

УДК 528.7:681.3

**Методика комплексного дешифрування  
зональних аерокосмічних знімків  
з використанням оптичного приладу синтезу  
3**

**В. М. Фроленко**

Академія Збройних сил України, Київ

*Надійшла до редакції 06.12.96*

В роботі викладена методика комплексного дешифрування аерокосмічних знімків з використанням оптичного приладу синтезу. Розглянуті моделі формування зонального оптичного сигналу в бортовій апаратурі дистанційного спостереження, синтезування зображення об'єкта у заданому кольорі та забезпечення найбільшої колірної відмінності між об'єктом і фоном на синтезованому зображенні. Приведена методика дозволяє скоротити загальний час дешифрування та підвищити вірогідність розпізнавання об'єктів за матеріалами багатоспектрального аерокосмічного моніторингу.

**ОСОБЛИВОСТІ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНОЇ  
АЕРОЗЙОМКИ**

Для дешифрування спектрозональних зображень (рис. 1), які отримуються багатоспектральними оптико-електронними системами дистанційного спостереження (ОЕСДС) (Петрук, 1988), використовуються оптичні прилади синтезу ПС-1 та ПС-4 (Киенко и др., 1987). Типовий оптичний прилад синтезу містить в собі декілька однакових проекційних каналів, кожний з яких проектує зображення окремого зонального аерознімка на спільній проглядовий екран. Прецизійне сполучення вихідних зображень та індивідуальний підбір спектрального складу та інтенсивності оптичного випромінювання в кожному з проекційних каналів приводять до формування єдиного синтезованого зображення з досить широким інтервалом оптичних властивостей.

Прилади синтезу дозволяють робити дешифрування як окремих зональних аерознімків, так і комплексне дешифрування їх комплектів у чорно-білих, природних або умовних кольорах.

© В. М. ФРОЛЕНКО, 1997

Перевагою комплексного дешифрування багатозональних матеріалів аерокосмічного моніторингу є можливість отримання повного набору дешифрувальних ознак об'єктів і скорочення часу дешифрування за рахунок позбавлення від необхідності послідовного перегляду монохроматичних зображень, сформованих у кожній спектральній зоні. Крім того, додаткові дешифрувальні ознаки несе у собі коваріація між різними зональними зображеннями. Безпосереднє сприйняття цієї інформації, що містить у собі попарні та групові співвідношення аерознімків комплекту, дешифрувальником практично неможливе.

Кольоровий знімок у порівнянні з чорно-білим містить додаткову розпізнавальну ознаку об'єктів, а саме їх колір, що полегшує дешифрування у ряді випадків. Аерозйомка на спектrozональні аероплівки забезпечує одержання зображень об'єктів в умовних кольорах, які різко відрізняються один від одного. Ця властивість спектrozональних зображень дозволяє виявляти деякі види маскування, більш чітко спостерігати межі ділянок місцевості, рослинності, водних поверхонь. При спектroz-

нальній аерозйомці з'являються нові дешифрувальні ознаки — колірні контрасти, але для правильного їх розпізнавання дешифрувальнику потрібні спеціальні навички, а також адаптаційний період. Для його скорочення спектрозональне зображення дешифрують сумісно з чорно-білим зображенням, одержаним у видимому спектральному діапазоні.

Однак колірні і спектrozональні аероплівки у порівнянні з чорно-білими мають значно меншу роздільну здатність та низьку світлоочутливість. Крім того, спектrozональні аероплівки реєструють інформацію тільки у двох (рідше — у трьох) діапазонах короткохвильового оптичного випромінювання. Використання оптичних приладів синтезу

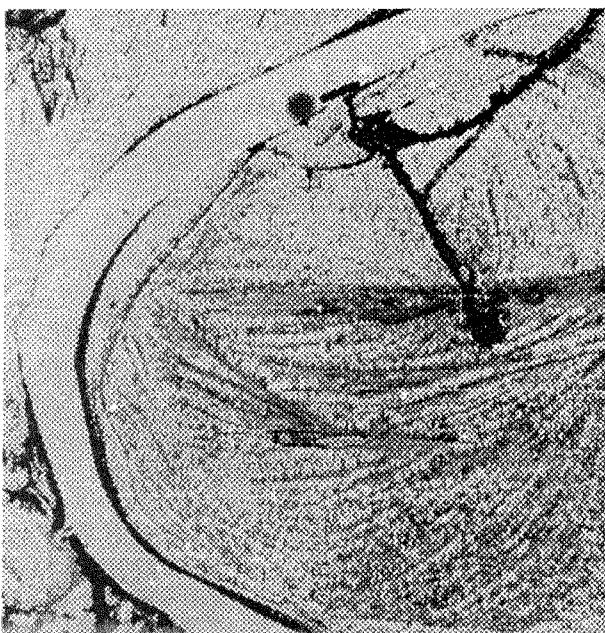
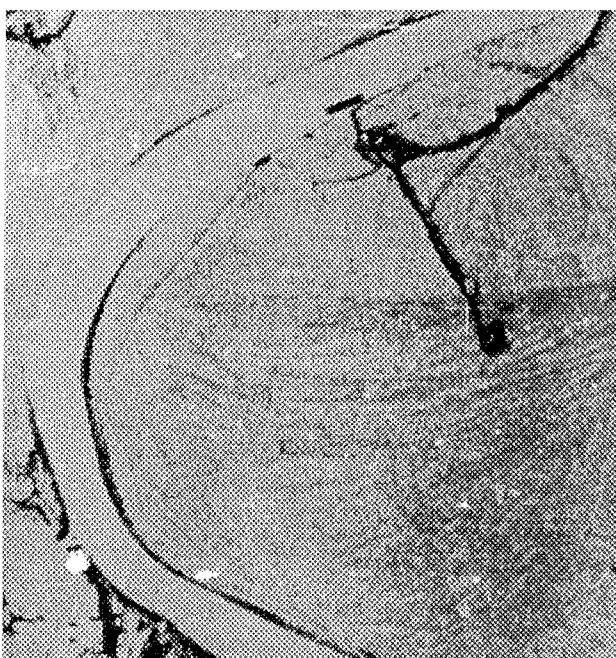
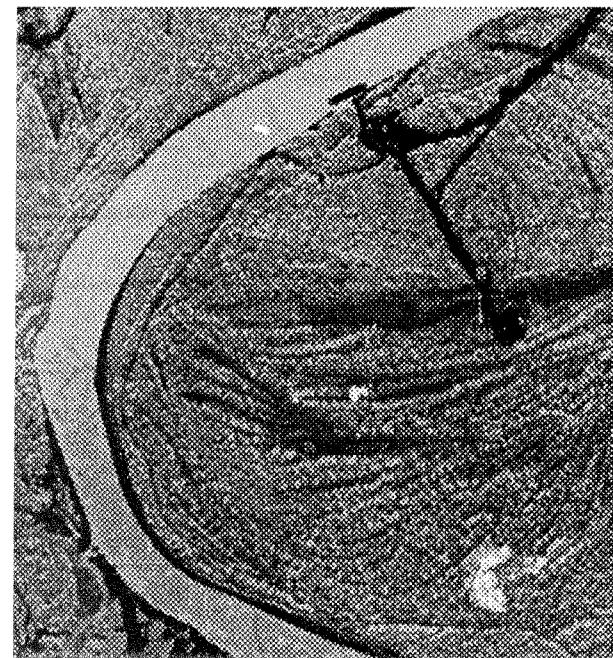


Рис. 1. Вихідні зональні зображення в каналах 1, 2, 4, 6

дозволяє формувати із зональних чорно-білих аерознімків колірносинтезовані зображення, які перевищують за інформативністю звичайні спектrozональні і колірні аерознімки. Важливою особливістю колірного синтезування є можливість обирати і змінювати кольори об'єктів на синтезованому зображені, що забезпечує найбільші колірні відмінності об'єктів дистанційного спостереження.

### МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ЗОНАЛЬНОГО ОПТИЧНОГО СИГНАЛУ

Зональним оптичним сигналом є оптична щільність аероплівки  $D_\phi$ , експонованої у вузькому спектральному діапазоні  $\Delta\lambda$  та підданої відповідній хіміко-фотографічній обробці. З теорії фотографічного процесу (Фрізер, 1978) відомо, що

$$D_\phi = \gamma_\phi \lg H_\phi + D_G, \quad (1)$$

де  $\gamma_\phi = \text{const}$  — коефіцієнт контрастності фотоплівки,  $H_\phi$  — експозиція,  $D_G$  — оптична щільність неекспонованої фотоплівки після хіміко-фотографічної обробки.

Розглянемо спрощений процес формування зонального оптичного сигналу у фотографічній та скануючій ОЕСДС з електронним трактом і фотографічним реєстратором (рис. 2).

Відбитий від аероландшафту поток оптичного випромінювання  $\Phi$  пов'язаний з падаючим потоком  $\Phi_o$  (Мирошников, 1983) як

$$\Phi = \rho_o \Phi_o, \quad (2)$$

де  $\rho_o$  — спектральний коефіцієнт відбивання елемента аероландшафту в діапазоні  $\Delta\lambda$ . Потік  $\Phi_\tau$ , що надходить до фотоприймача або фотоприймача, пропорційний вхідному потоку:

$$\Phi_\tau = \tau_o \Phi_o, \quad (3)$$

де  $\tau_o$  — сумарний спектральний коефіцієнт пропускання середовища та оптичної системи. Вихідний сигнал фотоприймача  $U_n$  подається на відеопідсилювач з коефіцієнтом підсилення  $\alpha_n$  і далі на оптичний модулятор з коефіцієнтом передачі  $\sigma_m$ . При цьому

$$U_n = \sigma_m \Phi_\tau, \quad (4)$$

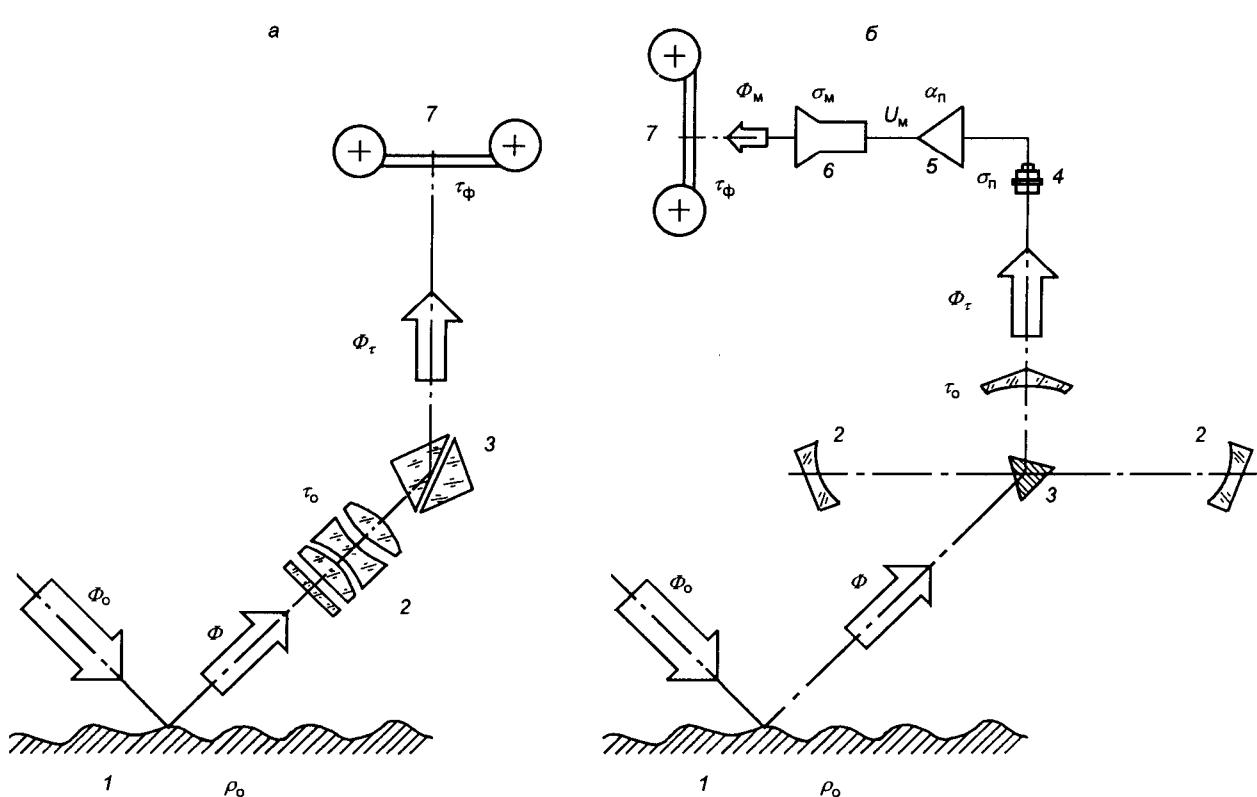


Рис. 2. Схема формування зонального оптичного сигналу в ОЕСДС: фотографічний (а) та скануючий з електронним трактом (б); 1 — аероландшафт, 2 — приймальна оптика, 3 — оптичний дефлектор, 4 — фотоприймач, 5 — відеопідсилювач, 6 — оптичний модулятор, 7 — фотоприймач

$$U_m = \alpha_n U_n, \quad (5)$$

$$\Phi_m = \sigma_m U_m, \quad (6)$$

де  $\sigma_n$  — спектральна чутливість фотоприймача,  $\Phi_m$  — вихідний оптичний потік модулятора. Спектральний склад потоку  $\Phi_m$  не обов'язково відповідає діапазону  $\Delta\lambda$  і може бути погоджений зі спектральною чутливістю реєструючої фотоплівки.

Підстановка співвідношень (2)–(6) в (1) з урахуванням  $H_\phi \sim \Phi_m t_\phi$ , де  $t_\phi$  — час експонування, дозволяє одержати

$$D_\phi = \gamma_\phi \lg(\rho_o \tau_o \sigma_n \alpha_n \sigma_m \Phi_o t_\phi) + D_G. \quad (7)$$

В сучасних ОЕСДС параметри  $\tau_o$  і  $t_\phi$  не є постійними і використовуються для регулювання експозиції за умовами

$$\tau_o \Phi_o t_\phi = \text{const}. \quad (8)$$

В деяких ОЕСДС з електронним трактом (Ллойд, 1978) функції регулювання замість  $t_\phi$  виконує параметр  $\alpha_n$ . В усякому разі можна записати

$$D_\phi = \gamma_\phi \lg(\rho \beta_\phi) + D_G, \quad (9)$$

де  $\beta_\phi$  — деяка константа, характеристика ОЕСДС. Переходячи від оптичних щільностей до коефіцієнтів пропускання  $D_\phi = -\lg \tau_\phi$ , після нескладних перетворень одержуємо

$$\tau_\phi = \frac{C_\phi}{\rho_o^{\gamma_\phi}}, \quad (10)$$

де  $C_\phi$  — константа. Формула (10) визначає зв'язок зонального оптичного сигналу зі спектральною відбивальною здатністю об'єкта аерокосмічного моніторингу.

#### МОДЕЛЬ СИНТЕЗУ ЗОБРАЖЕННЯ ОБ'ЄКТА У ЗАДАНОМУ КОЛЬОРІ

Кольоровий зір людини ґрунтуються на наявності у зоровому апараті трьох типів хеморецепторів, кожний з яких є чутливим в своїй спектральній зоні (Кривошеев и Кустарев, 1990). Колір елемента зображення — це суб'єктивне відчуття, зумовлене відповідною комбінацією трьох фізіологічних сигналів. Слід відзначити, що однакове сприйняття кольору може викликатись потоками оптичного випромінювання різного спектрального складу.

Нехай зоровий апарат десифрувальника приймає оптичний сигнал  $\Phi(\lambda)$ , спектральний склад якого ілюструється рис. 3. Оптико-фізіологічний сигнал  $S_i$  на  $i$ -му хеморецепторі,  $i = 1, 2, 3$ , складе

$$S_i = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \Phi(\lambda) V_i(\lambda) d\lambda, \quad (11)$$

де  $V_i(\lambda)$  — функція спектральної чутливості  $i$ -го хеморецептора. Значення величин  $S_i$  для кожного з уніфікованих стандартних кольорів можуть бути зatabульовані і занесені до атласу кольорів.

Синтезування зображення об'єкта дистанційного спостереження у заданий колір  $\langle S_i \rangle$  передбачає отримання відповідного оптико-фізіологічного сигналу у кожному проекційному каналі приладу синтезу. Порядок розрахунків пояснюється рис. 4. Припустимо, що в  $i$ -му проекційному каналі приладу за допомогою регульованого джерела підсвітки інтенсивністю  $\Phi_i$  та зонального оптичного світлофільтра зі спектральним коефіцієнтом пропускання  $\tau_{oi}$  сформовано потік випромінювання в настільки вузькому спектральному діапазоні  $\Delta\lambda_i$ , що в його межах значення спектральної чутливості хеморецептора  $V_i$  можна вважати незмінним. Тоді потрібний оптико-фізіологічний сигнал (11) повинен бути

$$S_i = \tau_{oi} \tau_{\phi i} \Phi_i \Delta\lambda_i V_i, \quad (12)$$

де  $\tau_{\phi i}$  — зональний коефіцієнт пропускання діапазону  $\Delta\lambda_i$  фотоплівки, що встановлена в  $i$ -му проекційному каналі приладу. Вважаючи величини  $\tau_{oi}$  і  $\Phi_i$  лінійно пов'язаними зі своїми задаючими параметрами — кутом повороту  $\omega_i$  нейтрального світлофільтра і напругою живлення  $U_i$  джерела підсвітки

$$\tau_{oi} = \alpha_i \omega_i, \quad (13)$$

$$\Phi_i = \sigma_i U_i, \quad (14)$$

де  $\alpha_i$  і  $\sigma_i$  — відповідні коефіцієнти пропорційності, одержуємо

$$\omega_i U_i = \beta_i \frac{S_i}{\tau_{\phi i}}, \quad (15)$$

де

$$\beta_i = \frac{1}{\alpha_i \sigma_i \Delta\lambda_i V_i} = \text{const}$$

— характеристика каналу синтезування. Співвідношення (15) дозволяє визначити потрібні положення органів регулювання оптичного приладу синтезу для отримання його зображення у заданому кольорі. Зокрема, якщо в банку даних про об'єкти аерокосмічного моніторингу містяться значення їхніх спектральних коефіцієнтів відбивання  $\rho_{oi}$  в спектральних діапазонах реєстрації, то (15) з ура-

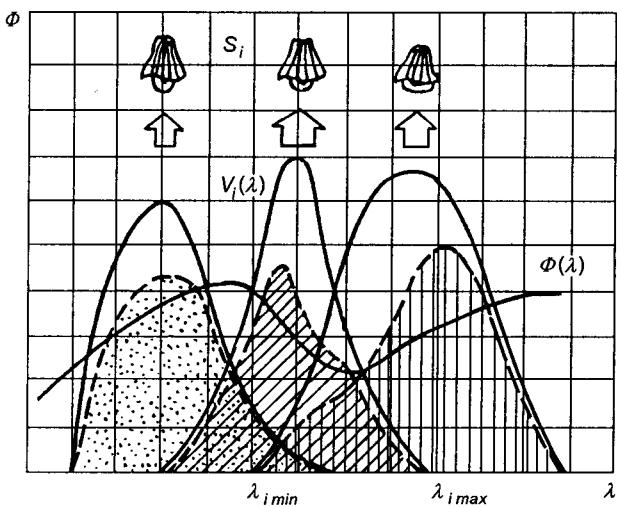


Рис. 3. Схема формування оптико-фізіологічних сигналів у зоровому апараті

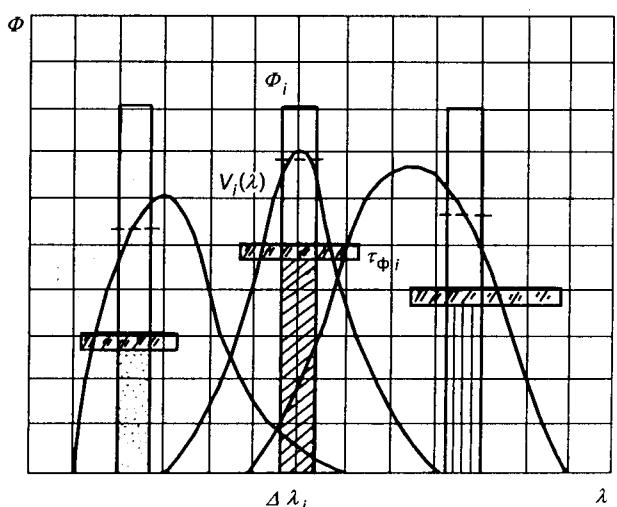


Рис. 4. Схема формування оптико-фізіологічних сигналів у пристрії синтезу

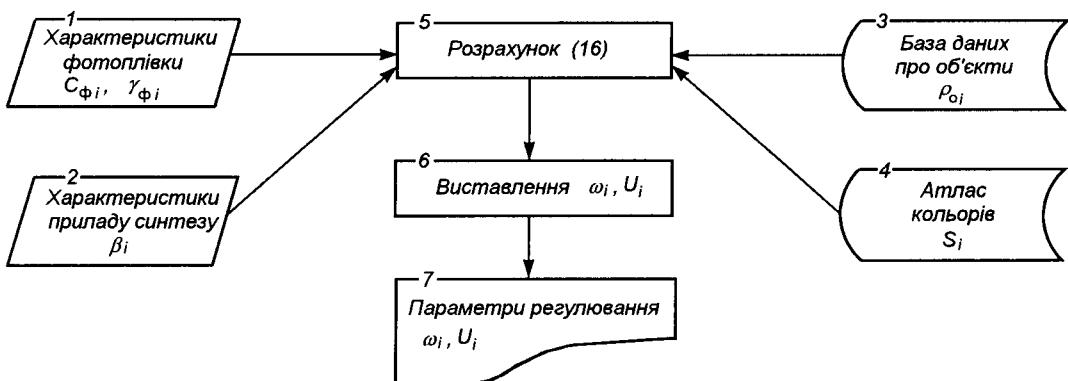


Рис. 5. Схема алгоритму визначення параметрів регулювання оптичного пристрію синтезу

хуванням (10) перепишеться у вигляді

$$\omega_i U_i = \frac{\beta_i}{C_{\phi i}} S_i \rho_{oi}^{\gamma_{\phi i}}. \quad (16)$$

Склад вихідних даних та порядок розрахунків параметрів синтезування зображення об'єкта на екрані пристрію синтезу у заданий колір пояснюється рис. 5.

Очевидно, що колір  $\langle S_i \rangle$  зображення об'єкта, що синтезується, ніяк не пов'язаний з його реальною відбивальною здатністю і з його природним кольором. Це дозволяє вживати при синтезуванні для практично будь-якого об'єкта такий колір, який істотно полегшує його виявлення та розпізнавання дешифрувальником.

Більш того, використання фотоприймачів, спектральна чутливість яких лежить за межами видимо-

го діапазону, дає можливість синтезувати псевдо-колірне зображення об'єкта, яке несе інформацію про його спектральні властивості, що не сприймаються людиною безпосередньо. Наявність додаткових розпізнавальних ознак об'єкта, наприклад відбивальної (випромінювальної) здатності в УФ- чи ІЧ-діапазонах, важлива для вирішення певних завдань дешифрування. Інформаційна цінність такого синтезованого зображення досить висока.

#### МОДЕЛЬ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАЙБІЛЬШОЇ КОЛІРНОЇ ВІДМІННОСТІ МІЖ ОБ'ЄКТОМ І ФОНОМ НА СИНТЕЗОВАНУМУ ЗОБРАЖЕННІ

Викладена вище модель дає можливість синтезувати зображення об'єкта в будь-який заданий колір.

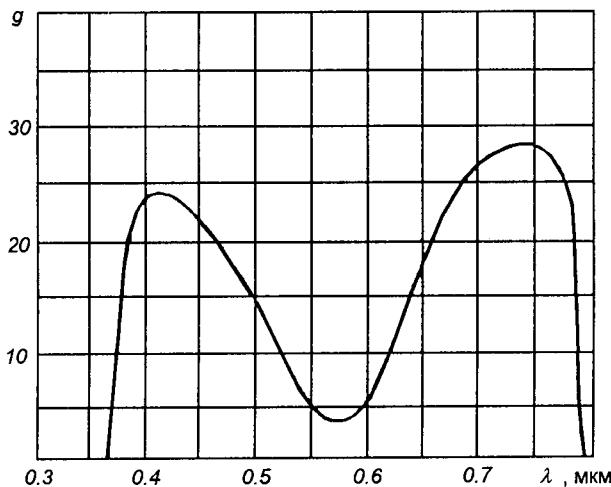


Рис. 6. Залежність кількості розрізнюваних градацій  $g$  кольору від еквівалентної довжини хвилі  $\lambda$

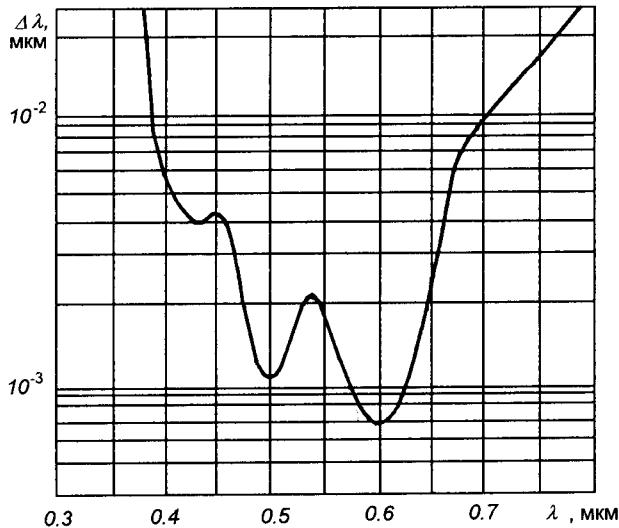


Рис. 7. Залежність порогу колірної відмінності  $\Delta\lambda$  двох монохроматичних променів від довжини хвилі  $\lambda$

Але який колір треба вважати заданим? З одного боку, це може бути колір, еквівалентна довжина хвилі якого відповідає найбільшій кількості порогів розрізnenня за насиченістю (рис. 6). Це червоний або синій коліори. З іншого боку, для стійкого виявлення об'єкта на синтезованому зображені потрібен колірний контраст його з оточуючим фоном. А найбільш помітні відмінності колірного тону (рис. 7) лежать в області еквівалентних довжин хвиль 0.5 і 0.6 мкм — блакитно-зелені та жовтогарячі коліори (Фроленко, 1990).

Зробимо оцінку колірного контраста об'єкта та фону на синтезованому зображені. Припустимо,

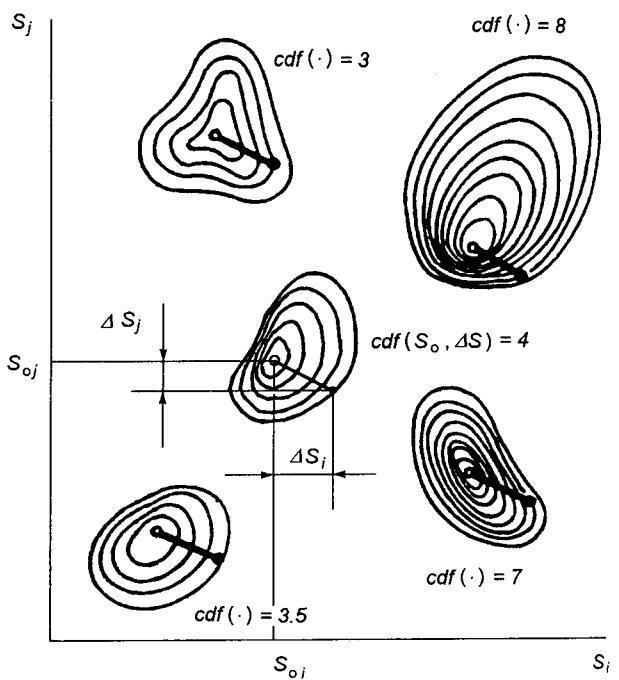


Рис. 8. Функція колірної відмінності

що об'єкт зі спектральними коефіцієнтами відбиття  $\rho_{oi}$  розташовано на фоні зі спектральними коефіцієнтами відбиття  $\rho_{\phi i}$ . Тоді при визначенні параметрів регулювання оптичного приладу синтезу згідно з (16) колір фону  $\langle S_{\phi i} \rangle$  складатиме

$$S_{\phi i} = \frac{C_{\phi i}}{\beta_i} \frac{\omega_i U_i}{\rho_{\phi i}^{\gamma_{\phi i}}} . \quad (17)$$

Після підстановки (16) в (17) можна одержати

$$S_{\phi i} = S_{oi} \left( \frac{\rho_{oi}}{\rho_{\phi i}} \right)^{\gamma_{\phi i}} . \quad (18)$$

Із співвідношення (18) виходить, що колірна відмінність об'єкта від фону на синтезованому зображені  $\Delta S_i$  для кожного оптико-фізіологічного сигналу становитиме

$$\Delta S_i = S_{oi} \left[ 1 - \left( \frac{\rho_{oi}}{\rho_{\phi i}} \right)^{\gamma_{\phi i}} \right] . \quad (19)$$

Через те, що колірний простір є неметричним відносно колірно-розрізняльних властивостей зору (Джадд и Вишецки, 1978), емпіричним шляхом може бути визначена і затабульована функція колірної відмінності (colour difference function,  $cdf$ ), яка кожній точці колірного простору ставить у відповідність систему поверхонь рівних колірних відмінностей (рис. 8). Тоді за відомими значеннями

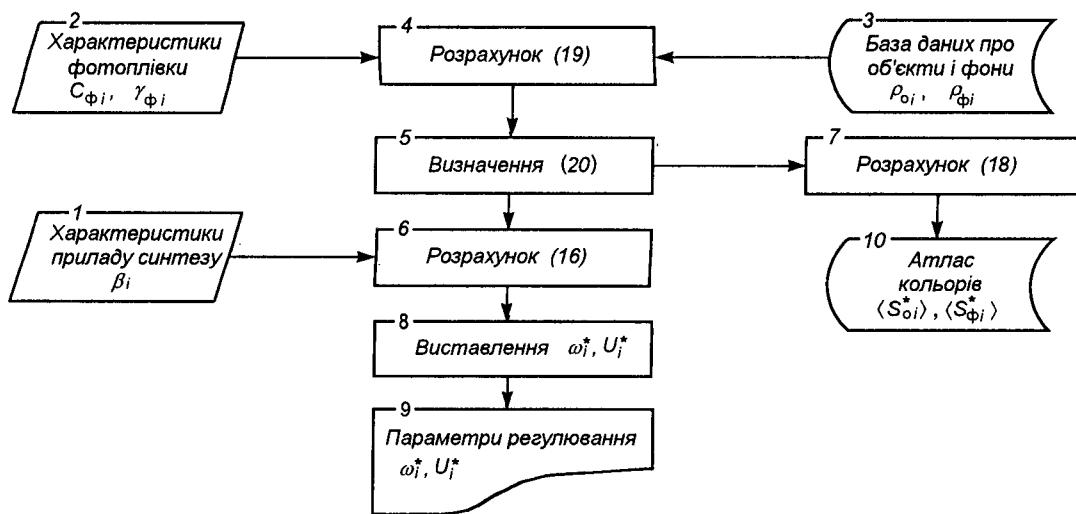


Рис. 9. Схема алгоритму визначення параметрів регулювання оптичного приладу синтезу та оптимальних кольорів синтезування

множників колірних відмінностей в (19) та з допомогою повного перебору або градієнтного пошуку в колірному просторі (Полак, 1974) можна знайти оптимальний колір синтезування  $\langle S_{oi}^* \rangle$  за умовою

$$\langle S_{oi}^* \rangle = \underset{\langle S_{oi} \rangle}{\operatorname{argmax}} \operatorname{cdf}\left[\langle S_{oi} \rangle, \langle S_{oi} \left( \frac{\rho_{oi}}{\rho_{\phi i}} \right)^{\gamma_{\phi i}} \rangle\right]. \quad (20)$$

Вибір кольору  $\langle S_{oi}^* \rangle$  як заданого забезпечує найбільшу колірну відмінність між об'єктом і фоном на синтезованому зображення. Після визначення оптимального кольору синтезування можна розраховувати не тільки параметри регулювання оптичного приладу синтезу за вищевикладеним алгоритмом, але і характеристики кольору фону на синтезованому зображені згідно з (18).

Порядок визначення параметрів синтезування зображення об'єкта аерокосмічного моніторингу для забезпечення найбільшої колірної відмінності його від зображення фону пояснюється рис. 9.

#### ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ МЕТОДИКИ

В загальному вигляді процес дешифрування комплекту зональних аерознімків (Аковецкий, 1983) складається з таких чотирьох рівнів: введення в дешифрувальну обстановку, пошуку і виявлення об'єктів, розпізнавання і аналізу стану об'єктів, поєднання і загальної оцінки інформації.

На першому етапі після доведення завдання на виконання обробки матеріалів аерокосмічного моніторингу визначаються: очікувані характеристики

об'єктів і фонів, що спостерігаються; спектральні діапазони, в яких буде здійснюватися аерозйомка; відповідні характеристики бортової реєструючої та наземної оброблюючої апаратури; кількісні параметри кольорів, в які будуть синтезуватися зображення об'єктів спостереження, якщо не передбачається досягнення максимального колірного контрасту. Такі вихідні дані дозволяють провести попередні розрахунки значень параметрів регулювання оптичного приладу синтезу згідно з алгоритмами рис. 6 чи рис. 9.

На другому етапі робляться такі операції: встановлення зональних монохроматичних аеронегативів в прилад синтезу; сполучення зональних аерознімків на проглядовому екрані; настройка параметрів синтезування у кожному проекційному каналі приладу, що приводить до формування кольорового (псевдоколірного) синтезованого зображення; візуальне виявлення забарвлених у заданий, завчасно відомий, або попередньо визначений колір об'єктів на синтезованому зображені.

На третьому етапі розпізнавання виявленіх об'єктів, визначення їхніх координат, виявлення окремих елементів і слідів діяльності та аналіз стану можуть проводитися як на синтезованому зображені, так і на якомусь з вихідних. По завершенні пошуку об'єкта на колірно-синтезованому зображені і визначення його місцезнаходження на проглядовому екрані приладу синтезу рекомендується переходити для подальшого його дешифрування до зонального аерознімка, який має найкращу роздільність, що наперед перевищує роздільність синтезованого зображення (Фроленко, 1990).

Слід відзначити, що роздільність зонального зображення залежить не тільки від кутової роздільністі спектрального каналу ОЕСДС, а також від тонового контрасту  $K_{\phi i}$ ,

$$K_{\phi i} = \frac{\Delta\tau_{\phi i}}{\tau_{\phi i}}, \quad (21)$$

об'єкта і фону (Мельканович, 1984):

$$d_i = d_{i\max} \sqrt{2/K_{\phi i} - 1}, \quad (22)$$

де  $d_i$  — лінійна роздільність  $i$ -го спектрального каналу на місцевості,  $d_{i\max}$  — та ж лінійна роздільність у випадку  $K_{\phi i} = 1$ , тобто від спектральних характеристик самого об'єкта і фону. Підстановка (10) в (21) дозволяє записати (22) у вигляді

$$d_i = d_{i\max} \sqrt{1 + (\rho_\phi/\rho_o)^{\gamma_\phi}}. \quad (23)$$

Четвертий етап практично не відрізняється від заключного рівня дешифрування будь-яких матеріалів видового аерокосмічного моніторингу і передбачає можливість повторного звернення до синтезованого зображення або до одного зі зональних за потребою.

Впроваджені дослідження (Фроленко и Шевчук, 1992) свідчать, що загальний час комплексного дешифрування зональних аерознімків, отриманих на багатоспектральній ОЕСДС типу MSK-4 з використанням оптичного приставки синтезу ПС-4, зменшується у 2—4 рази порівняно зі способом послідовного дешифрування комплекту зональних аерознімків.

Таким чином, приведена методика комплексного дешифрування монохроматичних зональних аерознімків дозволяє значно скоротити термін та полегшити процес дешифрування, а також виділити додаткові розпізнавальні ознаки об'єктів аерокосмічного моніторингу і підвищити повноту та вірогідність отриманих даних.

- Аковецкий В. И. Дешифрирование снимков. — М.: Недра, 1983.—374 с.  
 Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике: Пер. с англ. — М.: Мир, 1978.—513 с.  
 Киенко Ю. П., Киселев В. В., Орлов Ю. К. Новые отечественные приборы синтеза многозональных изображений // Геодезия и картография.—1987.—№ 8.—С. 45—51.  
 Кривошеев М. И., Кустарев А. И. Цветовые измерения. — М.: Энергоатомиздат, 1990.—240 с.  
 Ллойд Дж. Системы тепловидения: Пер. с англ. — М.: Мир, 1978.—414 с.  
 Мельканович А. Ф. Фотографические средства и их эксплуатация. — М.: МО СССР, 1984.—576 с.  
 Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. — Л.: Машиностроение, 1983.—696 с.  
 Петрук А. И. Многозональные аэрофотоаппараты. — Киев: КВВАИУ, 1988.—54 с.  
 Полак Э. Численные методы оптимизации. Единый подход: Пер. с англ. — М.: Мир, 1974.—376 с.  
 Фризер Х. Фотографическая регистрация информации. — М.: Мир, 1978.—670 с.  
 Фроленко В. Н. Проведение фотометрических и спектрометрических исследований по материалам многозональной съемки: Отчет о НИР № ПС54-90/03. — Киев: КНИИКАМ, 1990.—66 с.  
 Фроленко В. Н., Шевчук В. П. К вопросу использования перспективных многозональных аэроснимков для получения синтезированных изображений // Матер. XXXII науч. конф. училища. — Киев: КВВАИУ, 1992.—С. 98—102.

#### SYNTHESIS TECHNIQUE FOR COMPLEX INTERPRETATION OF ZONAL AEROSPACE IMAGES WITH THE USE OF AN OPTICAL DEVICE

V. M. Frolenko

The synthesis technique for complex interpretation of aerospace images with the use of an optical device is discussed. Models of formation of a zonal optical signal in the onboard equipment of remote sensing, synthesizing of the image of object to the determined colour, and providing the greatest colour distinction between object and background in the synthesized image are considered. The technique allows us to reduce the total time of interpretation and to raise the reliability of object identification from the data of multispectral aerospace monitoring.