

УДК 528.7:681.3

## Моделі оптимального синтезування зональних аерокосмічних знімків

В. М. Фроленко

Академія Збройних сил України, Київ

*Надійшла до редакції 12.03.97*

---

В роботі приведено набір кількісних моделей, який дозволяє за характеристиками об'єктів та фонів аерокосмічного моніторингу визначити параметри оптимального в розумінні максимізації колірної відмінності на синтезованому зображенні регулювання оптичного приладу синтезу. Викладені результати комп'ютерного моделювання процесу колірного синтезування комплектів зональних аерокосмічних знімків для ряду типових об'єктів та фонів аерокосмічного моніторингу.

---

Багатозональне аерознімання, тобто паралельне отримання декількох зображень дистанційного спостереження аероландшафту у відмінних вузьких діапазонах оптичного спектру, все більш ширше впроваджується в системах аерокосмічного моніторингу. Багатоспектральне аерознімання, у порівнянні з чорно-білим, колірним (у видимому діапазоні), ІЧ або спектрально-зональним, має значно вищу інформативність та суттєву можливість отримання повного набору дешифрувальних ознак об'єктів за матеріалами аерокосмічного моніторингу [2]. Перевагою багатозонального аерознімання є висока роздільна здатність та велике значення відношення «сигнал/завада» в кожному спектральному каналі завдяки тому, що його характеристики можуть бути оптимізовані для кожного спектрального діапазону незалежно від інших.

Однак багатозональне аерознімання має ряд вагомих недоліків. Зональні аерозображення є монохроматичними і не використовують таку дешифрувальну ознаку, як колір об'єктів. З іншого боку, дуже часто окремі зональні зображення містять в собі всю інформацію, необхідну для успішної інтерпретації матеріалів багатозонального аерознімання. При цьому інформативні зони не є незмінними для різноманітних комбінацій «об'єкт/фон» [14]. Для скорочення часу дешифрування потрібний механізм, спроможний відбирати інформативні зональні

зображення. Крім того, якщо кількість інформативних зображень більша за одиницю, виникає запитання про їх оптимальне комбінування для сприйняття оператором-дешифрувальником. В цьому разі найефективнішим видається колірне синтезування зональних зображень [10].

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Найпоширенішим сьогодні є оптичне синтезування зональних аерокосмічних зображень, яке виконується за допомогою оптичних приладів синтезу [4]. Оптичний прилад синтезу окремо проектує кожне із зональних зображень до спільного проглядового екрану, на якому відбивається їх прецизійне сполучення. Регулювання спектрального складу та відносної інтенсивності оптичного випромінювання в проєкційних каналах оптичного приладу дозволяє змінювати кольори об'єктів і фонів на синтезованому зображенні. Зараз невідомі методи підбору параметрів оптимального регулювання оптичних приладів синтезу, тобто такого регулювання, яке забезпечувало б найбільшу колірну відмінність між об'єктом і фоном на синтезованому зображенні. Метою роботи є розробка послідовності моделей, придатних для визначення параметрів оптимального регулювання оптичного приладу синтезу.

ПОРЯДОК КОЛОРИМЕТРИЧНИХ РОЗРАХУНКІВ

Метою колориметричних розрахунків в процесі моделювання оптичного синтезу зональних аерокосмічних знімків було визначення колірної контрасту між заданими зразками об'єктів та фонів на колірносинтезованому зображенні при встановленій комбінації параметрів регулювання оптичного приладу синтезу. Для виконання колориметричних розрахунків застосована стандартна міжнародна колориметрична система CIE XYZ 1931 [5].

В сучасних приладах синтезу [4] регулювання в кожному з проєкційних каналів здійснюється шляхом зміни спектрального складу випромінювання джерела підсвітлювання введенням певного кольорового світлофільтра, а також шляхом зменшення загальної інтенсивності потоку введенням додаткового нейтрального світлофільтра або зниженням напруги джерела підсвітлювання. Розглянемо спрощену схему  $j$ -го проєкційного каналу приладу синтезу (рис. 1).

Потік оптичного випромінювання спектрального розподілу  $\Phi^{(j)}(\lambda)$ , інтенсивність якого визначається напругою живлення  $U^{(j)}$

$$\Phi^{(j)}(\lambda) = \Phi_n^{(j)}(\lambda) \left( \frac{U^{(j)}}{U_n^{(j)}} \right)^{\gamma_U}, \quad (1)$$

де  $U_n^{(j)}$  — номінальна напруга джерела підсвітлювання  $j$ -го проєкційного каналу,  $\Phi_n^{(j)}(\lambda)$  — спектральний розподіл оптичного потоку при номінальній напрузі,  $\gamma_U$  — коефіцієнт регулювання оптичного потоку напругою [1], а також коефіцієнтом пропускання нейтрального світлофільтра  $\tau_n^{(j)}$ :

$$\Phi_n^{(j)}(\lambda) = \tau_n^{(j)} \Phi^{(j)}(\lambda). \quad (2)$$

Використання стандартних колориметричних формул [5] дозволяє одержати колірні координати об'єкту  $\langle X_o^{(j)}, Y_o^{(j)}, Z_o^{(j)} \rangle$ , сформовані  $j$ -м проєкційним каналом на проглядовому екрані оптичного приладу синтезу:

$$X_o^{(j)} = 100 \frac{\int_{\bar{x}(\lambda) > 0} \Phi_n^{(j)}(\lambda) \left( \frac{U^{(j)}}{U_n^{(j)}} \right)^{\gamma_U} \tau_o^{(j)} \tau_c^{(j)}(\lambda) \tau_o^{(j)}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda}{\int_{\bar{y}(\lambda) > 0} \Phi_n^{(j)}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}, \quad (3)$$

та фону  $\langle X_\phi^{(j)}, Y_\phi^{(j)}, Z_\phi^{(j)} \rangle$  за аналогією, де  $\tau_c^{(j)}(\lambda)$  — спектральний розподіл оптичного пропускання світлофільтра  $j$ -го проєкційного каналу,  $\tau_o^{(j)}(\lambda)$  і  $\tau_\phi^{(j)}(\lambda)$  — спектральні коефіцієнти пропускання відповідно об'єкта та фону зонального аерознімка в  $j$ -му проєкційному каналі,  $x(\lambda)$ ,  $y(\lambda)$ ,  $z(\lambda)$  — криві додавання колориметричної системи CIE XYZ 1931 (рис. 2).

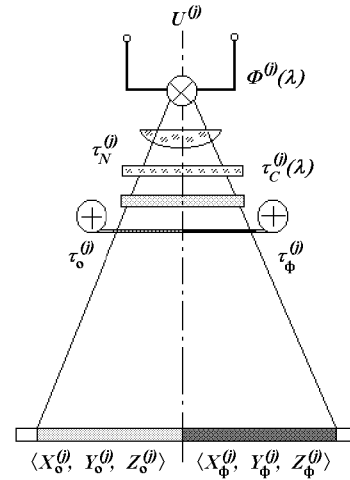


Рис. 1. Схема формування колірної контрасту об'єкта і фону в проєкційному каналі оптичного приладу синтезу

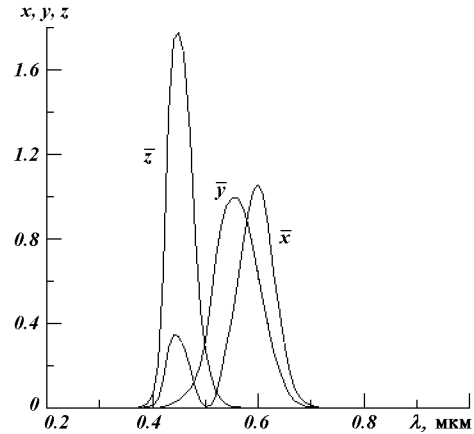


Рис. 2. Криві додавання колориметричної системи CIE XYZ 1931

Оскільки величини  $U^{(j)}$ ,  $U_n^{(j)}$ ,  $\gamma_U$  і  $\tau_n^{(j)}$  не залежать від довжини хвилі  $\lambda$ , то вони можуть бути винесені за знак інтеграла, і формули (3) приймають такий вигляд:

$$X_o^{(j)} = 100 \frac{w_n^{(j)} \int_{\bar{x}(\lambda) > 0} \Phi_n^{(j)}(\lambda) \tau_c^{(j)} \tau_o^{(j)}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda}{\int_{\bar{y}(\lambda) > 0} \Phi_n^{(j)}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}, \quad (4)$$

де

$$w_n^{(j)} = \left( \frac{U^{(j)}}{U_n^{(j)}} \right)^{\gamma_U} \tau_n^{(j)} \quad (5)$$

— коефіцієнт передавання оптичного сигналу  $j$ -го каналу приладу синтезу.

Колірний контраст між об'єктом та фоном, виражений в порогах розрізнення зорового апарату  $\Delta E$ , повністю визначається їх кольорами  $\langle X_o^{(j)}, Y_o^{(j)}, Z_o^{(j)} \rangle$

та  $\langle X_{\phi}^{(j)}, Y_{\phi}^{(j)}, Z_{\phi}^{(j)} \rangle$ . Особливістю колірному простору є неевклідовість, тобто поверхня одиничного контрасту в ньому не є сферою. Для забезпечення можливості вимірювання колірному контрасту необхідно мати таблицю його значень для будь-якої пари точок колірному простору, або здійснити перехід до деякого нового евклідового чи квазіевклідового.

Перша можливість може бути реалізована тільки з невисокою роздільністю (еліпсоїди Мак-Адама [11]), друга — потребує нелінійного перетворення колірному простору, так звані рівноконтрастні системи, і також має невисоку точність збігу з експериментальними даними [13]. В роботі для оцінки колірному контрасту використовувалося стандартна міжнародна рівноконтрастна колориметрична система CIE LAB 1994 [12].

В такій системі кількість порогів колірної відмінності  $\Delta E$  визначається як

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L/w_L)^2 + (\Delta C/w_C)^2 + (\Delta H/w_H)^2}, \quad (6)$$

де  $\Delta L = L_o - L_{\phi}$  — різниця яскравостей об'єкта і фону,  $\Delta C = C_o - C_{\phi}$  — відмінність за колірністю між об'єктом і фоном,  $\Delta H = H_o - H_{\phi}$  — відмінність за насиченістю між об'єктом і фоном,  $w_L, w_C, w_H$  — відповідні вагові коефіцієнти. Величини  $L, C$  і  $H$  розраховуються за формулами

$$L_o = 116\sqrt{Y_o/Y_n} - 16, \quad (7)$$

$$C_o^2 = A_o^2 + B_o^2, \quad (8)$$

$$\Delta H^2 = 2(C_o C_{\phi} - A_o A_{\phi} - B_o B_{\phi}), \quad (9)$$

де  $A_o, B_o$  — допоміжні колірні величини, які визначаються таким чином:

$$A_o = 500(\sqrt[3]{X_o/X_n} - \sqrt[3]{Y_o/Y_n}), \quad (10)$$

$$B_o = 200(\sqrt[3]{Y_o/Y_n} - \sqrt[3]{Z_o/Z_n}), \quad (11)$$

де  $X_n, Y_n, Z_n$  — колірні координати нейтрально-білого кольору в колориметричній системі XYZ.

Наприклад, для стандартного колориметричного джерела підсвітлювання  $D_{65}$  [5]  $X_n = 95.0448, Y_n = 100.00, Z_n = 108.8918$ .

Стандартна колориметрична система CIE LAB 1994 рекомендує такі значення вагових коефіцієнтів в формулі (6) [12]:

$$\begin{aligned} w_L &= 1.00, \\ w_C &= 1 + 0.045\sqrt{C_o C_{\phi}}, \\ w_H &= 1 + 0.015\sqrt{C_o C_{\phi}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Тепер для розрахунку колірної відмінності згідно з (4)—(12), якщо спектральні розподіли  $\Phi_n^{(j)}(\lambda)$  та  $\tau_c^{(j)}(\lambda)$  відомі, необхідно отримати значення коефіцієнтів оптичного пропускання зональних зобра-

жень об'єкта і фону  $\tau_o^{(j)}(\lambda)$  і  $\tau_{\phi}^{(j)}(\lambda)$ , які визначаються їх спектральними характеристиками, а також властивостями реєструючої апаратури аерокосмічного моніторингу.

#### МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ЗОНАЛЬНОГО ОПТИЧНОГО СИГНАЛУ

Переважає більшість існуючих багатоспектральних систем аерокосмічного моніторингу є фотографічними або обладнаними фотографічними реєстраторами зображення [6]. В таких системах спектральні розподіли  $\tau_o^{(j)}(\lambda)$  і  $\tau_{\phi}^{(j)}(\lambda)$  із (4) можна вважати постійними у всьому діапазоні  $\Delta\lambda^{(j)}$  спектральної чутливості  $S_{\lambda}$  фотоплівки:

$$\bar{\tau}^{(j)} = \frac{1}{\Delta\lambda^{(j)}} \int_{S_{\lambda} > 0} \tau_o^{(j)}(\lambda) d\lambda, \quad (13)$$

де величини  $\tau_o^{(j)}(\lambda)$  і  $\tau_{\phi}^{(j)}(\lambda)$  треба розглядати як спектральні складові оптичного пропускання фотоплівки в зображеннях об'єкта і фону відповідно. В подальшому усі викладки будемо робити тільки для розрахунку оптичного пропускання зонального аерознімка об'єкта, тому що для фону вони аналогічні.

Розглянемо спрощену схему формування  $j$ -го зонального оптичного сигналу у багатоспектральній фотографічній системі (рис. 3).

Очевидно, що оптичний потік на фотоплівці  $\Phi_s^{(j)}(\lambda)$  складе

$$\Phi_s^{(j)}(\lambda) = \Phi_o^{(j)}(\lambda)\rho_o(\lambda)\tau_a(\lambda)\tau_s^{(j)}(\lambda), \quad (14)$$

де  $\Phi_o^{(j)}(\lambda)$  — спектральний розподіл потоку оптичного випромінювання джерела освітлювання аероландшафту,  $\rho_o(\lambda)$  — спектральний коефіцієнт відбиття об'єкта аерознімання,  $\tau_a(\lambda)$  — спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери,  $\tau_s^{(j)}(\lambda)$  — сумарний спектральний коефіцієнт пропускання зонального світлофільтра та оптичної системи  $j$ -го каналу багатоспектральної системи аерокосмічного моніторингу.

Експонетричне регулювання каналу аерофотографічної системи повинне забезпечувати попадання діючої експозиції  $H_s^{(j)}(\lambda)$  до лінійної ділянки характеристичної кривої фотоплівки [8], рівняння якої (рис. 4) може бути записане у вигляді

$$\lg \frac{1}{\tau_o^{(j)}(\lambda)} - \lg \frac{1}{\tau_G} = \gamma_s^{(j)}(\lambda) [\lg H_s^{(j)}(\lambda) - \lg H_G^{(j)}(\lambda)], \quad (15)$$

де  $\tau_G$  — коефіцієнт пропускання неекспонованої фотоплівки після хіміко-фотографічної обробки,

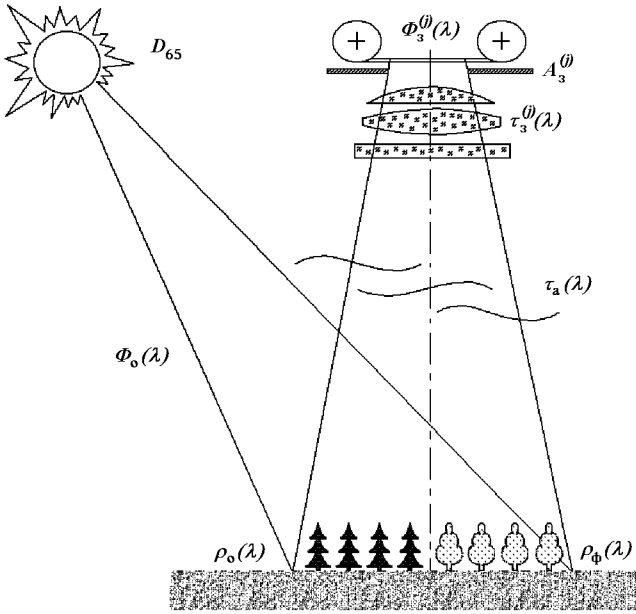


Рис. 3. Схема формування зонального оптичного сигналу в каналі багатоспектральної аерофотографічної системи

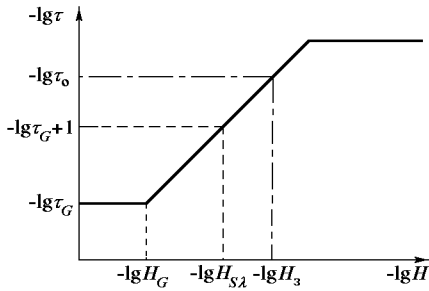


Рис. 4. Лінійна апроксимація характеристичної кривої фотоплівки

$\gamma_s^{(j)}(\lambda)$  — спектральний коефіцієнт контрастності фотоплівки,  $H_G^{(j)}(\lambda)$  — максимально неактивна експозиція фотоплівки. Із (15) випливає

$$\tau_o^{(j)}(\lambda) = \tau_G \left[ \frac{H_G^{(j)}(\lambda)}{H_s^{(j)}(\lambda)} \right] \gamma_s^{(j)}(\lambda). \quad (16)$$

Величину  $H_G^{(j)}(\lambda)$  можна визначити через спектральну чутливість  $S_\lambda^{(j)}(\lambda)$  фотоплівки. Відомо [3], що

$$S_\lambda^{(j)}(\lambda) = \frac{1}{H_s^{(j)}(\lambda)}, \quad (17)$$

і після підстановки (17) в (15) з урахуванням лінійності характеристичної кривої фотоплівки можна записати

$$\lg \frac{1}{\tau_G} + 1 - \lg \frac{1}{\tau_G} = \gamma_s^{(j)}(\lambda) \left[ \lg \frac{1}{S_\lambda^{(j)}(\lambda)} - \lg H_G^{(j)}(\lambda) \right], \quad (18)$$

звідки

$$H_G^{(j)}(\lambda) = \frac{1}{S_\lambda^{(j)}(\lambda) 10^{1/\gamma_s^{(j)}(\lambda)}}. \quad (19)$$

Підстановка (19) в (16) дає

$$\tau_o^{(j)}(\lambda) = \frac{\tau_G}{10} [S_\lambda^{(j)}(\lambda) H_s^{(j)}(\lambda)]^{-\gamma_s^{(j)}(\lambda)}. \quad (20)$$

Експозиція  $H_s^{(j)}(\lambda)$  пропорційна освітленості  $\Phi_s^{(j)}(\lambda)/A_s$  ( $A_s$  — площа експонованої ділянки) та часу експонування  $t_s$ :

$$H_s^{(j)}(\lambda) = k_s \frac{\Phi_s^{(j)}(\lambda)}{A_s} t_s, \quad (21)$$

де  $k_s$  — коефіцієнт пропорційності.

Нехай регулювання експозиції в зональному каналі здійснюється за умови забезпечення заданого оптичного пропускання  $\tau_o^{(j)}$  при середніх значеннях оптичного потоку  $\Phi_s^{(j)}$  в каналі, спектральної світлочутливості  $S_\lambda^{(j)}$  і коефіцієнта контрастності  $\gamma_s^{(j)}$  фотоплівки:

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}_s^{(j)} &= \frac{1}{\Delta\lambda^{(j)}} \int_{S_\lambda > 0} \Phi_s^{(j)}(\lambda) d\lambda, \\ \bar{S}_\lambda^{(j)} &= \frac{1}{\Delta\lambda^{(j)}} \int_{S_\lambda > 0} S_\lambda^{(j)}(\lambda) d\lambda, \\ \bar{\gamma}_s^{(j)} &= \frac{1}{\Delta\lambda^{(j)}} \int_{S_\lambda > 0} \gamma_s^{(j)}(\lambda) d\lambda, \end{aligned} \quad (22)$$

Підстановка значень (21) і (22) замість відповідних величин в (20) приводить до

$$\tau_o^{(j)}(\lambda) = \frac{\tau_G}{10} \left[ \bar{S}_\lambda^{(j)} \frac{k_s t_s}{A_s} \bar{\Phi}_s^{(j)} \right]^{-\bar{\gamma}_s^{(j)}}, \quad (23)$$

звідки можна визначити вираз  $k_s t_s / A_s$  і підставити його з урахуванням (21) в (20):

$$\tau_o^{(j)}(\lambda) = \frac{\tau_G}{10} \left[ \frac{S_\lambda^{(j)}(\lambda)}{\bar{S}_\lambda^{(j)}} \frac{\Phi_s^{(j)}(\lambda)}{\bar{\Phi}_s^{(j)}} \right]^{-\gamma_s^{(j)}(\lambda)} \left( \frac{\tau_G}{10 \tau_o^{(j)}} \right)^{-\gamma_s^{(j)}(\lambda) / \bar{\gamma}_s^{(j)}}. \quad (24)$$

Таким чином, послідовне застосування співвідношень (14) та (24) дозволяє отримати спектральний розподіл складових оптичного пропускання в зональних негативних зображеннях об'єкта і фону (для останнього потрібно замінити в (14) спектральний коефіцієнт відбивання об'єкта  $\rho_o(\lambda)$  спектральним коефіцієнтом відбивання фону  $\rho_f(\lambda)$ ). Повні ж значення коефіцієнтів оптичного пропускання зображень об'єкта та фону можуть бути розраховані за співвідношеннями (13).

**МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ КОЛІРНОСИНТЕЗОВАНОГО ЗОБРАЖЕННЯ**

Розглянемо систему із  $m$  проєкційних каналів оптичного приладу синтезу, схема кожного з яких відповідає рис. 1. Коли система джерел підсвітлювання відрегульована таким чином, що вона описується системою оптичних коефіцієнтів передавання  $\{w_n^{(j)}\}$ ,  $j = 1, \dots, m$  згідно з (5), тоді сумарний оптичний потік підсвітлювання з урахуванням (1) і (2) складе

$$\bar{\Phi}_s^{(j)}(\lambda) = \sum_{j=1}^m w_n^{(j)} \Phi_n^{(j)}(\lambda), \quad (25)$$

а сумарний оптичний потік на проглядовому екрані оптичного приладу синтезу для зображень об'єкта і фону складе

$$\Phi_o(\lambda) = \sum_{j=1}^m w_n^{(j)} \bar{\tau}_o^{(j)} \tau_c^{(j)}(\lambda) \Phi_n^{(j)}(\lambda), \quad (26)$$

де  $\tau_c^{(j)}(\lambda)$  — спектральний розподіл оптичного пропускання кольорового світлофільтра в  $j$ -му проєкційному каналі оптичного приладу синтезу, а величини  $\tau_o^{(j)}$  і  $\tau_f^{(j)}$  визначаються співвідношенням (13). Тоді за аналогією з (4) можна визначити кольори об'єкта  $X_o, Y_o, Z_o$  і фону  $X_f, Y_f, Z_f$  на синтезованому зображенні, та з урахуванням співвідношень (26) і (25) одержуємо

$$X_o = 100 \frac{\int_{\bar{x}(\lambda) > 0} \sum_{j=1}^m [w_n^{(j)} \bar{\tau}_o^{(j)} \tau_c^{(j)}(\lambda) \Phi_n^{(j)}(\lambda)] \bar{x}(\lambda) d\lambda}{\int_{\bar{y}(\lambda) > 0} \sum_{j=1}^m [w_n^{(j)} \Phi_n^{(j)}(\lambda)] \bar{y}(\lambda) d\lambda}, \quad (27)$$

Вводячи позначення

$$\bar{w}_n^{(j)} = w_n^{(j)} / \sum_{i=1}^m w_n^{(i)}, \quad j = 1, \dots, m, \quad (28)$$

та

$$\bar{w}_o(\lambda) = \sum_{j=1}^m \bar{w}_n^{(j)} \bar{\tau}_o^{(j)} \tau_c^{(j)}(\lambda), \quad (29)$$

де  $w_n^{(j)}$  — нормований коефіцієнт передавання оптичного сигналу  $j$ -го каналу приладу синтезу,  $w_o(\lambda)$  і  $w_f(\lambda)$  — спектральні коефіцієнти синтезування зображень об'єкта і фону відповідно, та вважаючи спектральний розподіл оптичного потоку при номінальній напрузі живлення однаковим для усіх  $m$  каналів оптичного приладу синтезу і рівним  $\Phi_n(\lambda)$ , співвідношення (27) можна записати у спрощеному вигляді:

$$X_o = 100 \frac{\int_{\bar{x}(\lambda) > 0} \bar{w}_o^{(j)} \Phi_n^{(j)}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda}{\int_{\bar{y}(\lambda) > 0} \Phi_n(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}. \quad (30)$$

Співвідношення (30) дозволяють розраховувати кольори об'єкта і фону на синтезованому зображенні, а потім — і колірний контраст між ними за формулами (6) — (12) для усякого можливого регулювання в кожному з каналів приладу синтезу. Однак для практичного застосування колірного синтезування комплекту зональних аерозображень необхідно розв'язувати обернену задачу — розшукати множину можливих регулювань оптичного приладу синтезу, які забезпечують колірну відмінність між об'єктом і фоном на синтезованому зображенні, не меншу, ніж задана. В окремому випадку найцікавішим є оптимальне регулювання, тобто те, що забезпечує максимально можливу колірну відмінність об'єкта від фону на синтезованому зображенні.

**МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ОПТИЧНОГО ПРИЛАДУ СИНТЕЗУ**

Згідно з (5) і (29) параметрами регулювання типового приладу синтезу є напруга джерела підсвітлювання, оптичне пропускання нейтрального світлофільтра (змінюють інтенсивність оптичного випромінювання в проєкційному каналі) та спектральна характеристика пропускання кольорового світлофільтра (змінює спектральний склад оптичного випромінювання в проєкційному каналі). Найкращим було б строге аналітичне розв'язання задачі оптимального регулювання оптичного приладу синтезу. Для цього шляхом послідовних підстановок отриманих раніше аналітичних виразів в порядку, проілюстрованому рис. 5, необхідно одержати залежність колірного контрасту синтезованого зображення від параметрів регулювання оптичного приладу синтезу  $\Delta E[\{U^{(j)}\}, \{\tau_n^{(j)}\}, \{\tau_c^{(j)}(\lambda)\}]$ , а потім дослідити її на екстремум при умовах

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \{U^{(j)}\}} \Delta E[\{U^{(j)}\}, \{\tau_n^{(j)}\}, \{\tau_c^{(j)}(\lambda)\}] &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial \{\tau_n^{(j)}\}} \Delta E[\{U^{(j)}\}, \{\tau_n^{(j)}\}, \{\tau_c^{(j)}(\lambda)\}] &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial \{\tau_c^{(j)}(\lambda)\}} \Delta E[\{U^{(j)}\}, \{\tau_n^{(j)}\}, \{\tau_c^{(j)}(\lambda)\}] &= 0, \end{aligned} \quad (31)$$

$j = 1, \dots, m.$

На практиці ж одержати аналітичну залежність  $\Delta E[\{U^{(j)}\}, \{\tau_n^{(j)}\}, \{\tau_c^{(j)}(\lambda)\}]$  неможливо, тому що усі спектральні характеристики, як правило, не існують в аналітичному вигляді і практично не можуть бути апроксимовані до нього. Крім того, більшість аналітичних функціоналів у схемі рис. 5

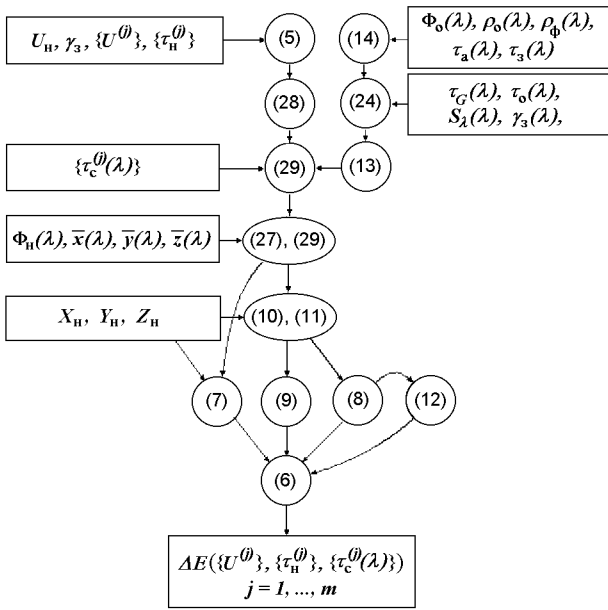


Рис. 5. Схема виведення аналітичної залежності кольорового контрасту на синтезованому зображенні від параметрів регулювання оптичного приладу синтезу

має трансцендентний вигляд.

Зрозуміло, що розв’язання системи рівнянь (31) повинні здійснюватися кількісними методами. Повний перебір усіх варіантів регулювання оптичного приладу синтезу потребує  $r^m$  розрахунків кольорового контрасту синтезованого зображення, якщо кількість зональних аерознімків і проєкційних каналів збігаються; тут  $r$  — кількість можливих регулювань в кожному з  $m$  проєкційних каналів. При наявності в оптичному приладі синтезу чотирьох проєкційних каналів, в кожному з яких можна вибирати одну із шести напруг підсвітлювання, одне з трьох значень пропускання нейтрального світлофільтра, та один з чотирьох (червоний, зелений, синій або нейтральний) кольорових світлофільтрів, кількість потрібних розрахунків при повному переборі складе

$$(6 \times 3 \times 4)^4 = 26\,873\,856.$$

Якщо кожний розрахунок кольорового контрасту триває всього 10 мс, то повний час розрахунку складе близько 75 год. Кількість потрібних розрахунків комбінаторно росте зі збільшенням числа відліків параметрів регулювання в кожному проєкційному каналі, що необхідно для підвищення точності регулювання.

Скоротити час визначення оптимального регулювання оптичного приладу синтезу можна, якщо припустити монотонність функції кольорової відмінності (б) в просторі параметрів регулювання, а

також відсутність її локальних максимумів в області можливого регулювання. Тоді оптимальне регулювання може бути знайдено, наприклад, методом градієнтного пошуку [9] у багатовимірному просторі параметрів регулювання оптичного приладу. Очевидно, що кількість потрібних ітерацій в процесі градієнтного пошуку суттєво зменшиться, і залежатиме від кроку дискретизації по кожному з параметрів регулювання.

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

Перевірка розроблених моделей здійснювалася на прикладі багатоспектральної аерофотографічної апаратури МКФ-6М [7] з використанням її в комплексі з оптичним приладом синтезу ПС-4 [4]. Необхідні для моделювання їх спектральні характеристики наведені у графічному вигляді на рис. 6—9. Як об’єкти та фони дистанційного спостереження розглядалися деякі елементи природного аероландшафту — рослини та оголення, а також сільськогосподарські насадження. Спектральні характеристики оптичного відбивання цих об’єктів аерокосмічного моніторингу наведені на рис. 10.

Заради скорочення обсягу розрахунків, потрібного для визначення оптимального регулювання оптичного приладу синтезу ПС-4, напруга джерела підсвітлювання у кожному з його чотирьох проєкційних каналів вважалася номінальною, а нейтральний світлофільтр забезпечував повне оптичне пропускання, або спектрально-рівномірне ослаблення оптичного потоку у 2.6 рази.

Колірне настроювання здійснювалося завдяки введенню чи невведенню в кожний проєкційний канал будь-якого з трьох кольорових (червоного, зеленого або синього) світлофільтрів. Також передбачалася можливість вимикання підсвітлювання в будь-якому проєкційному каналі. Результати, от-

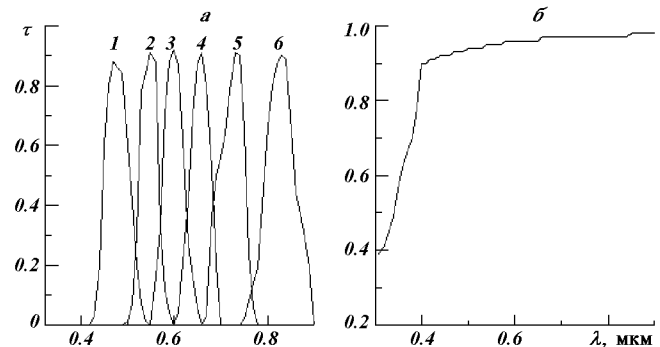


Рис. 6. Спектральні характеристики пропускання світлофільтрів апаратури МКФ-6М (а) та спектральне пропускання стандартної атмосфери (б) за дальністю 1200 м

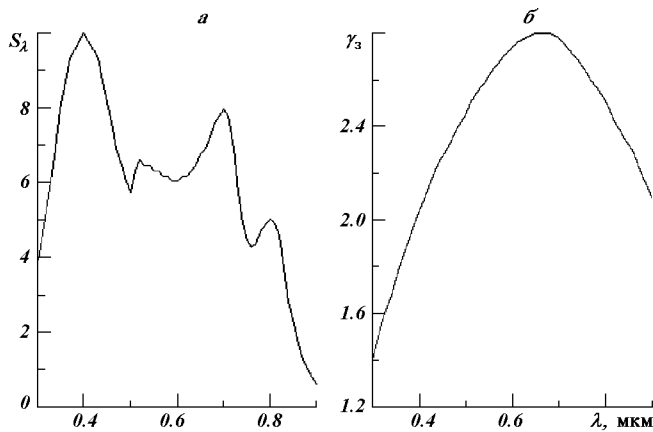


Рис. 7. Спектральні характеристики аерофотоплівки тип 18Л: *a* — світлочутливість, *б* — коефіцієнт контрастності

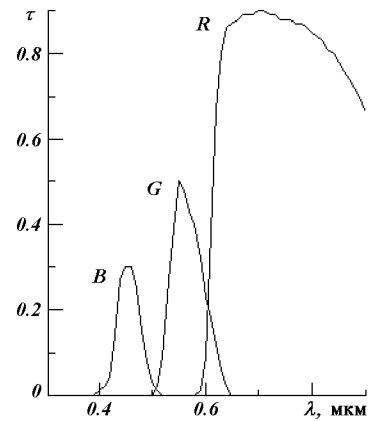


Рис. 9. Спектральні характеристики пропускання кольорових (*R* — червоний, *G* — зелений, *B* — синій) світлофільтрів проекційних каналів приладу ПС-4

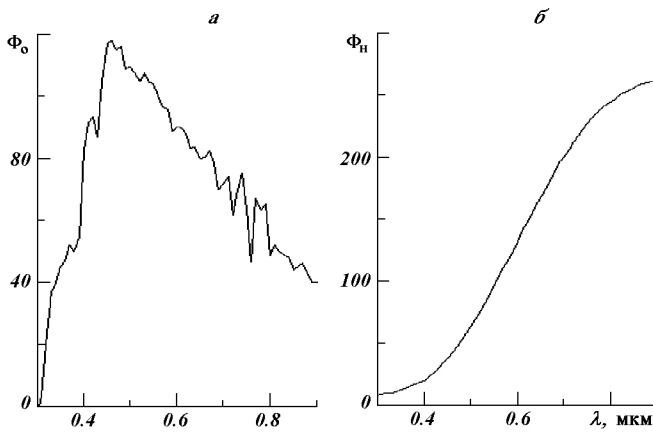


Рис. 8. Спектральні розподіли потоку оптичного випромінювання: *a* — стандартне джерело денного освітлювання  $D_{65}$ , *б* — галогенна лампа КГМ-30

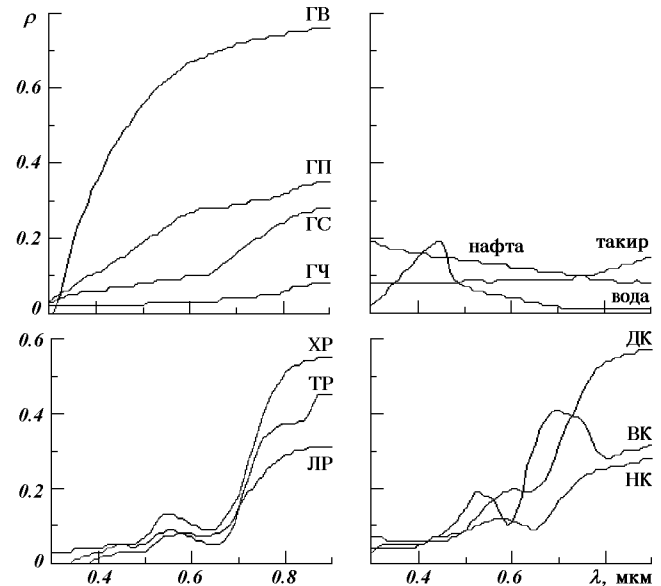


Рис. 10. Спектральні характеристики відбиття об'єктів аерокосмічного моніторингу: ГЧ — ґрунти чорноземні, ГС — ґрунти підзолисті і суглинисті, ГП — пісок та гірські породи, ГВ — вапняк, глина, ХР — хвойні породи рослин, ЛР — листяні породи рослин, ТР — різногравне співтовариство рослин, НК — неспілі польові культури, ДК — доспілі польові культури, ВК — виноградник

римані повним перебором усіх варіантів регулювання оптичного приладу синтезу для різноманітних сполучень «об'єкт—фон», наведені у таблиці.

**ОСНОВНІ ВИСНОВКИ**

На підставі отриманих результатів (таблиця) можна зробити такі основні висновки.

1. Значна більшість (90 %) досліджених комбінацій «об'єкт/фон» не потребує кольорового синтезування для забезпечення максимальної їх відмінності з точки зору сприймання оператором. Найбільший контраст відповідає одному з зональних аерознімків.

2. Тим не менше, багатозональне аерознімання видається значно вищим за інформативністю порівняно із звичайним тому, що зона максимального контрасту не є постійною для різноманітних об'єктів та фонів. Розподіл середньої відносної інформативності зональних аерознімків за спектральними зонами аерофотоапаратури МКФ-6М ілюстру-

Параметри оптимального регулювання оптичного приладу синтезу ПС-4 за умови забезпечення найбільшої колірної відмінності між об'єктом і фоном на колірносинтезованому зображенні МКФ-6М

Об'єкт	Фон, колірна відмінність, параметри регулювання									
Грунти чорноземні (ГЧ)	ГС (3.03) 5N1	ГП (4.02) 1G1+2B2+3B2+5R2								
Грунти опідзолисті і суглинисті (ГС)	ГП(1.28) 1N1	ГВ (0.99) 1G1+2B1+5R2	Такир (0.81) 5N1							
Пісок та гірські породи (ГП)	Такир (1.51) 1N1									
Вапняк, глина (ГВ)	ГП (0.51) 4N1	Такир (1.19) 1N1								
Водна поверхня	ГС (4.66) 4N1	ГП (4.26) 4N1	ГВ (4.77) 4N1	Такир (4.23) 4N1	XP (3.04) 5N1	ЛР (4.47) 5N1	ТР (8.10) 5N1	НК (3.10) 1N1	ВК (9.55) 3N1	
Нафта	ГС (1.43) 4N1	ГП (2.12) 1N1	ГВ (1.80) 1N1	Вода (3.23) 4N1	Такир (1.00) 4N1	XP (3.85) 5N1	ЛР (5.28) 5N1	ТР (8.91) 5N1		
Хвойні породи рослин (ХР)	ГС (3.03) 5N1	ГП (4.02) 1G1+2B2+3B2+5R2	ЛР (1.43) 5N1	ТР (5.06) 5N1						
Листяні породи рослин (ЛР)	ГС (4.46) 5N1	ГП (5.16) 5N1	ТР (3.77) 1B2+4R2+5G1+6B2							
Різноманітне співтовариство рослин (ТР)	ГЧ (5.06) 5N1	ГС (8.09) 5N1	ГП (8.79) 5N1	ГВ (8.83) 5N1	Такир (8.90) 5N1					
Неспілі польові культури (НК)	ГЧ (3.14) 1N1	ГС (2.90) 4N1	ХР (3.14) 1N1	ЛР (3.66) 5N1	ТР (7.28) 5N1					
Доспілі польові культури (ДК)	ГЧ (2.08) 5N1	ГС (1.14) 1G2+3B1+4G1+5R2	ХР (2.08) 5N1	ЛР (3.52) 5N1	ТР (7.14) 5N1	5N1	НК (1.80) 1G2+4B1			
Виноградник (ВК)	ГС (8.54) 3N1	ГП (8.07) 3N1	ЛР (9.53) 3N1	ЛР (9.71) 3N1	НК (9.89) 3N1	ДК (8.94) 3N1				

Примітка. В дужках — значення колірної відмінності в порогах рівноконтрастної системи CIE LAB 1994, знизу — параметри регулювання проєкційних каналів для МКФ-6М: ефективна довжина хвилі (1 — 0.48 мкм, 2 — 0.54 мкм, 3 — 0.60 мкм, 4 — 0.66 мкм, 5 — 0.72 мкм, 6 — 0.84 мкм); світлофільтри в проєкційних каналах (R — червоний, G — зелений, B — синій, N — нейтральний); коефіцієнти передавання в каналах (1 — 1.00, 2 — 0.37, 3 — 0.00)

ється рис. 11, яка отримана за результатами моделювання по сполученнях «об'єкт—фон» згідно з таблицею.

3. Колірне синтезування слід використовувати лише в особливо складних випадках дешифрування матеріалів багатозонального аерокосмічного моніторингу (наприклад, при оцінці ступеня спілості польових культур, аналізі ґрунтового складу місцевості, класифікації рослинного покриття тощо), при

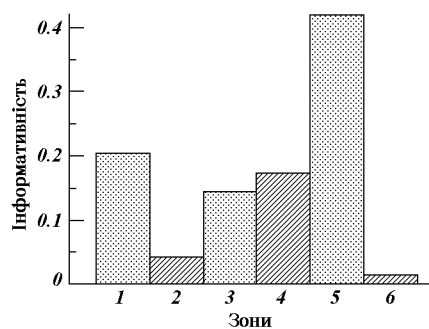


Рис. 11. Відносна інформативність спектральних зон аерофотоапаратури МКФ-6М

цьому в багатьох ситуаціях одне лише колірне синтезування дозволяє перевищити поріг виявлення колірної відмінності об'єкта від фону на зображенні.

4. Для отримання високої якості синтезованих зображень колірне синтезування зональних аерознімків на оптичному приладі синтезу повинно проводитися з застосуванням усіх наявних проєкційних каналів. Твердження про те, що для колірного синтезування завжди достатньо трьох проєкційних каналів, в загальному випадку не є вірним.

5. В ідеальному випадку кількість проєкційних каналів оптичного приладу синтезу повинна дорівнювати кількості робочих спектральних зон багатоспектральної апаратури аерокосмічного моніторингу. Однак, якщо їх більше двох-трьох, оптимальне настроювання оптичного приладу синтезу без попередніх розрахунків по чіткій методиці практично неможливе.

1. Валентюк А. Н., Предко К. Г. Оптическое изображение при дистанционном наблюдении. — Минск: Наука и техника, 1991.—360 с.



2. Верещака Т. В., Зверев А. Т., Сладкопцев С. А., Судакова С. С. Визуальные методы дешифрирования. — М.: Недра, 1990.—344 с.
3. Каргужанский А. Л., Красный-Адмони Л. В. Химия и физика фотографического процесса. — Л.: Химия, 1983.—452 с.
4. Киенко Ю. П., Киселев В. В., Орлов Ю. К. Новые отечественные приборы синтеза многозональных изображений // Геодезия и картография.—1987.—№ 8.—С. 45—51.
5. Кривошеев М. И., Кустарев А. И. Цветовые измерения. — М.: Энергоатомиздат, 1990.—240 с.
6. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии: Пер. с нем. — М.: Мир, 1988.—344 с.
7. Петрук А. И. Многозональные аэрофотоаппараты. — Киев: КВВАИУ, 1988.—56 с.
8. Подолян А. П., Пудрий С. В. Экспонетрические системы аэрофотоаппаратов. — Киев: КИ ВВС, 1994.—164 с.
9. Полак Э. Численные методы оптимизации. Единый подход: Пер. с англ. — М.: Мир, 1974.—376 с.
10. Смирнов В. П., Алексеев Ю. В., Аллик Ю. К. и др. Эффективность комплексирования разноканальных изображений при опознавании объектов // Оптический журн.—1992.—№ 2.—С. 20—24.
11. Шашлов Б. А. Цвет и цветовоспроизведение. — М.: Книга, 1986.—280 с.
12. Berns R. S. Colorimetry: The basics & materials applications // Opt. and Photonics News.—1995.—6, N 9.—P. 23—27.
13. Ganz E., Pauli H. K. A. Whiteness and tint formulas of the Commission Internationale de l'Eclairage approximations in the  $L^*a^*b^*$  color space // Appl. Opt.—1995.—34, N 16.—P. 2998—2999.
14. Marimont D. H., Wandell B. W. Linear models of surface and illuminant spectra // J. Opt. Soc. Amer.—1992.—Ser. A.—9.—P. 1905—1913.

---

#### MODELS OF OPTIMAL SYNTHESIS OF ZONAL AEROSPACE SNAPSHOTS

V. N. Frolenko

We give a set of numerical models which allow the regulation of the optical synthesis device in terms of maximization of the color distinction on the synthesized image. The optimal regulation parameters are determined from the characteristics of objects and backgrounds of aerospace monitoring. The results of computer modeling of the color synthesis of zonal aerospace snapshot sets for a series of typical objects and backgrounds of aerospace monitoring are presented.