutz S. L., Chorowicz J. Geological mapping and detection of oblique extension structures in the Kenyan Rift Valley with a SPOT/Landsat-TM datamerge // *International Journal of Remote Sensing*, 1993, №14, pp.1677 - 1688.

101. Campbell N. A. Towards more quantitative extraction of information from remotely sensed data // *Advanced Remote Sensing, Conference Proceedings, Sydney, Australia, 1993, №2, pp.29 - 40.*
102. Tang Z.W., Wang J.G., Huang S.J. The wavelet transformation application for image fusion // *Wavelet Application VII, H. H. Szu, ed., Proc. SPIE 4056, 2000, pp.462-469.*
103. Li H., Manjunath B.S., Mitra S.K. Multisensor image fusion using the wavelet transform // *Graphical Models Image Processing №57, 1995, pp.235-245.*
104. Nunez J., Otazu X., Fors O., Prades A., Pala V. Multiresolutionbased image fusion with additive wavelet decomposition // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, Vol. 37, No. 3, pp. 1204-1211.*
105. Yocky D.A. Multiresolution wavelet decomposition image merger of Landsat Thematic Mapper and SPOT panchromatic data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1996, Vol. 62, №. 9, pp. 1067-1074.*
106. Koopmans B. N., Richetti E. Optimal geological data extraction from SPOT Radar synergism with samples from Djebel Amour (Algeria), Red Sea Hills (Sudan), Sirte Basin (Libya) and Magdalena Valley (Colombia) // *From Optics to Radar, SPOT and ERS Applications, Conference Proceedings, 10 - 13 May 1993, Paris, France, pp. 263 - 274.*
107. Loercher G., Wever T. Integrated use of optical and radar data from the MACEurope campaign 1991 for geological mapping of the Hekla area // *Proceedings First International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Strasbourg, France, 11 - 15 September 1994, pp. III-471- III-478.*
108. Ehlers M. Multisensor image fusion techniques in remote sensing // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1991, №46, pp.19 - 30.*
109. Welch R., Jordon T. R., Luvall J. C. Geocoding and stereo display of tropical forest multisensor data sets. *Photogrammetric Engineering and*

Remote Sensing, 1990, №56, pp.1389 - 1392.

110. Pohl C. Geometric aspects of multisensor image fusion for topographic map updating in the humid Tropics. IT C publication 1996, No. 39 (Enschede: ITC), ISBN 90 61641217.
111. Raggam J., Almer A., Strobl D. A combination of SAR and optical line scanner imagery for stereoscopic extraction of 3-D data // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1994, №49, pp.11 - 21.
112. Toutin T., Rivard B. A new tool for depth perception of multi-source data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1995, №61, pp.1209 - 1211.
113. Mouat D. A., Mahin G. G., Lancaster J. Remote sensing techniques in the analysis of change detection // Geocarto International, 1993, №2, pp.39 - 50.
114. Злобин В.К., Еремеев В.В. Обработка аэрокосмических изображений. – М.: Физматлит, 2006. – 288 с.
115. Hall David L. Handbook of multisensor data fusion. Theory and practice / David L. Hall, James Llinas. – [2th ed.]. – CRC Press. Taylor & Francis Group, 2009. – 872 p.
116. Eskicioglu M., Fisher P. S. Image quality measures and their performance / IEEE Transactions on Communications, vol. 43, № 12, Dec. 1995, pp. 2959-2965
117. Saghri J. A. Image quality measure based on a human visual system model // Optical Engineering, vol. 28, № 7, July 1989, pp. 813-818.
118. Netravali A. N., Haskell B. G. Digital Pictures: Representation and Compression, New York: Plenum. - 1988.
119. Mannos J. L., Sakrison D. J. The effects of a visual fidelity criterion on the encoding of images // IEEE Transactions on Information Theory, vol. 20, №4, 1974, pp. 525-536.
120. Watson A. B. DCT quantization matrices visually optimize for individual images // Human Vision, Visual Processing and Digital Display

- IV, Proc. SPIE, vol. 1913, 1993, pp. 202-216.
121. Mayache A. M., Eude T., Cherifi H. A comparison of image quality models and metrics based on human visual sensitivity // IEEE International Conference on Image Processing, vol. 3 Oct. 1998, pp. 409-413
 122. Van den Branden Lambrecht C. J. Color moving pictures quality metric // IEEE International Conference on Image Processing, vol. 1, 1996, pp. 885-888.
 123. Poirson A. B., B. A. Wandell Pattern-color separable pathways predict sensitivity to simple colored patterns // Vision Research, vol. 36, № 4, 1996, pp. 515-526.
 124. Ryan D., Tinkler R. Night pilotage assessment of image fusion // Proceedings of Helmet and Head-Mounted Displays and Symbology Design Requirements, vol. 2465, 1995, pp. 50–67.
 125. Toet A., Ijspeert J.K., Waxman A.M., Aguilar M. Fusion of visible and thermal imagery improves situational awareness, in: Proceedings of SPIE Conference on Enhanced and Synthetic Vision, vol. 3088, 1997, pp. 177–188.
 126. Toet A., Franken E.M. Perceptual evaluation of different image fusion schemes, February 2003, pp.25–37.
 127. Fuhrmann D.R., Baro J.A., Cox J.R. Experimental evaluation of psychophysical distortion metrics for JPEG-encoded images // Journal of Electronic Imaging, № 4, 1995, pp.397–406.
 128. Zhang X., Wandell B.A. Colour image fidelity metrics evaluated using image distortion maps // Signal Processing Vol.70, №3, 1998, pp.201–214.
 129. Lukas F.X.J., Budrikis Z.L. Picture quality prediction based on a visual model // IEEE Transactions on Communications, Vol. 30, №7, 1982, pp.1679–1692.
 130. Lian M.-S. Image evaluation using a color visual difference predictor (CVDP) // Human Vision and Electronic Imaging VI, The International Society for Optical Engineering, Bellingham, WA, 2001, pp. 175–186.

131. Winkler S. Perceptual distortion metric for digital color video // Human Vision and Electronic Imaging IV, Bellingham, WA, The International Society for Optical Engineering, 1999, pp. 175–184.
132. Zhang X., Silverstein D.A., Farrell J.E., Wandell B.A. Color Image Quality Metric S-CIELAB and its Application on Halftone Texture, 2000.
133. Young S. S. Signal processing and performance analysis for imaging systems / S. S. Young, R. G. Driggers, E. L. Jacobs. – Artech House Publisher, New York, 2008. – 304 p.
134. М. С. Рибалко, В. І. Микитенко, О. Д. Мамута Оцінка показників якості комплексованих зображень в двоканальних ОЕСС // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2011. – №4. – С. 57-62.
135. Kullback S. On information and sufficiency / S. Kullback, R. A. Leibler // The Annals of Mathematical Statistics. – 1951. – Vol. 22, № 1. – pp. 79-86.
136. Renyi A. Some fundamental questions of information theory / A. Renyi // Selected papers of Alfred Renyi. – 1976. – Vol. 3. – pp. 526-552.
137. Classen T. A. C. M. The Wigner distribution – a tool for time-frequency signal analysis. Part II: Discrete-time signals / T. A. C. M. Classen, W. F. G. Mecklenbrauker // Philips Journal of Research. – 1980. – Vol. 35. – pp. 276-300.
138. Xydeas C. S. Objective image fusion performance measure / C. S. Xydeas, V. Petrovic // Electronics Letters. – 2000. – Vol. 36, № 4. – pp. 308-309.
139. Eckert M. P., Bradley A. P. Perceptual quality metrics applied to still image compression // Signal Processing, vol. 70, 1998, pp. 177–200.
140. Winkler S. A perceptual distortion metric for digital color video // Proc. SPIE, vol. 3644, 1999, pp. 175–184.
141. Winkler S. Issues in vision modeling for perceptual video quality assessment // Signal Processing, vol. 78, 1999, pp. 231–252.

142. Pappas T. N., Safranek R. J. Perceptual criteria for image quality evaluation // Handbook of Image and Video Proc. Academic Press. - 2000.
143. Wang Z., Sheikh H. R., Bovik A. C. Objective video quality assessment / The Handbook of Video Databases: Design and Applications, CRC Press. - 2003.
144. Heeger D. J., Teo P. C. A model of perceptual image fidelity // Proc. IEEE Int. Conf. Image Proc., 1995, pp. 343–345.
145. Simoncelli E. P., Freeman W. T., Adelson E. H. Shiftable multi-scale transforms // IEEE Trans. Information Theory, vol. 38, 1992, pp. 587–607.
146. Watson A. B., Hu J., McGowan J. F. III. DVQ: A digital video quality metric based on human vision // Journal of Electronic Imaging, vol. 10, № 1, 2001, pp. 20–29.
147. Bradley A. P. A wavelet visible difference predictor // IEEE Trans. Image Processing, vol. 5, May 1999, pp. 717–730.
148. Watson A. B. The cortex transform: rapid computation of simulated neural images // Computer Vision, Graphics, and Image Processing, vol. 39, 1987, pp. 311–327.
149. Watson A.B., Solomon J. A. Model of visual contrast gain control and pattern masking // Journal of Optical Society of America, vol. 14, №9, 1997, pp. 2379–2391.
150. Van Dijk M., Martens J. B. Subjective quality assessment of compressed images // Signal Processing, Vol.58, 1997, pp.235–252.
151. Avcibas I., Sankur B., Sayood K. Statistical evaluation of image quality measures / Journal of Electronic Imaging, №11(2), April 2002, pp.206–223.
152. International Commission of Illumination (CIE) Recommendations on uniform color spaces, color difference equations, psychometric color terms / Publication CIE 15 (E-1.3.1), Supp. 2, Bureau Central de la CIE, Vienna. – 1971.
153. Jain K. Fundamentals of Digital Image Processing, Prentice-Hall, 1989.

154. Andreutos D., Plataniotis K. N., Venetsanopoulos A. N. Distance measures for color image retrieval // IEEE International Conference On Image Processing, IEEE Signal Processing Society, Chicago, 1998.
155. Pratt W. K. Digital Image Processing, Wiley, New York. -1978.
156. Carevic D., Caelli T. Region based coding of color images using KLT // Graph. Models Image Process. vol.59, №1, 1997, pp.27–38.
157. Basseville M. Distance measures for signal processing and pattern recognition // Signal Process. 18, 1989, pp.349–369.
158. Frese T., Bouman C. A., Allebach J. P. Methodology for designing image similarity metrics based on human visual system models // Proc. SPIE /IS&T Conf. on Human Vision and Electronic Imaging II, vol.3016, 1997, pp.472–483.
159. Wang Z., Bovik A.C. A universal image quality index, IEEE Signal Processing Letters, vol.9, №3, 2002, pp.81–84.
160. Toet A., Lucassen M.P. A new universal colour image fidelity metric / Displays №24. – 2003. - pp. 197–207.
161. Zhang Z., Blum R. A categorization of multiscale-decompositionbased image fusion schemes with a performance study for a digital camera application, Proceedings of the IEEE, vol.87, №8, 1999, pp.1315–1326.
162. Xydeas C., Petrovic V. Objective pixel-level image fusion performance measure // Proceedings of SPIE, vol. 4051, 2000, pp. 88–99.
163. Vollmerhausen R. H. The targeting task performance (TTP) metric. A new model for predicting target acquisition performance / Richard H. Vollmerhausen, Eddie Jacobs // Technical report AMSEL-NV-TR-230. – 2004. – 126 p.
164. Мамута М.С., Колобродов В.Г., Микитенко В.І. Оцінка ефективності багатоканальних оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням інформації // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2012. – № 6. – С.127–131.
165. Rodgers J. L., Nicewander W. A. Thirteen ways to look at the

- correlation coefficient // *The American Statistician*. – 1988. – Vol. 42, №1. – pp. 59–66.
166. Holst Gerald C. *Electro-optical imaging system performance*. 2nd ed. – Winter Park, Florida: JCD Publishing, 2000. – 438 p.
167. Barten Peter G.J. Formula for the contrast sensitivity of the human eye // *Proc. SPIE*. – 2004. – Vol. 5294. – pp. 231-238.
168. Vollmerhausen R. H., Jacobs E., Driggers R.G. New metric for predicting target acquisition performance // *Optical Engineering*. – 2004. – Vol. 43, № 11. – pp. 2806-2818.
169. Vollmerhausen, R. H., Reago D., Driggers R. G. *Analysis and evaluation of sampled imaging systems*. – SPIE Press, 2010. – 304 p.

Наукове видання

Колобродов Валентин Георгійович

Микитенко Володимир Іванович

**КОМПЛЕКСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ
В БАГАТОКАНАЛЬНИХ ОПТИКО-
ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ
СПОСТЕРЕЖЕННЯ**

Монографія

В авторській редакції

Підп. до друку 15.10.2013. Формат 60x84