

А. П. Гривачевський, С. Є. Фабіровський  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра радіоелектронних пристроїв та систем

## СУМІЩЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ СФОРМОВАНИХ СЕНСОРАМИ РІЗНОЇ ФІЗИЧНОЇ ПРИРОДИ В ПРОЦЕСІ КОМПЛЕКСУВАННЯ СИГНАЛІВ У МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИХ СИСТЕМАХ МОНІТОРИНГУ

© Гривачевський А. П., Фабіровський С. Є., 2018

Розроблено метод, який, на відміну від класичних, дає змогу суміщення зображень, сформованих сенсорами різної фізичної природи в контексті їх комплексування в мультиспектральних системах моніторингу. Підтверджено експериментально, що для суміщення різноспектральних зображень доцільно використовувати критерій, який ґрунтується на максимумі функції взаємної інформації між зображеннями, оскільки він інваріантний до перетворення яскравості між ними.

Ключові слова: прив'язка зображень, суміщення зображень, опорна точка, сенсори різної фізичної природи, комплексування зображень, мультиспектральна система моніторингу.

A. P. Hryvachevskiy, S. E. Fabirovskyy  
Lviv Polytechnic National University,  
Department of Radioelectronic Devices and Systems

## MATCHING UP OF IMAGES WHICH FORMED BY SENSORS OF DIFFERENT PHYSICAL NATURE IN THE PROCESS OF SIGNAL FUSION IN MULTISPECTRAL MONITORING SYSTEMS

© Hryvachevskiy A. P., Fabirovskyy S. E., 2018

Multispectral monitoring systems are becoming more widely used in which the fusion of information obtained in the form of different spectral images is applied. Direct fusion of such images is impossible in connection with the presence of relative images spatial deformations and in connection with the different sensor resolution that form these images. Before fusion of the images, you must bind them to a single coordinate system.

The development of a method that, in contrast to the classical one, allows matching of images formed by sensors of different physical nature in the context of their integration in multispectral monitoring systems is conducted. Reasonably experimentally that for matching of the different spectral images is impractical to use the classic methods used in matching of monospectral images, in particular, least squares method and the normalized correlation coefficient, as appropriate to use methods invariant to brightness conversion. This is the method that uses the maximum of the function of mutual information between images as a criterion for the similarity of the images.

The simulation results show that the method based on the mutual information function gives better results of the different spectral images matching than the other considered methods. The position of the maximum of the mutual information function indicates the optimal displacement between the images despite the different intensity distribution on the images from the thermal imaging camera and the television camera, even with poor visibility in one of the channels.

**Key words: image binding, image matching, reference point, sensors of different physical natures, image fusion, multispectral monitoring system.**

### Вступ

Сьогодні із розвитком систем моніторингу (СМ) та підвищенням вимог до їх технічних параметрів все більшого поширення набувають мультиспектральні системи моніторингу (МСМ). У таких системах інформація від сенсорів різної фізичної природи (РФП) об'єднується (комплексується) в загальне комбіноване зображення, яке повинно містити істотні інформаційні ознаки від всіх комбінованих каналів. Як джерела даних у МСМ можуть використовуватися сенсори, які характеризуються різною інформативністю, а саме: телевізійні (ТВ) сенсори видимого діапазону, інфрачервоні (ІЧ) сенсори, радіолокатори, лазерні локатори та інші [1].

Існує багато різних дво- і триспектральних СМ (наприклад, [2]), в яких застосовано різні підходи до комплексування зображень. Проте в більшості опублікованих у вільному доступі працях, що присвячені цьому питанню, не враховано просторової неузгодженості зображень [1, 3–5], яка зумовлена конструктивними особливостями МСМ, або розглядаються часткові випадки вирішення цієї проблеми [6, 7]. У цих роботах задачу комплексування розбивають на два етапи: прив'язку зображень і безпосередньо синтез комплексованого зображення.

Під прив'язкою зображень слід розуміти процес приведення до єдиної системи координат декількох зображень однієї і тієї самої сцени. Такі зображення можна отримати в різний час, з різної точки спостереження або, як у нашому випадку, з різних сенсорів, причому ці сенсори є РФП, що значно ускладнює завдання їх прив'язки, як показано в [8] для радіометричних та радіолокаційних сенсорів.

Через різну роздільну здатність сенсорів РФП і відносну просторову деформацію вихідних зображень пряме застосування методів комплексування зображень у МСМ є неможливим. Різна роздільна здатність зумовлена різним форматом сенсорів. Наприклад, сьогодні доступні тепловізійні матриці поступаються телевізійним у роздільній здатності в 1,5–2 рази. Своєю чергою, просторові деформації спричинені такими факторами [9]:

- Проблема паралаксу. Між зображеннями виникає відносна деформація, яка залежить від відстані між паралельними візирними осями, наприклад, відеокамери і тепловізора. Тому отримані зображення, залежно від дальності спостереження і кута зору, будуть зміщені одне відносно одного в горизонтальній та вертикальній площинах.

- Похибка забезпечення однакового кута зору в усіх каналах.

Отже, з метою усунення впливу вказаних вище факторів необхідно оцінити параметри деформації вихідних зображень і виконати їх зворотну трансформацію, – так звану прив'язку на основі знайдених параметрів.

Перш ніж перейти до опису існуючих методів прив'язки, розглянемо класичну постановку задачі і зробимо деякі попередні зауваження.

### Постановка задачі

У задачі прив'язки задано два зображення  $I_1$  та  $I_2$ , які розглянуто як функції деякого (наприклад, гільбертового) простору:

$$I_1 : G_1 \rightarrow R \text{ та } I_2 : G_2 \rightarrow R, G_1, G_2 \subset \mathfrak{R}^n, R \subset \mathfrak{R}^m, \quad (1)$$

де  $G_1, G_2$  – області визначення функцій  $I_1$  та  $I_2$  відповідно, а  $R$  – область значень функції. Величина  $n$  – розмірність зображень, яка в більшості випадків дорівнює двом,  $m$  – розмірність вектора значень, що зберігаються у кожному пікселі зображення. Наприклад, для напівтонових зображень  $m=1$ , а для кольорових RGB зображень  $m=3$ .

Для суміщення заданих зображень необхідно знайти таке просторове перетворення  $T : G_1 \rightarrow G_2$ , яке дасть змогу перетворити одне зображення відносно іншого так, щоб відповідні точки на обох зображеннях збіглися, приводячи їх в загальну систему координат:

$$I_1(x) = I_2(T(x)), x \in G_1, T(x) \in G_2, \quad (2)$$

де  $x$  – параметр координати області зображення.

Критерієм точності цього просторового перетворення може бути цільова функція:

$$C_1(T) = \sum_{x \in G_1} [I_1(x) - I_2(T(x))]^2, \quad (3)$$

яка має набути мінімального значення.

Назвемо опорними точками такі точки, для яких відповідні позиції були ідентифіковані на обох зображеннях. У [10] опорними або реперними точками називаються такі точки на двох зображеннях, які є образами однієї і тієї самої ділянки сцени. Під образом на зображенні розуміємо окрему область цього зображення в сукупності з інформацією, яку можна отримати з цієї області, причому розміри і конфігурація образу можуть бути різними.

Оскільки опорні точки повинні точно відображатися просторовим перетворенням, вони відіграють роль обмежень, які має задовольняти просторове перетворення:

$$x'_i = T(x_i), \quad i = 1, 2, \mathbf{K}, N, \quad (4)$$

де  $x_i$  і  $x'_i$  – відповідні опорні точки на першому та другому зображеннях, а  $N$  – кількість пар опорних точок.

Похибки ототожнення опорних точок можна використати для оцінювання точності цього просторового перетворення:

$$C_2(T) = \sum_{i=1}^N |x'_i - T(x_i)|^2. \quad (5)$$

Отже, завдання суміщення зображень зводиться до знаходження такого просторового перетворення  $T$ , яке дає мінімум цільової функції, що задається виразом (3) або (5). Також можна використовувати й інші критерії оцінювання точності, які визначають специфічні для конкретної задачі стратегії пошуку екстремуму цільової функції.

Важливим елементом методу суміщення є тип характерних використовуваних ознак зображення. За цим критерієм виділяють два підходи, що істотно відрізняються: методи, основані на площях, і методи, основані на деталях зображення. У першому випадку характерними ознаками зображення є самі пікселі з відповідними їм значеннями інтенсивностей, тому задача прив'язки зводиться до мінімізації цільової функції, що задається виразом (3) або аналогічним. У другому випадку характерними ознаками можуть бути точки контурів, структурні або геометричні елементи, плями текстур і навіть конкретні об'єкти. При цьому кожна деталь на зображенні задає опорну точку з відповідними координатами. У цьому випадку метою розв'язання є знаходження відповідності між опорними точками, тобто необхідно мінімізувати цільову функцію, що задається виразом (5).

Методи, що ґрунтуються на площях, визнано найзагальнішими, оскільки вони не накладають обмежень на контекст зображень. Також за їх допомогою можна отримувати найточніше суміщення, оскільки при цьому можна ефективно використовувати всю інформацію, яку містить зображення. Однак за цими методами не відрізняють інваріантну інформацію від інформації, що змінюється від зображення до зображення, тому їх складно застосовувати в деяких випадках. Через використання всього обсягу вихідних даних вони трудомісткі з обчислювального погляду, і за їх допомогою часто буває складно шукати глобальне перетворення з великою кількістю параметрів.

Суміщення зображень з використанням різного роду структурних елементів є менш трудомістким з обчислювального погляду, оскільки розмірність вхідних даних за цим підходом значно нижча. Оскільки структурні елементи не використовують безпосередньо значення інтенсивностей пікселів, вони набагато стійкіші до таких відмінностей зображень, як зміна освітлення, сезонні зміни, зміна типу сенсора та інші, що робить їх набагато більш робастними (малочутливими до різних відхилень і неоднорідностей).

### **Вибір ефективного методу прив'язки**

Традиційна техніка прив'язки зображень ґрунтується на вимірюванні або відстані між зображеннями, або міри близькості їхніх образів. Міра близькості образів – це кількісна

характеристика подібності образів. Мірою подібності може бути максимум або мінімум деякого критерію, наприклад, максимум кореляційної функції або мінімум суми квадратів розбіжностей елементів, що становлять образи.

За методом суміщення вимірюють функції міри близькості образів і вибору образів, відповідають один одному. За багатьма методами суміщення один з образів фіксують, а відповідний йому образ шукають (виявляють) на іншому зображенні за допомогою обраного методу суміщення. У цьому випадку фіксований образ називається еталоном.

*Метод найменших квадратів* – математичний метод, оснований на мінімізації суми квадратів відхилень деяких функцій від шуканих змінних [11]. Але цей метод має два суттєві недоліки:

- залежність результату від лінійних розмірів образу і зображення;
- метод не інваріантний навіть до найпростіших перетворень яскравості.

Тому прийнятнішим є використання кореляційної метрики, а саме нормованого коефіцієнта кореляції (НКК) [12]. Теоретичним обґрунтуванням застосування кореляційного методу є його оптимальність для виявлення детермінованого сигналу в білому шумі з гауссовим розподілом.

Суттєвим недоліком кореляційного методу є поява радіометричних (яскравісних) і особливо геометричних спотворень. Зокрема спостерігається швидке зменшення кореляційного зв'язку за так званих ракурсних викривлень, наприклад, при поворотах зображень. Присутність спотворень типу “warping” (викривлення) зазвичай вже не дає змоги використовувати кореляційний метод.

Для побудови більш робастних алгоритмів, оснований на площях, доцільно використовувати критерії, інваріантні до перетворення яскравості. Одним з таких методів є теоретико-інформаційний підхід до поєднання зображень максимізацією функції взаємної інформації [13–15]. Однак у [13] розглянуто покращення зображення, копії якого в різних спектральних діапазонах сформовані однією камерою. Тому за цим підходом не враховують можливої просторової неузгодженості зображень різних спектральних діапазонів між собою, а також різної їх роздільної здатності. В роботах [14, 15] пропонується використовувати функцію взаємної інформації для суміщення моноспектральних зображень зрізів досліджуваних об'єктів у медицині.

Пропонується оцінити використання функції взаємної інформації для суміщення зображень, отриманих сенсорами РФП у різних спектральних діапазонах.

Для таких зображень функцію взаємної інформації прийнято обчислювати з використанням відокремленої та спільної ентропії  $H(\cdot)$  зображень.

$$MI(I_1, I_2) = H(I_1) + H(I_2) - H(I_1, I_2), \quad (6)$$

де  $H(I_1), H(I_2)$  – відособлені ентропії зображень  $I_1$  та  $I_2$  відповідно,  $H(I_1, I_2)$  – спільна ентропія  $I_1$  та  $I_2$ .

Відособлену ентропію для цифрового напівтонового зображення  $I$  з 256-ма градаціями інтенсивності пікселів можна обчислити за формулою Шенона:

$$H(I) = - \sum_{i=0}^{255} P(i) \log_2 P(i), \quad (7)$$

де  $P(i) = N(i)/K$  – імовірність появи пікселя з інтенсивністю  $i = 0, 1, \dots, K, 255$ ;  $N(i)$  – вектор значень гістограми зображення  $I$ ;  $K$  – кількість пікселів зображення.

Спільну ентропію для цифрових напівтонових зображень  $I_1$  та  $I_2$  з 256-ма градаціями інтенсивності пікселів, обчислюють за формулою:

$$H(I_1, I_2) = - \sum_{i_1=0}^{255} \sum_{i_2=0}^{255} P(i_1, i_2) \log_2 P(i_1, i_2), \quad (8)$$

де  $P(i_1, i_2)$  – спільна імовірність появи пікселів з інтенсивністю  $i_1$  та  $i_2$ .

Величина функції взаємної інформації є інваріантною до довільних глобальних (не залежних від координат) перетворень яскравості зображень, а не тільки до лінійних перетворень, як у випадку кореляції, що робить цю міру подібності образів значно універсальнішою. Для оцінювання

критерію максимуму функції взаємної інформації створимо програмну модель для суміщення зображень на її основі та проведемо комп'ютерний експеримент.

### Результати моделювання

Виконаємо суміщення двох зображень сцени, одне з яких сформовано телевізійною камерою (рис. 1. а), а інше – тепловізійною (рис. 1. б).



а б  
Рис. 1. Вихідні зображення: а – телевізійне; б – тепловізійне

Виконавши пошук опорних точок за допомогою виразу (6), отримаємо розподіл функції взаємної інформації між заданими зображеннями залежно від зміщення одного зображення відносно іншого (рис. 2).

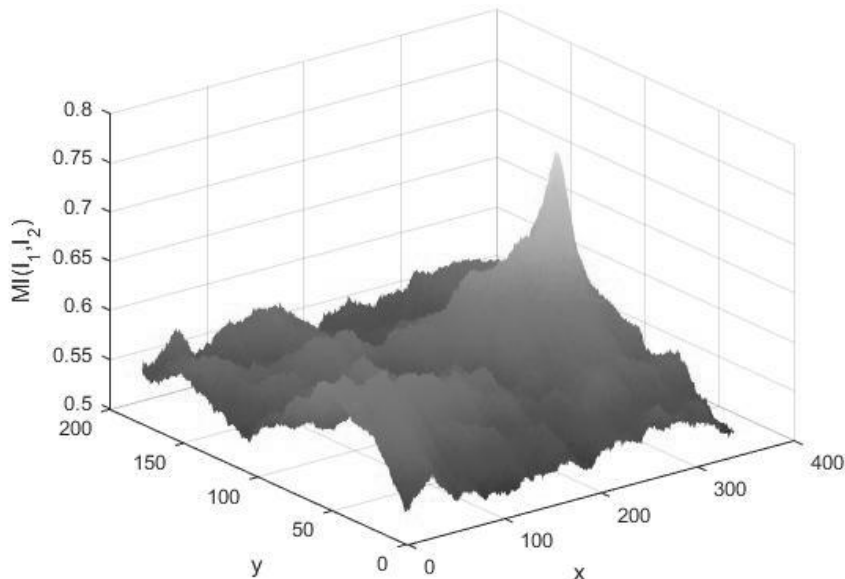


Рис. 2. Функція взаємної інформації для телевізійного та тепловізійного зображень

Положення максимуму функції взаємної інформації на рис. 2 визначає оптимальне зміщення між еталоном (фіксованим фрагментом першого зображення) і образом (фрагментом другого зображення), що дає пару опорних точок для суміщення.

Маючи координати опорних точок, можна знайти значення зсуву між елементами зображень та виконати суміщення зображень, результат якого показано на рис. 3.



*Рис. 3. Результат суміщення телевізійного та тепловізійного зображень*

Проведемо моделювання, припускаючи, що суміщення проводиться в погіршених погодних умовах – за наявності туману або дії димової завіси. Результат суміщення за цих умов показано на рис. 4.



*Рис. 4. Результат суміщення телевізійного та тепловізійного зображень за погіршеної видимості у видимому (телевізійному) каналі*

Отриманий результат (рис. 4) свідчить, що використання функції взаємної інформації дає змогу сумістити мультиспектральні зображення, які сформовані сенсорами РФП, навіть за погіршення видимості в одному з каналів.

### **Висновки**

Для точного комплексування зображень у мультиспектральних системах моніторингу необхідно спочатку виконати їх суміщення у зв'язку з різною роздільною здатність сенсорів і відносними просторовими деформаціями зображень, сформованих цими сенсорами. У роботі показано, що для прив'язки різноспектральних зображень недоцільно використовувати класичні

методи, які застосовують при суміщенні моноспектральних зображень, зокрема, метод найменших квадратів та нормований коефіцієнт кореляції, а доцільно використовувати методи, інваріантні до перетворення яскравості. Таким є метод, що використовує як критерій подібності зображень максимум функції взаємної інформації між зображеннями. Положення максимуму функції взаємної інформації вказує на оптимальне зміщення між зображеннями, незважаючи на різний розподіл інтенсивності на зображеннях, сформованих сенсорами різної фізичної природи, навіть за поганої видимості в одному з каналів.

1. Иванов Е. Л. Слияние изображений в многоканальной системе наблюдения местности / Е. Л. Иванов, М. С. Смагин // Датчики и системы. – 2006. – № 11. – С. 6–9. 2. E2VS Displays Potential as Breakthrough Product [Electronic resource] // Aviation week network, October 2015. – Access mode: <http://aviationweek.com/nbaa-2015/e2vs-displays-potential-breakthrough-product> (last access: 10.04.2017). – Title from the screen. 3. Canga E. F. Image fusion. Project report for the degree of Meng. in electrical and electronic engineering / E. F. Canga. – University of Bath, 2002. 4. Stathaki T. Image fusion: Algorithm and Applications / T. Stathaki. – Elsevier, 2008. – 519 с. 5. Blum R. S. Multi-Sensor Image Fusion and Its Applications. / R. S. Blum, Z. Liu // Signal Processing and Communications. – 2006. – P. 40–42. 6. Аксенов О. Ю. Совмещение изображений / О. Ю. Аксенов // ЦОС № 3. – 2005. – С. 51–55. 7. Войтов В. А. Способ формирования единого информационного поля / В. А. Войтов, А. В. Голицын, Е. В. Дегтярев, П. В. Журавлев, Г. Е. Журов, В. Б. Шлишевский // Оптический журнал. – Т. 76. – 2009. – № 12. – С. 84–87. 8. Зубков А. М. Интегрированные системы локационного мониторинга с комплексованием информации сенсоров разных диапазонов спектра электромагнитных волн / А. М. Зубков, Л. В. Лазько, Д. О. Мимриков, И. Н. Прудис // Прикладная радио-электроника. Состояние и перспективы развития: 4-й между. Радиоэлектронный форум, 18–21 окт. 2011 г.: тезисы докл. – Х., 2011. – С. 170–173. 9. Душена В. А. Сравнительный анализ субпиксельных алгоритмов при совмещении изображений / В. А. Душена, М. Л. Усс // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2011. – № 4. – С. 41–51. 10. Грузман И.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учеб. пособ. / И. С. Грузман, В. С. Киричук, В. П. Косых, Г. И. Перетягин, А. А. Спектор. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с. 11. Красильщиков М.Н. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / М. Н. Красильщиков, Г. Г. Себряков. – М.: Изд-во Физматлит, 2009. – 554 с. 12. Lewis J. P. Fast Normalized Cross-Correlation / J. P. Lewis. – Industrial Light & Magic, 1995. 13. Raghavendra R. Mutual Information Based Multispectral Image Fusion for Improved Face Recognition / R. Raghavendra, S. Venkatesh, K. B. Raja, F. A. Cheikh and C. Busch // 12th International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems (SITIS), Naples, 2016. – P. 62–68. 14. Pradhan S. Enhanced mutual information based medical image registration / S. Pradhan and D. Patra // IET Image Processing. Vol. 10. – No. 5. – 2016. – P. 418–427. 15. Sahoo P. K. Image registration using mutual information with correlation for medical image / P. K. Sahoo, U. C. Pati // 2015 Global Conference on Communication Technologies (GCCT), Thuckalay, 2015. – P. 34–38.

### References

1. Ivanov, E. L. and Smagin, M. S. (2006), “Merging images in a multichannel terrain observation system”, *Sensors and systems*, no. 11, pp. 6–9. 2. “E2VS Displays Potential as Breakthrough Product”, *Aviation week network*, October 2015, available at: <http://aviationweek.com/nbaa-2015/e2vs-displays-potential-breakthrough-product> (Accessed 10 April 2017). 3. Canga, E. F. (2002), *Image fusion. Project report for the degree of Meng. in electrical and electronic engineering*, University of Bath. 4. Stathaki, T. (2008), *Image fusion: Algorithm and Applications*, Elsevier, 519 p. 5. Blum, R. S. and Liu, Z. (2006), “Multi-Sensor Image Fusion and Its Applications”, *Signal Processing and Communications*, pp. 40–42. 6. Aksenov, O. Yu. (2005), “Image combination”, *DSP*, no. 3, pp. 51–55. 7. Voitov, V. A., Golitsyn, A. V., Degtyarev, E. V., Zhuravlev, P. V., Zhurov, G. E. and Shlishevsky, V. B. (2009), “The way of a single information field formation”, *Optical journal*, vol. 76, no. 12, pp. 84–87. 8. Zubkov, A. M., Lazko, L. V.,

Mymrikov, D. O., and Prudyus, I. N (2011), "Integrated monitoring systems with information integration of sensors in different parts of the spectrum of electromagnetic waves", *Applied Radio Electronics. Status and prospects of development: 4th intern. Radio electronics forum*, Oct. 18–21. 2011. pp. 170–173.

9. Dushepa, V. A. and Uss, M. L. (2011), "Comparative analysis of sub-pixel algorithms with image matching", *Radio electronic and computer systems*, no 4, pp. 41–51.

10. Gruzman, I. S., Kirichuk, V. S., Kosykh, V. P., Peretyagin, G. I. and Spector, A. A. (2002), *Digital Image Processing in Information Systems: Tutorial*, Novosibirsk: Publishing house of the National Technical University, 352 p.

11. Krasil'shchikov, M. N. and Sebryakov, G. G. (2009), *Modern information technologies in the tasks of navigation and guidance of unmanned maneuverable aircraft*, Moscow: Fizmatlit Publishing House, 554 p.

12. Lewis, J. P. (1995), *Fast Normalized Cross-Correlation*, Industrial Light & Magic.

13. Raghavendra, R., Venkatesh, S., Raja, K. B., Cheikh, F. A. and Busch, C. (2016), "Mutual Information Based Multispectral Image Fusion for Improved Face Recognition", *12th International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems (SITIS)*, Naples, pp. 62–68.

14. Pradhan, S. and Patra, D. (2016), "Enhanced mutual information based medical image registration", *IET Image Processing*, vol. 10, no. 5, pp. 418–427.

15. 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)*, Thuckalay, pp. 34–38.