

Підвищення інформативності мультиспектральних зображень шляхом мультимодального комплексування

Гривачевський А. П., Прудюс І. Н.

Національний університет “Львівська політехніка”

E-mail: ahryvachevskiy@gmail.com

Дослідження присвячене проблемі об'єднання графічної інформації з різних сенсорів в мультиспектральних системах моніторингу за допомогою методів мультимодального комплексування зображень. Як критерій ефективності об'єднання графічної інформації в єдине комплексоване зображення вибрано інформативність цього зображення. Інформативність пропонується оцінювати за допомогою запропонованого вдосконаленого методу, що базується на основі багатокритеріального аналізу параметрів зображень. Комплексування зображень виконується за допомогою запропонованого методу на основі дискретного вейвлет-перетворення з формуванням низькочастотних вейвлет-коефіцієнтів результуючого вейвлет-спектра шляхом аналізу регресійної моделі зв'язку між вхідними зображеннями. Підтверджено експериментальним шляхом, що запропонований метод комплексування дає можливість синтезувати більш інформативні мультиспектральні зображення ніж відомі алгоритми.

Ключові слова: комплексування зображень; мультиспектральний моніторинг; інформативність зображення; вейвлет-перетворення; регресійний аналіз

DOI: [10.20535/RADAP.2018.73.40-49](https://doi.org/10.20535/RADAP.2018.73.40-49)

Вступ

В останні десятиліття активно розвивається комплексний підхід до обробки даних моніторингу об'єктів та сцен, що передбачає використання різних інструментів дистанційного зондування — приладів та сенсорів: оптичних, інфрачервоних та мікрохвильових [1–8]. Якщо раніше головними обмеженнями в досягненні максимальних показників ефективності таких систем були недостатньо високі технічні параметри окремих блоків (особливо — сенсорів), то в останні роки на перший план виходить більш повне використання потенційно доступної інформації з різних сенсорів.

Кожен з сенсорів мультиспектральної системи моніторингу (МСМ) дозволяє отримати цифрові зображення спостережуваної сцени в різних діапазонах електромагнітного випромінювання. На сформованих зображеннях інформація про характеристики об'єктів в полі зору МСМ міститься в просторовому розподілі яскравості по площі цих зображень. Для того, щоб одержати якомога більше корисної інформації з сукупності наявних зображень, вдаються до процедури під назвою — комплексування зображень (image fusion) [1–4]. В даній роботі під комплексуванням зображень розуміється процес об'єднання інформації на піксельному рівні від двох

або більше зображень в одне більш інформативне, ніж будь-яке з вхідних. В свою чергу мультимодальним комплексуванням називається комплексування зображень, отриманих сенсорами різної фізичної природи (РФП), які працюють у різних ділянках спектра.

При моніторингу однієї і тієї ж сцени в різних діапазонах електромагнітного випромінювання зареєстровані зображення можуть помітно відрізнитися в залежності від властивостей об'єктів та параметрів середовища в конкретному спектральному діапазоні. Даний факт впливає на те, що кореляція між розташуванням об'єктів в полі зору МСМ та розподілом яскравості на кожному зображенні з різних діапазонів є неоднозначною. Тому задача ефективного комплексування зображень є досить не тривіальною і необхідно визначити, такий метод комплексування різноспектральних зображень, який би забезпечив ефективну роботу МСМ в складній фоновій обстановці (ФЦО) (дим, пил, туман, опади, низька освітленість, маскуваність об'єктів, тощо) [8].

1 Постановка задачі

При комплексуванні різноспектральних зображень виникає ряд проблем остаточно не вирішених на даний момент [1]. Основна проблема полягає

в тому, що кожен парціальний сенсор МСМ представляє специфічні характеристики навколишнього середовища (яскравості, теплові або радіолокаційні контрасти об'єктів, тощо) [4, 5]. Іншою, не менш важливою проблемою, є різна просторова роздільна здатність сенсорів РФП та неузгодженість їх полів зору [9–11]. Це сильно ускладнює процес спільної інтерпретації таких даних, оскільки просторовий розподіл значень пікселів у зображеннях може суттєво відрізнятись, причому чим більше канали рознесені по частоті, тим більша відмінність (тим менший кореляційний зв'язок) між зображеннями з різних каналів.

В дослідженнях, присвячених комплексуванню зображень [1–4, 7] та суміжним задачам [5, 6, 9–14] розглядаються окремі аспекти комплексування (прив'язка, сам процес комплексування або оцінка комплексування) і відсутній системний підхід до розв'язання цієї задачі. Тому, враховуючи особливості комплексування різноспектральних зображень, в роботі пропонується підійти до розгляду процесу мультимодального комплексування графічної інформації з сенсорів РФП системним шляхом і поетапно розглянути весь процес, починаючи від моменту попередньої обробки отриманих вхідних зображень і завершуючи оцінкою синтезованого результуючого зображення.

2 Етапи комплексування зображень

Система моніторингу з комплексуванням парціальних зображень повинна включати в себе наступні етапи обробки вхідних зображень (рис. 1):

- прив'язка (просторова синхронізація);
- оцінка інформативності;
- комплексування на піксельному рівні;
- оцінка інформативності комплексованого зображення;
- постобробка (в залежності від поставленої задачі).

2.1 Прив'язка зображень

Під прив'язкою зображень слід розуміти процес приведення до єдиної системи координат декількох зображень однієї і тієї ж сцени [9], тобто іншими словами, це просторова синхронізація зображень.

В більшості робіт, що присвячені задачі комплексування різноспектральних зображень, не враховується просторова неузгодженість зображень [2–5], яка зумовлена конструктивними особливостями МСМ або розглядається досить абстрактно [1, 7]. Тому слід розглянути способи прив'язки зображень,

оскільки без такого узгодження переходити до комплексування зображень на піксельному рівні неможливо.

Класичний підхід до прив'язки зображень полягає у виділенні найбільш інформативних фрагментів (образів) на одному зображенні і пошук подібних фрагментів на іншому зображенні з врахуванням вибраного критерію подібності [9]. Маючи інформацію про взаємне розташування подібних образів на зображеннях, оцінюється ступінь розузгодженості зображень і одне з них трансформується використовуючи афінне геометричне перетворення таким чином, щоб мінімізувати дане розузгодження.

Як критерії подібності образів, для прив'язки моноспектральних зображень, використовують мінімум суми квадратів розбіжності образів, або максимум нормованої кореляційної функції. Однак дані критерії не є інваріантними до відмінності характеру просторового розподілу яскравості між зображеннями з сенсорів РФП. Для прив'язки різноспектральних зображень доцільно використовувати критерій, що ґрунтується на максимізації функції взаємної інформації [9–11]. Він є інваріантним до просторового розподілу яскравості і дозволяє виконати прив'язку зображень значно точніше. Функція взаємної інформації $MI()$, як показано в [9], обчислюється з використанням ентропії E зображення:

$$MI(A, B) = E(A) + E(B) - E(A, B), \quad (1)$$

де $E(A)$, $E(B)$ — відособлені ентропії зображень A та B , відповідно; $E(A, B)$ — спільна ентропія A та B .

2.2 Оцінка інформативності зображень

Перед початком процедури комплексування доцільно виконати оцінку інформативності вхідних зображень з метою її врахування під час комплексування.

В даний час найбільш достовірним методом оцінки інформативності зображень, невідомого сюжетного змісту, все ще залишається метод експертних оцінок [16]. Однак недоліками методу експертної оцінки вважається: трудомісткість, значні матеріальні витрати і неможливість використання результатів оцінки для корекції цифрової обробки в реальному масштабі часу. Тому для вирішення задач цифрової обробки зображень не припиняються дослідження по розробці методів автономної об'єктивної кількісної оцінки зображень [12–15].

Традиційним підходом до оцінки інформативності зображення є обчислення його ентропії по Шенону:

$$E(A) = - \sum_{i=0}^{255} P(i) \log_2 P(i), \quad (2)$$

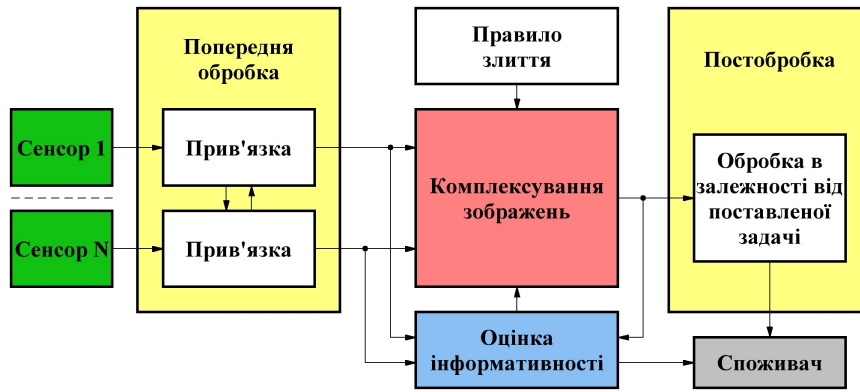


Рис. 1. Узагальнена блок-схема МСМ з комплексуванням зображень

де $P(i) = H(i)/N$ — імовірність появи пікселя з інтенсивністю $i = 0, 1, \dots, 255$ (для восьмибітного зображення); $H(i)$ — вектор значень гістограми зображення A ; N — кількість пікселів у зображенні.

Ентропія зображення дозволяє досить об'єктивно оцінювати інформативність ідеального зображення (без шумів та спотворень), проте для реальних зображень подібна еквівалентність ентропії та інформативності може бути позбавлена сенсу [14], так як не враховуються просторова зміна яскравості елементів зображення і особливості їх зорового сприйняття.

Часто в літературі [14, 15], кількісну оцінку інформативності зображення ототожнюють з оцінкою його якості. Широко вживані підходи для оцінки якості, такі як універсальний показник якості (*UIQI — Universal Image Quality Index*) [12] та індекс структурної подібності (*SSIM — Structure Similarity*) [13] орієнтовані на знаходження схожості обробленого, тим чи іншим способом, зображення з еталонним і ефективно працюють в основному для оцінки алгоритмів кодування зображень. Універсальний показник якості оцінює спотворення обробленого зображення як комбінацію трьох факторів (індексів): втрати кореляції, спотворень яскравості і контрасту. Подальший розвиток універсального показника якості враховує і структурну подібність зображень. Незважаючи на те, що показники математично визначені і показують достатню відповідність з суб'єктивним якісним оцінюванням, ніяка модель візуальної системи людини при цьому не використовується. Показники *UIQI* та *SSIM* дозволяють оцінити якість зображення значно краще, ніж широко вживані середньоквадратична похибка та відношення сигнал/шум. Однак для оцінки алгоритмів підвищення інформативності зображень, орієнтованих на покращення їх психофізичного сприйняття, показники дають неоднозначні результати. Крім того, при оцінці комплексованого зображення, для якого не існує еталону, застосування даних метрик нічим необґрунтовано.

Отже, хоча в літературі поняття «інформативність» та «якість» зображення часто використовують

ють поряд (як синоніми), насправді вони не тотожні: зображення може бути якісним без шумів і спотворень (наприклад, артефактів), але при цьому бути неінформативним [14]. Тому доцільно розробити такий об'єктивний показник інформативності який буде якомога більше корелювати з суб'єктивною експертною оцінкою шляхом зорового сприйняття.

Головною проблемою при формалізації оцінки зорового сприйняття є встановлення зв'язку між об'єктивними окремими характеристиками (метриками) зображень і суб'єктивними критеріями зорового сприйняття. Якість зорового сприйняття визначається головним чином енергетичними характеристиками сигналів, що надходять до оператора. До них відносяться, зокрема, такі параметри як діапазон і кількість відтворюваних рівнів яскравості, контраст об'єкт/фон. Об'єктивними показниками цих параметрів зорового аналізатора будуть контраст (K) і кількість інформаційних рівнів (H) відповідно [15].

В роботі [15] для оцінки інформативності зображень пропонується багатокритеріальний показник, що враховує наступні параметри зображення:

K — контраст;

E — інформаційну ентропію зображення;

L — середнє значення яскравості;

σ — середнє квадратичне відхилення яскравості від середнього значення;

H — кількість градацій яскравості.

Оскільки задача інтегральної оцінки має багатокритеріальний характер, то в [15] вводиться узагальнений критерій I , що має вигляд:

$$I = \sum_{i=1}^N w_i C_i, \quad (3)$$

де w_i — ваговий коефіцієнт, C_i — частковий показник; N — кількість часткових показників.

Вагові коефіцієнти визначаються по критерію Фішберна [15]:

$$w_i = \frac{2(N - i + 1)}{N(N + 1)}, \quad i = \overline{1, N}. \quad (4)$$

З (4) видно, що вагові коефіцієнти визначені таким чином, є різними для всіх N параметрів, причому w_i зменшується зі збільшенням i . Тобто кожен наступний частковий показник матиме менший вплив на інтегральний. Тому обчислені параметри сортуються по їх впливу на візуальну інформативність зображення. В [15] автори, ґрунтуючись на експериментальному дослідженні зображень з різною семантикою та різною суб'єктивною якістю, пропонують розставити параметри в наступному порядку: L, σ, K, H, E .

З врахуванням викладеного, інтегральний показник інформативності має вигляд:

$$I = w_1 L_n + w_2 \sigma_n + w_3 K_n + w_4 H_n + w_5 E_n, \quad (5)$$

де індекс n означає, що всі перераховані параметри пронормовані до діапазону $[0, 1]$.

На основі власних досліджень було встановлено, що запропонована в [15] метрика дає завищену оцінку при низькій інформативності зображення. Тому пропонується внести зміни до описаної метрики для покращення її адекватності в оцінці інформативності зображення.

По-перше, пропонується замінити ентропію на градієнт зображення G , який враховує просторові перепади яскравості по полю зображення:

$$G(x, y) = \text{grad}A = \left(\frac{\partial A}{\partial x} i + \frac{\partial A}{\partial y} j \right), \quad (6)$$

де $\partial A / \partial x, \partial A / \partial y$ — перепади яскравості в напрямку x з інтервалом i та в напрямку y з інтервалом j , відповідно.

У свою чергу нормований градієнт G_n буде визначатися відношенням кількості пікселів з ненульовим градієнтом до загальної кількості пікселів у зображенні.

По-друге, в [15] під час оцінки кількості градацій яскравості H , якими представлено зображення, враховуються абсолютно всі градації, незалежно від числа пікселів $M(i)$, що формують конкретну градацію з яскравістю i :

$$H = \begin{cases} H, & \text{при } M(i) = 0 \\ H + 1, & \text{при } M(i) > 0 \end{cases}, \quad (7)$$

де $i = 0, 1, \dots, 255$ — яскравість градації (для восьмибітного зображення).

Однак, часто виникає ситуація, коли градація представлена в зображенні тільки кількома пікселями і її недоцільно враховувати, оскільки її вклад є досить малим. Щоб визначити тільки кількість значущих градацій, пропонується обмежити їх значення (кількість пікселів у зображенні, що належать

конкретній градації) певним порогом k :

$$H = \begin{cases} H, & \text{при } M(i) < k \\ H + 1, & \text{при } M(i) \geq k. \end{cases} \quad (8)$$

Таким чином будуть враховуватися тільки ті градації, значення яких перевищують заданий поріг k (рис. 2). Експериментальним шляхом було визначено, що поріг доцільно вибирати на рівні 1–5% від значення найбільш значущої градації M_{max} .

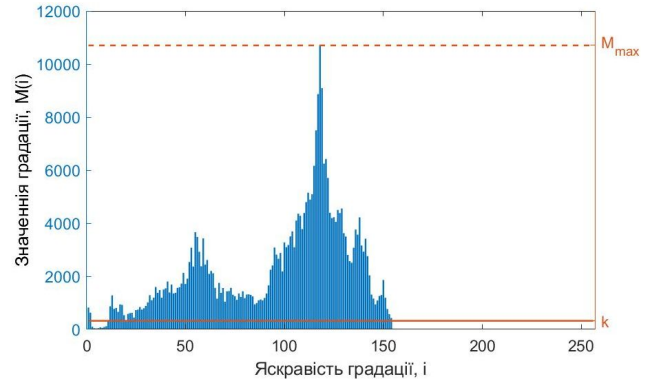


Рис. 2. Визначення кількості значущих градацій яскравості для телевізійного зображення з рис. 5

З рис. 2 видно, що кількість всіх присутніх на зображенні градацій $H = 155$, тоді як значущих, тобто таких, значення яких перевищує заданий поріг k , $H = 146$. Причому для розглянутого прикладу (рис. 2) при $k = 0,03M_{max}$, буде невраховано тільки 0,173% пікселів.

З врахуванням внесених змін, інтегральний показник інформативності прийме вигляд:

$$I = w_1 L_n + w_2 \sigma_n + w_3 H_n + w_4 K_n + w_5 G_n. \quad (9)$$

Запропонований удосконалений підхід дозволяє об'єктивно кількісно оцінити інформативність зображення. Причому дану метрику можна використовувати як для оцінки вхідних зображень перед комплексуванням, так і результуючого зображення після комплексування.

2.3 Комплексування зображень

З [1–4] відома велика кількість різноманітних методів комплексування, а саме: усереднення; метод вагової функції; максимум яскравості; степеневе перетворення; черездядкове комплексування; метод маски; підсилення відмінностей; аналіз низько- та височастотних складових; метод аналізу головних компонент; комплексування з пріоритетом телевізійного зображення; комплексування на основі піраміди Лапласа; комплексування на основі дискретного вейвлет-перетворення (ДВП) (DWT — Discrete Wavelet Transform).

Така велика кількість алгоритмів свідчить про те, що на даний момент не існує універсального алгоритму комплексування зображень, а дослідження в даному напрямку є актуальними.

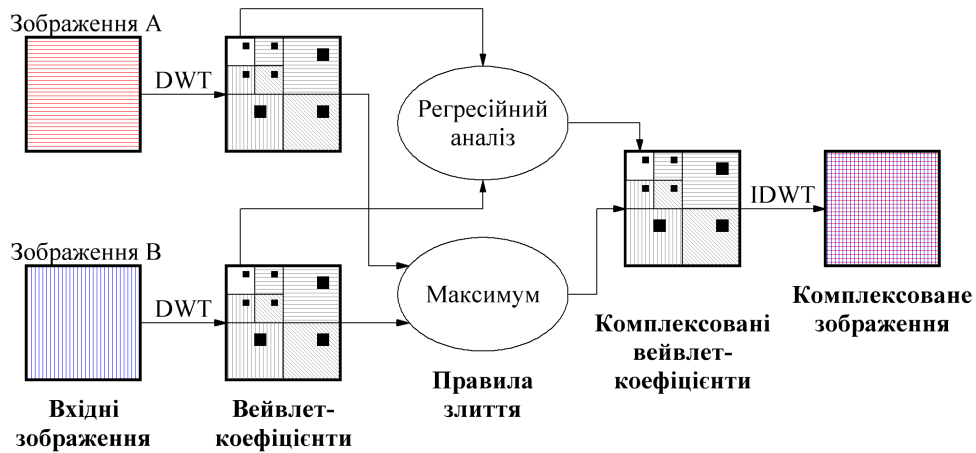


Рис. 3. Схема комплексування зображень запропонованим методом

Дослідження показують, що комплексування трьох і більше різноспектральних каналів є надлишковим, що також підтверджується в [7], оскільки завада, яка впливає на один з спектральних каналів, малоімовірно буде впливати на інші канали, які працюють в різних спектральних діапазонах. З метою оптимізації використання обчислювальної потужності апаратних засобів для комплексування доцільно вибирати два найбільш інформативних канали. Тому далі розглядається комплексування тільки двох зображень.

В [1–4] показано, що метод заснований на використанні ДВП характеризується найвищою стабільністю при комплексуванні зображень різного сюжетного змісту. На відміну від Фур'є-перетворення, вейвлет-базисні функції є добре локалізованими, що дає можливість проводити локальний спектральний аналіз. Спектральні вейвлет-коефіцієнти відповідають не тільки амплітудам різних частот, але і різним просторовим ділянкам на зображенні.

Відомо [1–3] кілька методів комплексування зображень побудованих на основі ДВП, кожен з яких призначений для вирішення тієї чи іншої задачі. В загальному випадку за допомогою ДВП вхідні зображення на кожному рівні декомпозиції розкладаються на низькочастотну (НЧ) $W^{(НЧ)}$ та високочастотну (ВЧ) $W^{(ВЧ)}$ складові вейвлет-спектра. Рівень декомпозиції може змінюватися від 1 до $\log_2(\min(N, M))$, де N, M — розміри зображення. В якості базисної вейвлет-функції використовується вейвлет Хаара (Нааг). НЧ вейвлет-спектр результуючого зображення формується шляхом усереднення НЧ складових вейвлет-спектра вхідних зображень, а ВЧ вейвлет-спектр — вибором максимального по модулю значення з відповідних складових вейвлет-спектра вхідних зображень. На завершальному етапі до сформованого результуючого вейвлет-спектра застосовується зворотне ДВП і таким чином отримується комплексоване зображення. Слід відмітити, що зі збільшенням рівня декомпозиції значно збільшується кількість математичних

операцій, яку необхідно виконати, а в результуючому зображенні можуть з'являтися спотворення та артефакти.

Легко передбачити, що формування НЧ вейвлет-спектра результуючого зображення шляхом усереднення буде призводити до зниження контрасту у випадку коли, одне з вхідних зображень є малоінформативним. Тому для усунення даного недоліку пропонується новий метод комплексування (рис. 3), який відрізняється від описаного вище іншим принципом формування НЧ-частини результуючого вейвлет-спектра.

З метою врахування інформативності вхідних зображень та зв'язку їх змісту між собою, формування НЧ-частини вейвлет-спектра результуючого зображення пропонується виконувати на основі статистичного аналізу НЧ-частин вхідних зображень за допомогою лінійної регресії (*SLR* — *Simple Linear Regression*) [17]. На відміну від кореляційного аналізу, регресійний аналіз дає можливість побудувати модель зв'язку між зображеннями, яка виражається функцією регресії.

Припустимо, що є N точок (x_i, y_i) , де $x_i \in X$, $y_i \in Y$, $i = \overline{1, N}$. Функція, яка описує зв'язок X і Y записується виразом [17]:

$$y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i, \quad (10)$$

де α і β — коефіцієнти регресійної моделі, а ε_i — відхилення X від Y .

Завдання визначення характеру зв'язку X і Y полягає в тому, щоб знайти такі коефіцієнти α і β рівняння

$$\hat{y}_i = \alpha + \beta x_i, \quad (11)$$

які б забезпечували найменше квадратичне відхилення лінійної регресійної моделі (11) від емпіричних даних (10). Іншими словами, коефіцієнти α і β є розв'язком наступної задачі мінімізації [17]:

$$Q(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^N (y_i - \alpha - \beta x_i)^2 \rightarrow \min. \quad (12)$$

Продиференціювавши Q по α і β та прирівнявши часткові похідні до нуля, отримуємо точкові оцінки параметрів моделі α і β , які мінімізують цільову функцію Q :

$$\alpha = \overline{y_i} - \beta \overline{x_i},$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \overline{x_i})(y_i - \overline{y_i})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \overline{x_i})^2}, \quad (13)$$

де $\overline{x_i}$, $\overline{y_i}$ — середнє арифметичне значення X та Y , відповідно.

Зробивши заміну в (13) значень x_i , y_i на значення вейвлет-коефіцієнтів НЧ-частин $W_A^{(НЧ)}$, $W_B^{(НЧ)}$ вхідних зображень A та B відповідно, отримуємо параметри α і β нашої регресійної моделі. Підставивши їх в (11), отримуємо нові НЧ вейвлет-коефіцієнти $\widehat{W}_B^{(НЧ)}$, що описують характер зв'язку $W_A^{(НЧ)}$ і $W_B^{(НЧ)}$.

НЧ-частина результуючого вейвлет-спектра формується наступним чином:

$$W_F^{(НЧ)} = W_A^{(НЧ)} + k \left[W_B^{(НЧ)} - \widehat{W}_B^{(НЧ)} \right], \quad (14)$$

де k — коригуючий коефіцієнт, який визначається, виходячи з інформативності вхідних зображень:

$$k = |I_A - I_B - 1|, \quad (15)$$

де I_A , I_B — інформативності зображень A і B , відповідно, визначені по (9). Причому, як A завжди вибирається зображення з більшою інформативністю поміж вхідних зображень.

В (14) різниця $\left[W_B^{(НЧ)} - \widehat{W}_B^{(НЧ)} \right]$, описує елементи зображення B , які відсутні в зображенні A . Таким чином використання регресійного аналізу дозволяє об'єднати на одному зображенні максимальну кількість деталей з вхідних зображень.

Для перевірки працездатності запропонованих методів оцінки інформативності та комплексування зображень розроблено алгоритми їх реалізації. Моделювання їх роботи проводилося на зображеннях отриманих МСМ в різних умовах спостереження¹: в нормальних умовах — (рис. 4); при наявності завад (дим) — (рис. 5); та при низькій освітленості — (рис. 6).



a) $I_A = 0,770$



b) $I_B = 0,746$



c) $I_{F1} = 0,842$



d) $I_{F2} = 0,851$

Рис. 4. Оцінка інформативності зображень при моніторингу в нормальних умовах: а) телевізійне; б) тепловізійне; с) комплексоване за допомогою ДВП; д) комплексоване запропонованим методом

¹COPPE/Poli/UFRJ [Visible-Infrared Database](#)

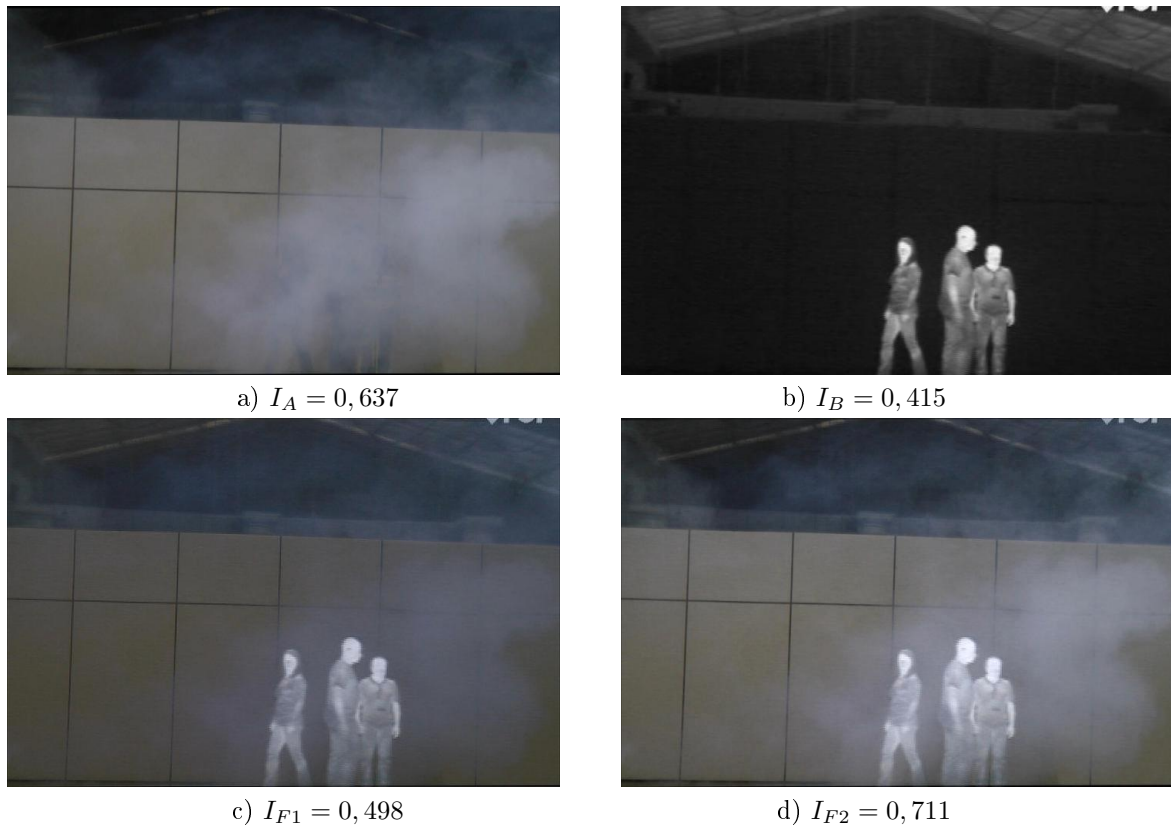


Рис. 5. Оцінка інформативності зображень моніторингу при наявності завади (дим) в телевізійному каналі МСМ: а) телевізійне; б) тепловізійне; в) комплексоване за допомогою ДВП; д) комплексоване запропонованим методом

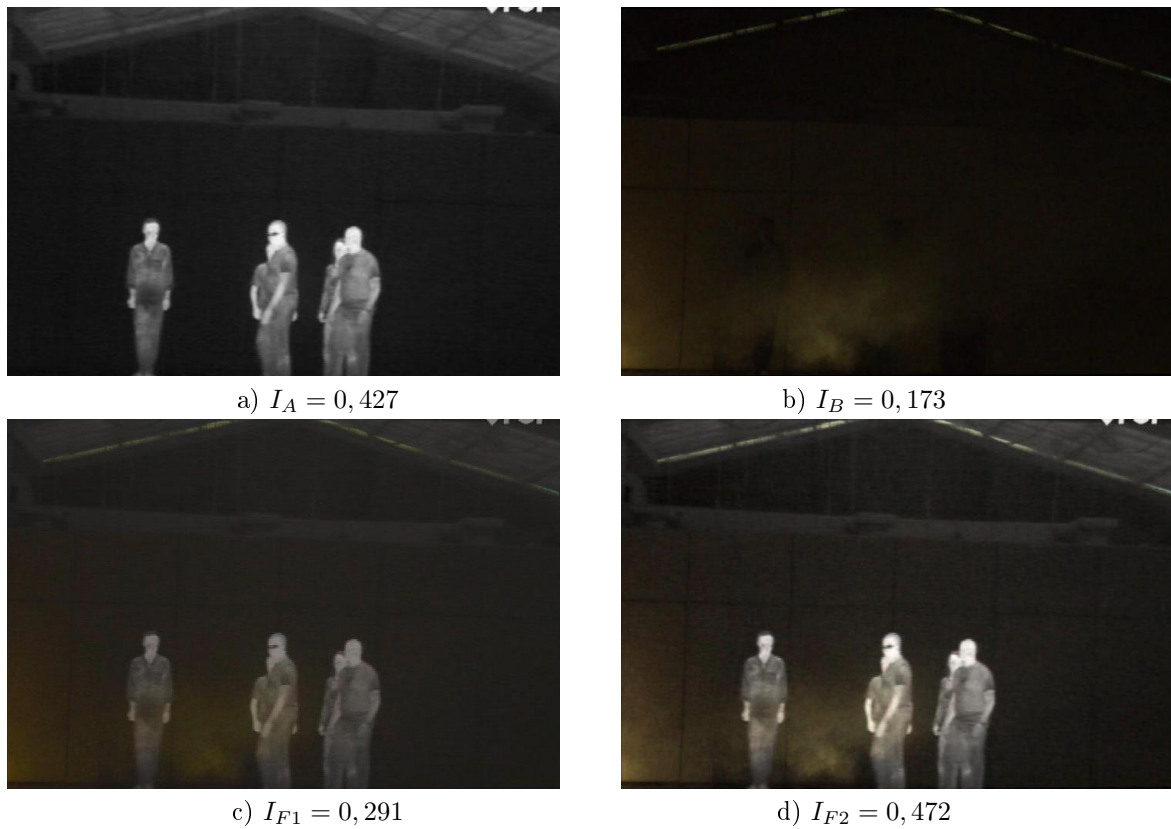


Рис. 6. Оцінка інформативності зображень моніторингу при низькій освітленості: а) тепловізійне; б) телевізійне; в) комплексоване за допомогою ДВП; д) комплексоване запропонованим методом

Висновки

Проведений аналіз процесу мультимодального комплексування зображень в мультиспектральних системах моніторингу показує, що без точної прив'язки різноспектральних зображень та оцінки їх інформативності комплексування зображень не дає очікуваних позитивних результатів, а навпаки може їх спотворити. Натомість, після виконання просторової синхронізації зображень та оцінки їх інформативності можна досягти синергетичного ефекту.

Запропонований вдосконалений метод оцінки інформативності зображень на основі багатокритеріального аналізу зображення, дозволяє об'єктивно кількісно оцінити інформативність зображення. На відміну від вже існуючого методу, удосконалений дає більш адекватну оцінку інформативності. Це яскраво видно по результатах наведених на рис. 6, де для зовсім не інформативного телевізійного зображення (на суб'єктивний погляд авторів) відомий метод дає завищену оцінку $I_B = 0,266$, тоді як запропонований має значно менше значення $I_B = 0,173$.

Запропонований метод комплексування зображень на основі дискретного вейвлет-перетворення з формуванням НЧ-частини результуючого вейвлет-спектра на основі регресійної моделі, дозволяє синтезувати нове мультиспектральне зображення, яке містить в собі корисну інформацію з обох вхідних зображень і має більшу інформативність (з рис. 4, $I_{F2} = 0,851$), як від вхідних зображень ($I_A = 0,770$, $I_B = 0,746$), так і від комплексованого зображення по відомому методу ($I_{F1} = 0,842$). Застосування комплексування зображень запропонованим методом при роботі МСМ в складних умовах спостереження (рис. 5, 6) дозволяє виділити елементи, які малопомітні на вхідних зображеннях (рис. 6).

Перелік посилань

- Zheng Y. Image Fusion and Its Applications / Y. Zheng, ed. – Publisher: InTech. – 2011. – 252 p.
- Фролов В. Н. Методы информационного совмещения изображений в многоканальных оптико-электронных системах / В. Н. Фролов, В. А. Тупиков, В. А. Павлова, В. А. Александров // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2016. – № 11-3. – С. 95-104.
- Zheng Y. An Advanced Image Fusion Algorithm Based on Wavelet Transform: Incorporation with PCA and Morphological Processing / Y. Zheng, E. A. Essock, B. C. Hansen // Proc. SPIE 5298. – 2004. – pp. 177-187.
- Гривачевський А. П. Аналіз методів комплексування сигналів парціальних спектральних каналів у системах моніторингу об'єктів та сцен / А. П. Гривачевський // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіoeлектроніка та телекомунікації. – 2015. – № 818. – С. 55-61.
- Kondratov P. O. Detection and allotment of the objects based on multispectral monitoring / P. O. Kondratov, A. H. Ohanesyan, V. F. Tkachenko, I. N. Prudyus, L. V. Lazko, A. P. Hryvachevskiy // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET), Lviv. –2016. – pp. 259-262.
- Пат. 94566 UA Україна, МПК G01S 13/00, G01J 3/29. Багатоспектральний виявляч наземних об'єктів / А. М. Зубков, І. Н. Прудіус, А. В. Д'яков, С. А. Мартиненко, Д. О. Мимріков, А. А. Щерба; заявник і власник патенту Національний університет «Львівська політехніка». – № а2010158036; заявл. 28.12.10; опубл. 10.05.2011, Бюл. № 9.
- Бондаренко А. Аппаратно-програмная реализация мультиспектральной системы улучшенного видения / А. Бондаренко, М. Бондаренко // Современная электроника. – 2017. – № 1. – С. 32-37.
- Hryvachevskiy A. P. The influence of destabilizing factors in the high resolution multispectral imaging systems / A. P. Hryvachevskiy, S. E. Fabirovskyy, L. V. Lazko, V. F. Tkachenko // International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Odessa. –2017. – pp. 1-4.
- Гривачевський А. П. Суміщення зображень сформованих сенсорами різної фізичної природи в процесі комплексування сигналів в мультиспектральних системах моніторингу / А. П. Гривачевський, С. Є. Фабіровський // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіoeлектроніка та телекомунікації. – 2017. – № 874. – С. 73-80.
- Sahoo P. K. Image registration using mutual information with correlation for medical image / P. K. Sahoo, U. C. Pati // Global Conference on Communication Technologies (GCCT), Thuckalay. – 2015. – pp. 34-38.
- Faycal S. A refined automatic co-registration method for high-resolution optical and sar images by maximizing mutual information / Saidi Faycal, Chen Jie, Wang Pengbo // IEEE International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP). – 2016. – pp. 231-235.
- Wang Zhou A universal image quality index / Zhou Wang, A. C. Bovik // IEEE Signal Processing Letters. Vol. 9, No. 3. –2002. – pp. 81-84
- Wang Zhou Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity / Zhou Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, E. P. Simoncelli // IEEE Transactions on Image Processing. Vol. 13, Issue 4. – 2004. – pp. 600-612.
- Бондаренко М. А. Оценка информативности комбинированных изображений в мультиспектральных системах технического зрения / М. А. Бондаренко, В. И. Дрыкин // Программные системы и вычислительные методы. – 2016. – № 1. – С. 64-79.
- Романов Ю. Н. Оценка качества цифровых изображений / А. П. Богданов, Ю. Н. Романов // Механика, управление и информатика. – 2012. – № 9. – С. 218-226.
- Кривошеев М. И. Международные стандарты по цифровому телевизионному вещанию / М. И. Кривошеев, В. Федунин // Связь и телекоммуникации. – 2007. – № 8. – С. 28-36.
- Seltman H. J. Experimental Design and Analysis / H. J. Seltman. – 2015. – 414 p.

References

- [1] Zheng Y. (2011) *Image Fusion and Its Applications*. InTech, 252 p. DOI: 10.5772/691
- [2] Frolov V.N., Tupikov V.A., Pavlova V.A. and Aleksandrov V.A. (2016) Informational image fusion methods in multichannel optoelectronic systems. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, No. 11-3, pp. 95-104.
- [3] Zheng Y., Essock E.A. and Hansen B.C. (2004) An advanced image fusion algorithm based on wavelet transform: incorporation with PCA and morphological processing. *Image Processing: Algorithms and Systems III*. DOI: 10.1117/12.523966
- [4] Hryvachevskiy A. P. (2015) Analysis of the methods of signal data fusion of partial spectral channels in the monitoring systems of objects and scenes. *Bulletin of the Lviv Polytechnic National University. Radioelectronics and Telecommunications*, No. 818, pp. 55-61.
- [5] Kondratov P., Ohanesyan A., Tkachenko V., Pradyus I., Lazko L. and Hryvachevskiy A. (2016) Detection and allotment of the objects based on multispectral monitoring. *2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*. DOI: 10.1109/tcset.2016.7452030
- [6] Zubkov A. M., Prudyus I. N., Diakonov A. V., Martynenko S. A., Mymrikov D. O. and Sherba A. A. (2011) *Multispectral detector of ground objects*, Pat. UA94566.
- [7] Bondarenko A. V. and Bondarenko M. A. (2017) Apparato-programmnyaya realizatsiya mul'tispektral'noi sistemy uluchshennogo videniya [Hardware-software implementation of the multispectral system of improved vision]. *Sovremennaya elektronika*, No. 1, pp. 32-37.
- [8] Hryvachevskiy A., Fabirovskiy S., Lazko L. and Tkachenko V. (2017) The influence of destabilizing factors in the high resolution multispectral imaging systems. *2017 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*. DOI: 10.1109/ukrmico.2017.8095371
- [9] Hryvachevskiy A. P. and Fabirovskiy S. E. (2017) Matching up of images which formed by sensors of different physical nature in the process of signal fusion in multispectral monitoring systems. *Bulletin of the Lviv Polytechnic National University. Radioelectronics and Telecommunications*, No. 874, pp. 73-80.
- [10] Sahoo P.K. and Pati U.C. (2015) Image registration using mutual information with correlation for medical image. *2015 Global Conference on Communication Technologies (GCCT)*. DOI: 10.1109/gcct.2015.7342619
- [11] Saidi F., Chen J. and Wang P. (2016) A refined automatic co-registration method for high-resolution optical and sar images by maximizing mutual information. *2016 IEEE International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP)*. DOI: 10.1109/siprocess.2016.7888258
- [12] Wang Z. and Bovik A. (2002) A universal image quality index. *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 9, Iss. 3, pp. 81-84. DOI: 10.1109/97.995823
- [13] Wang Z., Bovik A., Sheikh H. and Simoncelli E. (2004) Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 13, Iss. 4, pp. 600-612. DOI: 10.1109/tip.2003.819861
- [14] Bondarenko M. A. and Drynkin V. N. (2016) Assessment of the information content of image fusion in multispectral vision systems *Software systems and computational methods*, No. 1, pp. 64-79. DOI: 10.7256/2305-6061.2016.1.18047
- [15] Bogdanov A. P. and Romanov Yu. N. (2012) Digital images quality assessment. *Mekhanika, upravlenie i informatika*, No 9, pp. 218-226.
- [16] Krivosheev M. and Fedunin V. (2007) International standards for digital television broadcasting *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes*, No 8, pp. 28-36.
- [17] Seltman H. J. (2015) *Experimental Design and Analysis*, 227 p.

Повышение информативности мультиспектральных изображений путем мультимодального комплексирования

Гривачевский А. П., Прудюс И. Н.

Исследование посвящено проблеме объединения графической информации с различных сенсоров в мультиспектральных системах мониторинга с помощью методов мультимодального комплексирования изображений. В качестве критерия эффективности объединения графической информации в единое комплексированное изображение выбрано информативность этого изображения. Информативность предлагается оценивать с помощью предложенного усовершенствованного метода, базирующегося на основе многокритериального анализа параметров изображения. Комплексирование изображений выполняется с помощью предложенного метода на основе дискретного вейвлет-преобразования с формированием низкочастотных вейвлет-коэффициентов результирующего вейвлет-спектра путем анализа регрессионной модели связи между входными изображениями. Подтверждено экспериментальным путем, что предложенный метод комплексирования дает возможность синтезировать более информативные мультиспектральные изображения чем известные алгоритмы.

Ключевые слова: комплексование изображений; мультиспектральный мониторинг; информативность изображения; вейвлет-преобразование; регрессионный анализ

Enhancing the Informativeness of Multispectral Images by means of Multimodal Image Fusion

Hryvachevskiy A. P., Prudyus I. N.

The research is devoted to the problem of combining graphic information from sensors of various physical nature in multispectral monitoring systems using methods of multimodal image fusion. Each of the sensors of the multispectral monitoring system allows to obtain digital images of the observed scene in different ranges of electromagnetic radiation. In this paper, we consider a two-spectral monitoring system, the first sensor of which operates in the visible range, and the second in the infrared. The main problem with multimodal image fusion is that each partial sensor of the multispectral monitoring system represents specific characteristics of the environment (brightness, thermal or radar contrasts of objects, etc). Another, no less important problem is the different spatial resolution of sensors of

different physical nature and the inconsistency of their fields of view. Therefore, the problem of effective multimodal image fusion is not trivial. As a criterion for the effectiveness of combining graphical information in a single fused image, which should contain the maximum available useful information from various sensors, the informativeness of this image is chosen. A quantitative assessment of image informativeness is proposed to be performed using an improved method based on multicriteria analysis of image parameters. Multimodal image fusion is performed using the proposed method based on the discrete wavelet transform with the formation of low-frequency wavelet coefficients of the resulting wavelet spectrum by analyzing

the regression communication model between the input images from different sensors. Confirmed experimentally that the proposed method of image fusion makes it possible to synthesize more informative multispectral images than known algorithms. The application of proposed method of image fusion for monitoring objects in difficult observation conditions (smoke, fog, low illumination) allows to increase the efficiency of the multispectral monitoring system and significantly reduce the amount of redundant information coming to the operator of the system.

Key words: image fusion; multispectral monitoring; image informativeness; wavelet transform; regression analysis