

УДК 528.7:681.3

Оптимальне цифрове синтезування зональних аерокосмічних зображень

В. М. Фроленко

Академія Збройних сил України, Київ

Надійшла до редакції 18.11.97

Розглянуто можливості комп'ютерного синтезування зональних цифрових аерокосмічних зображень з метою забезпечення максимальної колірної відмінності між об'єктом та фоном на екрані монітора. Зроблено оцінку підвищення ефективності синтезування деяких зональних аерокосмічних знімків.

Колірне синтезування зональних аерознімків є природним заходом ефективного дешифрування матеріалів багатоспектрального аерокосмічного моніторингу. Воно дозволяє комбінувати монохроматичні зональні зображення з метою виявлення багатьох дешифрувальних ознак об'єктів на єдиному колірносинтезованому зображенні [1]. Колірне синтезування значно підвищує ефективність дешифрування малоконтрастних об'єктів аероландшафту — елементів рельєфу, геологічних утворень, тонкої гідрографічної структури і прибережної смуги, рослинного покриву, польових доріг, димових факелів, нафтових забруднень місцевості та води, затінених об'єктів тощо [5]. Колірне синтезування концентрує в одному зображенні інформацію, яка розсіяна в комплекті монохроматичних зональних зображень, що найбільш повно відповідає особливостям її сприймання людиною.

Традиційним та широко розповсюдженим є спосіб оптичного синтезування зональних аерокосмічних знімків з використанням аналогових оптико-електронних приладів синтезу [4]. Такі прилади складаються з окремих оптичних проекторів зональних знімків та спільного проглядового екрана, на якому здійснюється їх прецизійне сполучення в єдине синтезоване зображення. Для регулювання світлового потоку в кожному проекційному каналі

є набори нейтральних світлофільтрів і/або електричні регулятори джерел освітлювання, а для змінування кольоровості синтезованого зображення — набори світлофільтрів основних і/або додаткових кольорів.

Оптичному синтезуванню зональних аерокосмічних знімків притаманні такі основні недоліки. Відсутні чітко визначені методики оптимального синтезування, тобто такого синтезування, що забезпечує максимально можливу колірну відмінність між об'єктом та фоном на синтезованому зображенні. По-друге, навіть при наявності такої методики неможливо її реалізувати на існуючому дешифрувальному обладнанні внаслідок значної складності обчислень. По-третє, колірне охоплення існуючих зразків оптичних приладів синтезу обмежене, що ілюструється рис. 1. По-четверте, аналогові пристрої складні, неергономічні, мають значні похибки регулювання та велику кількість органів контролю. Нарешті, наявність проблем оптико-механічного сполучення зональних аерознімків під час синтезування, що спричиняє завал функції передавання модуляції синтезованого зображення $T_c(\nu)$ згідно з формулою [11]

$$T_c(\nu) = \exp[-2(\pi\delta_c\nu)^2] \text{sinc}(\pi\delta_c\nu), \quad (1)$$

де δ_c — діаметр плями розсіяння проекційної оп-

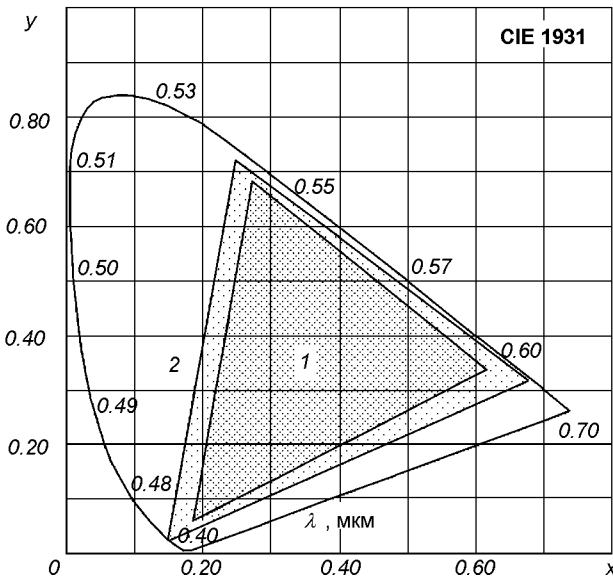


Рис. 1. Колірне охоплення пристроїв відображення: 1 — оптичний прилад синтезу MSP-4C, 2 — комп'ютерний монітор

тичної системи на рівні 0.606 від максимального значення, δ_n — залишкове несполучення зональних зображень, ν — просторова частота.

Найбільш перспективним методом позбавлення від вказаних недоліків слід вважати цифрове синтезування зональних аерокосмічних зображень за допомогою потужних цифрових графічних станцій [6]. Сучасні технології цифрової обробки зображень дозволяють реалізувати досить складні алгоритми, в тому числі і багатозонального колірної синтезування, тим більше, що деякі зразки нових оптико-електронних систем аерокосмічного спостереження дозволяють формувати безпосередньо цифрові зображення [10].

Розглянемо спрощену модель визначення оптичного сигналу, наприклад, оптичного пропускання, в одному із зональних каналів багатоспектральної апаратури дистанційного спостереження в діапазоні довжин хвиль оптичного випромінювання від λ до $\lambda + \Delta\lambda$. Оптичне пропускання τ_0 зображення об'єкта складе

$$\tau_0 = k_b \left[\int_{\lambda}^{\lambda + \Delta\lambda} S_b(\lambda) d\lambda \right]^{\gamma_b(\lambda)}, \quad (2)$$

де $\rho_0(\lambda)$ — спектральний розподіл коефіцієнта оптичного відбиття об'єкта, $S_b(\lambda)$ — зведена спектральна світлочутливість приймального пристрою, $\gamma_b(\lambda)$ — узагальнений показник передавання оптич-

ного сигналу у відотракті оптико-електронної апаратури, k_b — коефіцієнт підсилення відотрактру. Останній, як правило, змінюється при умові забезпечення необхідного середнього зонального оптичного сигналу $\hat{\tau}$. По аналогії з (2) можна записати

$$k_b = \hat{\tau} \left[\int_{\lambda}^{\lambda + \Delta\lambda} S_b(\lambda) \bar{\rho}(\lambda) d\lambda \right]^{-\gamma_b(\lambda)}, \quad (3)$$

де $\bar{\rho}(\lambda)$ — середній спектральний коефіцієнт оптичного відбиття аероландшафту. Через те, що спектральний діапазон реєстрації $\Delta\lambda$ звичайно досить вузький, прийемо $S_b(\lambda)$ та $\gamma_b(\lambda)$ постійними в його межах, тим більше, що в існуючих оптико-електронних системах для цього вживають спеціальних заходів. Тоді підстановка (3) в (2) дозволяє одержати вираз для зонального оптичного сигналу:

$$\tau_0 = \hat{\tau} \frac{\left[\int_{\lambda}^{\lambda + \Delta\lambda} \rho_0(\lambda) d\lambda \right]^{\gamma_b}}{\left[\int_{\lambda}^{\lambda + \Delta\lambda} \bar{\rho}(\lambda) d\lambda \right]^{\gamma_b}}. \quad (4)$$

Якщо далі виконується оцифрування зонального зображення, то цифровий код інтенсивності елемента растру D_0 , який належить об'єкту, за умовою забезпечення максимального амплітудного діапазону сигналу складе [9]

$$D_0 = \frac{D_w}{2} \frac{\left[\int_{\lambda}^{\lambda + \Delta\lambda} \rho_0(\lambda) d\lambda \right]^{\gamma_b/\gamma_{ц}}}{\left[\int_{\lambda}^{\lambda + \Delta\lambda} \bar{\rho}(\lambda) d\lambda \right]^{\gamma_b/\gamma_{ц}}}, \quad (5)$$

де $\gamma_{ц}$ — показник передавання цифрувального пристрою, D_w — максимально можливий код градації інтенсивності (рівень білого) цифрового зображення. Так, для восьмирозрядного цифрового коду $D_w = 255$. Порядок формування цифрового аерокосмічного зображення пояснюється рис. 2.

Нехай три цифрових зональних зображення D_{0j} , $j = 1, 2, 3$, відображаються на екрані монітора, причому їхні цифрові коди взяті з деякими масштабуючими коефіцієнтами w_j . Тоді спектральний розподіл оптичного потоку в r -му колірному каналі зображення об'єкта, $r = \{R, G, B\}$, складе [7]

$$\Phi_{0r}(\lambda) = k_m \sigma_{mr}(\lambda) [w_j D_{0j}]^{\gamma_m}, \quad (6)$$

де $\sigma_{mr}(\lambda)$ — спектральна густина потоку випромінювання r -го кольорового люмінофору кінескопа, γ_m — показник передавання цифрового сигналу монітором, k_m — коефіцієнт підсилення монітора. Порядок формування кольорового зображення на екрані пояснюється рис. 3.

Сумарний спектральний оптичний потік на син-

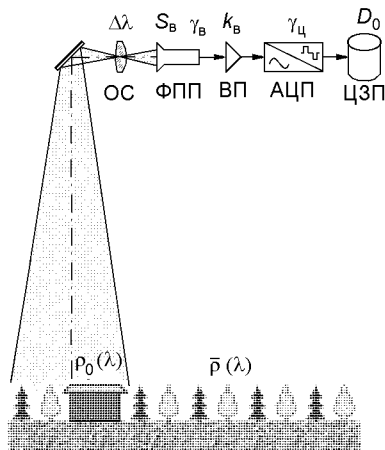


Рис. 2. Порядок формування цифрового зонального аерокосмічного зображення: ОС — оптична система, ФПП — фотоприймальний пристрій, ВП — відеопідсилювач, АЦП — аналогово-цифровий перетворювач, ЦЗП — цифровий запам'ятовуючий пристрій

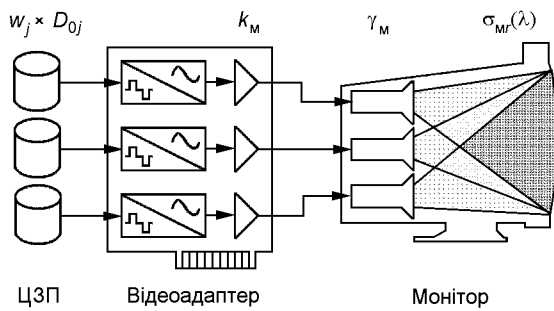


Рис. 3. Порядок формування кольорового синтезованого цифрового зображення

тезованому зображенні об'єкта $\Phi_0(\lambda)$ буде дорівнювати

$$\Phi_0(\lambda) = k_M \sum_r \sigma_{Mr}(\lambda) [w_r D_{0r}]^{\gamma_M}, \quad (7)$$

а спектральний потік $\Phi_w(\lambda)$, який відповідає рівню білого, —

$$\Phi_w(\lambda) = k_M (D_w)^{\gamma_M} \sum_r \sigma_{Mr}(\lambda). \quad (8)$$

Тепер задача оптимального синтезування зональних цифрових зображень зводиться до визначення такої системи коефіцієнтів w_j , яка забезпечить найбільшу колірну відмінність ΔE між зображеннями об'єкта і фону на синтезованому цифровому зображенні. В [12] запропонована модель, яка опирається на оцінку колірного контрасту за стандартною міжнародною рівноконтрастною колори-

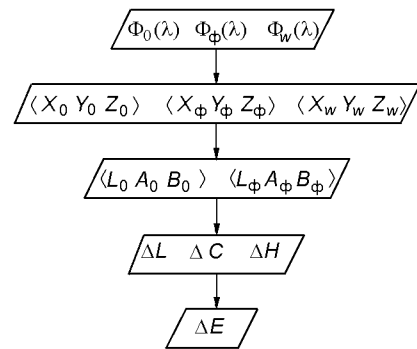


Рис. 4. Порядок розрахунку колірної відмінності на синтезованому цифровому зображенні

метричною системою CIE LAB 1994 [14]. Суть цієї моделі полягає у послідовності перерахунків спектральних оптичних потоків в зображеннях об'єкта $\Phi_0(\lambda)$ і фону $\Phi_\Phi(\lambda)$ до їх кольорів $\langle X_0, Y_0, Z_0 \rangle$ та $\langle X_\Phi, Y_\Phi, Z_\Phi \rangle$ в колориметричній системі CIE XYZ 1931, потім — до параметрів рівноконтрастної колориметричної системи, і тільки потім — до власне колірної відмінності, як на рис. 4.

Кольори синтезованого зображення об'єкта визначаються за такими формулами:

$$\begin{aligned} X_0 &= \int_{V(\lambda)} \Phi_0(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \\ Y_0 &= \int_{V(\lambda)} \Phi_0(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \\ Z_0 &= \int_{V(\lambda)} \Phi_0(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda, \end{aligned} \quad (9)$$

де $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ — криві додавання колориметричної системи CIE XYZ 1931, $V(\lambda)$ — спектральна область фізіологічної чутливості. Кольори фону та рівня білого визначаються аналогічно. Підстановка (7) та (8) в (9) дозволяє виразити відносні кольори об'єкта через систему масштабних коефіцієнтів:

$$\begin{aligned} \frac{X_0}{X_w} &= \frac{\int_{V(\lambda)} \sum_r \sigma_{Mr}(\lambda) [w_r D_{0r}]^{\gamma_M} \bar{x}(\lambda) d\lambda}{(D_w)^{\gamma_M} \sum_r \sigma_{Mr}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda}, \\ \frac{Y_0}{Y_w} &= \frac{\int_{V(\lambda)} \sum_r \sigma_{Mr}(\lambda) [w_r D_{0r}]^{\gamma_M} \bar{y}(\lambda) d\lambda}{(D_w)^{\gamma_M} \sum_r \sigma_{Mr}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}, \\ \frac{Z_0}{Z_w} &= \frac{\int_{V(\lambda)} \sum_r \sigma_{Mr}(\lambda) [w_r D_{0r}]^{\gamma_M} \bar{z}(\lambda) d\lambda}{(D_w)^{\gamma_M} \sum_r \sigma_{Mr}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda}. \end{aligned}$$

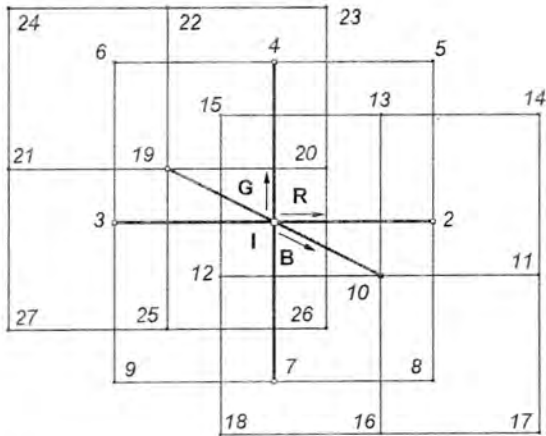


Рис. 5. Градієнтний пошук в просторі масштабних коефіцієнтів

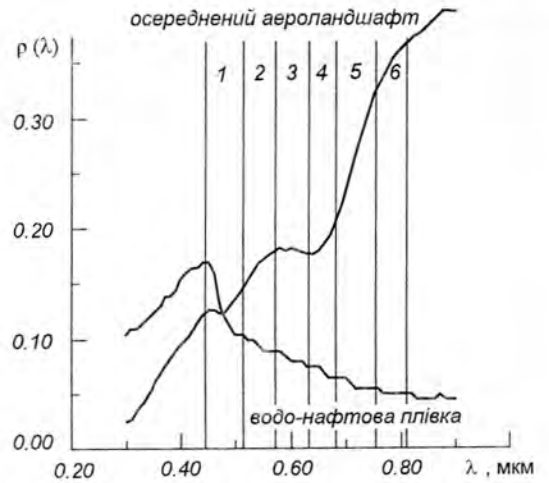


Рис. 6. Спектральні характеристики відбиття об'єктів аероландшафту

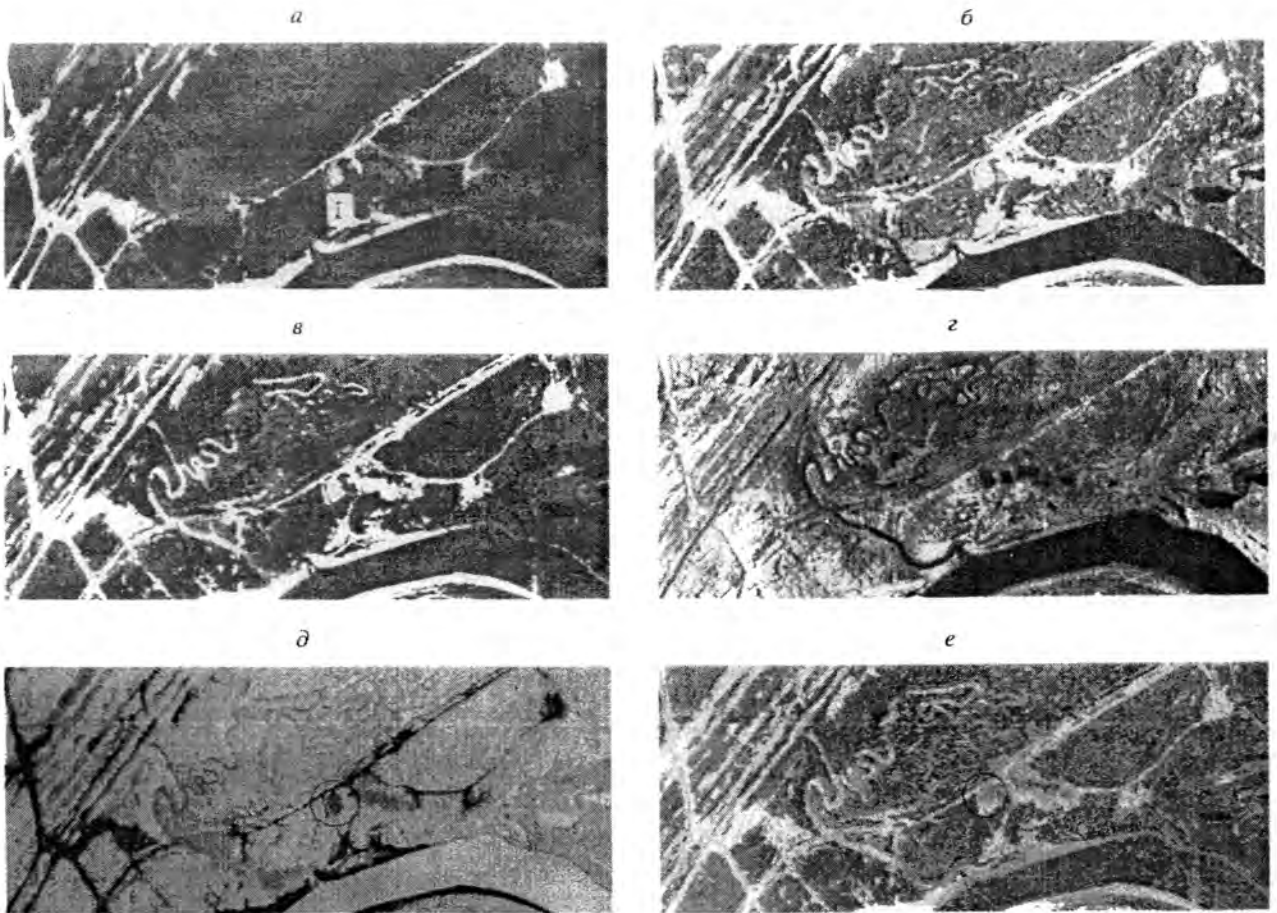


Рис. 7. Результати оптимального цифрового синтезування зональних аерокосмічних знімків: а, б, в, г — вихідні зональні зображення в каналах 1, 2, 4, 6 відповідно, д — кольоровосинтезоване за допомогою оптичного приладу синтезу зображення, е — власне результат оптимального цифрового синтезування

Таблиця 1. Зони спектральної чутливості реєструючих каналів багатозональної аерофотоапаратури МКФ-6М

Канал реєстрації	1	2	3	4	5	6
$\Delta\lambda$, мкм	0.45—0.51	0.52—0.57	0.57—0.63	0.63—0.68	0.68—0.75	0.76—0.81

Таблиця 2. Значення колірної відмінності між об'єктами та фонами на синтезованих цифрових зображеннях

Фони, Об'єкти	Грунти чорноземні	Грунти опідзолені	Гірничі породи	Глина, вапняк	Водна поверхня	Такир	Хвойні рослини	Листяні рослини	Різотрав'я	Неспілі культури	Доспілі культури	Виноградник
Грунти чорноземні	43, 109 6 6 2 16 16 13	63, 400 3 3 6 10 10 7										
Грунти опідзолені			47, 467 6 3 6 7 9 7	53, 660 2 5 2 8 16 8		40, 092 1 6 1 9 16 11						
Гірничі породи						45, 768 1 5 1 6 13 6						
Глина, вапняк			48, 959 6 1 6 8 12 8			78, 590 6 1 6 8 16 8						
Водна поверхня	119, 802 3 6 3 1 16 1	118, 833 3 6 3 1 16 1	140, 112 6 1 6 8 16 8			81, 972 5 1 5 11 5 11	134, 556 3 6 3 1 16 1	149, 464 4 6 4 1 11 1	155, 027 3 6 3 1 16 1	122, 901 3 6 3 1 16 1		139, 319 3 6 3 1 16 1
Нафта	77, 490 6 1 6 5 6 5	54, 438 5 1 5 10 8 10	109, 864 6 1 6 8 16 8	57, 365 3 5 3 2 14 2		28, 892 6 1 6 11 4 11	66, 854 6 1 6 15 14 16	74, 673 6 6 1 11 11 11	77, 147 1 1 6 14 14 15			
Хвойні рослини	27, 651 6 1 6 7 13 8	58, 223 6 1 5 4 10 5						26, 279 1 6 1 15 6 15	36, 253 1 6 1 10 4 10			
Листяні рослини	53, 810 1 6 1 6 5 6	58, 094 6 1 6 6 11 8							28, 339 5 2 5 5 12 5			
Різотрав'я	99, 310 1 6 4 11 13 10	61, 544 1 6 1 6 5 6	69, 618 1 1 6 11 11 6	113, 439 1 6 1 8 16 8		67, 531 1 6 1 15 15 16						
Неспілі культури	47, 360 6 6 4 15 15 12	19, 438 4 2 4 8 10 8					35, 940 6 1 6 6 15 6	50, 634 1 6 1 11 9 11	57, 618 1 6 1 11 9 11			
Доспілі культури	83, 741 1 6 1 7 8 7	48, 913 1 6 1 6 5 6					39, 778 3 3 1 13 13 15	35, 126 6 4 6 5 14 5	62, 062 5 4 5 4 13 4	50, 090 1 4 1 8 9 8		
Виноградник		49, 266 1 4 1 9 8 9	43, 025 5 3 5 7 9 8					66, 966 1 6 1 13 12 13	83, 869 1 6 1 13 12 13	65, 941 3 4 3 7 8 7	49, 611 1 6 1 11 10 11	

Примітка. У першому рядку — кількість порогів рівноконтрастної колориметричної системи CIE LAB 1994, у другому рядку — спектральні зони апаратури МКФ-6М в RGB-каналах синтезованого зображення, у третьому рядку — коефіцієнти чисельників синтезування зі знаменником 8 в RGB-каналах

Далі можна розрахувати проміжні кольорові величини L_0 , A_0 , B_0 , C_0 , H_0 для об'єкта:

$$L_0 = 116 \sqrt[3]{\frac{Y_0}{Y_w}} - 16,$$

$$A_0 = 500 \left(\sqrt[3]{\frac{X_0}{X_w}} - \sqrt[3]{\frac{Y_0}{Y_w}} \right),$$

$$B_0 = 200 \left(\sqrt[3]{\frac{Y_0}{Y_w}} - \sqrt[3]{\frac{Z_0}{Z_w}} \right),$$

$$C_0 = \sqrt{A_0^2 + B_0^2},$$

$$H_0 = \arctg \frac{B_0}{A_0}.$$

Нарешті, колірна відмінність на синтезованому

цифровому зображенні визначається як

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{w_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{w_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{w_H}\right)^2},$$

де $\Delta L = L_o - L_\phi$ — різниця яскравостей об'єкта і фону, $\Delta C = C_o - C_\phi$ — відмінність за кольоровістю 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.

Очевидно, що оптимізація функції $\Delta E(w_R, w_G, w_B)$ повинна виконуватися кількісними методами, наприклад, методом градієнтного пошуку в просторі коефіцієнтів w_r [12]. Нехай задані межі їх можливих значень та дискретна величина кроку зміни. Процедура пошуку на черговій ітерації передбачає перевірку значень функції у 26 сусідніх точках (рис. 5) на екстремум з послідовним перенесенням центру пошуку в його точку. Ітераційний процес закінчується при досягненні екстремуму або виході за межі змінювання на наступному кроці хоч би одного із значень коефіцієнтів w_r . Запам'ятовування результатів розрахунків на попередньому кроці дозволяє скоротити потрібний обсяг обчислювань в середньому на 60 %.

Для перевірки викладених теоретичних положень зроблені розрахунки масштабних коефіцієнтів w_r оптимального колірної цифрового синтезування зональних зображень типових об'єктів та фонів аерокосмічного моніторингу методом градієнтного пошуку. Як приклад розглянуто синтезування оцифрованих аерокосмічних знімків багатозональної аерофотографічної апаратури МКФ-6М з метою виявлення нафтових забруднень аероландшафту. Відповідні спектральні характеристики наведені на рис. 6, на графік також нанесено зони спектральної чутливості усіх каналів реєстрації МКФ-6М (табл. 1).

Результати цифрового синтезування згідно з поданою методикою ілюструються рис. 7, де для порівняння показані чотири вихідних зональних зображення, а також колірносинтезоване за допомогою оптичного приладу синтезу зображення. Колірний контраст між зображеннями нафтової плівки (усередині червоного кола) та фоною рослинності на цифровому синтезованому аерознімку вище майже у 2 рази при розгляданні на екрані монітора з типовим показником передавання $\gamma_m = 2.18$ [13]. В табл. 2 містяться результати розрахунків параметрів оптимального цифрового синтезу для різноманітних сполучень «об'єкт—фон» при $\gamma_b = 1.26$ [3, 8], $D_w = 255$ та відносних спектральних характеристиках кольорового монітора [7], які показані на рис. 8.

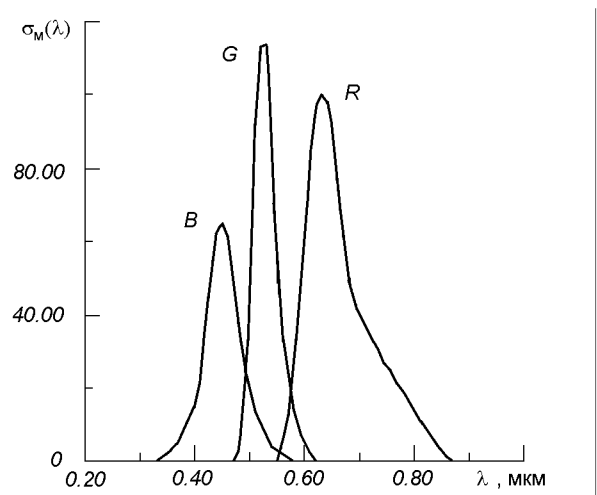


Рис. 8. Відносна спектральна густина потоку випромінювання люмінофорів кінескопа: R — червоний, G — зелений, B — синій

Результати моделювання свідчать, що, по-перше, цифрове синтезування зональних аерокосмічних зображень дозволяє підвищити кількість порогів колірної відмінності між об'єктами та фонами відносно оптичного синтезування [7] в середньому в 15.1 рази. По-друге, в більшості випадків для досягнення максимального колірної контрасту достатньо тільки двох зональних аерокосмічних знімків.

Таким чином, оптимальне цифрове синтезування зональних аерокосмічних зображень є добрим інструментом підвищення загальної ефективності дешифрування матеріалів багатоспектрального аерокосмічного моніторингу.

1. Аковецкий В. И. Дешифрирование снимков. — М.: Недра, 1983.—374 с.
2. Алмазов И. В., Стеценко А. Ф., Севастьянова М. Н. Оценка качества многозональных и синтезированных фотоизображений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.—1994.— № 2.—С. 111—117.
3. Евтеева Н. П., Беликов В. И., Петрова Л. А., Козлова Л. Н. Оценка цветопередачи съёмочных объективов // Оптич. журн.—1993.—№ 5.—С. 67—70.
4. Ильинский Н. Д., Обиралов А. И., Фостиков А. А. Фотограмметрия и дешифрирование снимков. — М.: Недра, 1986.—376 с.
5. Книжникова Ю. Ф., Кравцова В. И. Области эффективного применения многозональной космической съемки // Многозональная аэрокосмическая съемка и ее использование при изучении природных ресурсов. — М.: МГУ, 1976.—С. 7—14.
6. Краснопецев Б. В. Фотограмметрическая рабочая станция SD 2000 LEICA и ее исследования // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.—1995.—№ 2.—С. 110—113.

7. Новаковский С. В. Цвет в цветном телевидении. — М.: Радио и связь, 1988.—288 с.
8. Павлов И. М., Якубов Н. Т. Аэрофотография. — М.: Недра, 1991.—335 с.
9. Певзнер Б. М. Качество цветных телевизионных изображений. — М.: Радио и связь, 1988.—224 с.
10. Техника получения изображений высокой четкости // Иностранная печать об экономическом, научно-техническом и военном потенциале государств-участников СНГ и технических средствах его выявления. Сер. «Технические средства разведывательных служб капиталистических государств», 1996.—№ 1.—С. 15—19.
11. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации: Пер. с нем. — М.: Мир, 1978.—670 с.
12. Фроленко В. М. Методика комплексного дешифрування зональних аерокосмічних знімків з використанням оптичного приладу синтезу // Космічна наука і технологія.—1997.—3, № 5-6.—С. 47—54.
13. Шлихт Г. Ю. Цифровая обработка цветных изображений: Пер. с нем. — М.: ЭКОМ, 1997.—336 с.
14. Berns R. S. Colorimetry: The Basics & Materials Applications // Optics & Photonics News, 1995.—6, N 9.—P. 23—27.

**OPTIMAL DIGITAL SYNTHESIS
OF ZONAL AEROSPACE IMAGES****V. M. Frolenko**

Possibilities of computer synthesis of zonal digital aerospace images are considered with the purpose of providing the greatest colour distinction between the object and background on the monitor screen. Increase in the efficiency of the synthesis of some zonal aerospace images is estimated.