

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ГРИВАЧЕВСЬКИЙ АНДРІЙ ПЕТРОВИЧ**

УДК 621.397

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИХ  
СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ШЛЯХОМ КОМПЛЕКСУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ  
ВИДИМОГО ТА ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНІВ**

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

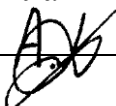
(шифр і назва спеціальності)

05 «Технічні науки»

(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 /А. П. Гривачевський/

Науковий керівник:  
заслужений працівник освіти України,  
доктор технічних наук, професор  
Прудіус Іван Никифорович

*Ідентичність усіх примірників дисертації*

**ЗАСВІДЧУЮ:**

*Вчений секретар спеціалізованої вченої*

*ради Д 35.052.10*

*Л. В. Демидов/*

Львів – 2018

## АНОТАЦІЯ

*Гривачевський А. П.* Підвищення інформативності мультиспектральних систем моніторингу шляхом комплексування зображень видимого та інфрачервоного діапазонів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.12.17 – «Радіотехнічні та телевізійні системи» (172 – Телекомунікації та радіотехніка). – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2018.

Дисертація присвячена розв'язанню актуального науково-технічного завдання розроблення методів підвищення ефективності, а саме підвищення інформативності та зменшення кількості надлишкової інформації, яка формується мультиспектральними оптико-електронними системами моніторингу об'єктів та сцен, що мають в своєму складі сенсори видимого та інфрачервоного діапазонів електромагнітних хвиль.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, сформульовано мету дослідження та науково-технічні завдання, необхідні для її досягнення, показано зв'язок дослідження з науковими програмами та темами, наведено наукову новизну отриманих результатів, їх практичну цінність та особистий внесок здобувача, надано інформацію про апробацію результатів роботи.

Перший розділ – «Аналіз методів та алгоритмів обробки зображень в сучасних системах моніторингу» – присвячено аналізу літератури за темою дисертації. В розділі викладені основні підходи, які сьогодні використовуються для підвищення ефективності систем моніторингу. Встановлено, що найбільш перспективним підходом до підвищення ефективності, зокрема для підвищення інформативності систем моніторингу, є комплексування зображень, отриманих в різних діапазонах електромагнітних хвиль при мультиспектральному моніторингу об'єктів та сцен. Проведено аналіз та класифікацію існуючих на

даний час методів комплексування зображень. Розглянуто алгоритми п'ятнадцяти різних методів комплексування на рівні пікселів та вказано їх переваги та недоліки. На основі проведеного аналізу визначено, що підвищення інформативності мультиспектральних систем моніторингу можна досягти за рахунок комплексування зображень з різних спектральних діапазонів (мультимодального комплексування), для чого необхідно розв'язати ряд науково-технічних завдань, зокрема: розробити метрику оцінки інформативності зображень; визначити метод точної просторової синхронізації зображень різних діапазонів та розробити метод комплексування зображень, який би дав можливість отримати комплексоване зображення з якомога більшою інформативністю.

У другому розділі – «Дослідження процесу комплексування зображень видимого та інфрачервоного діапазонів» – удосконалено багатокритеріальну метрику оцінювання інформативності зображень, визначено ефективний критерій прив'язки зображень видимого та інфрачервоного діапазонів, проведено моделювання теоретично розглянутих в розділі I методів комплексування та оцінено їх ефективність при комплексуванні зображень видимого та інфрачервоного діапазонів.

Під час дослідження існуючих критеріїв прив'язки зображень, експериментально визначено, що найбільш точно синхронізувати зображення видимого та інфрачервоного діапазонів дає змогу метод, заснований на максимізації взаємної інформації.

На основі аналізу та моделювання існуючих методів оцінювання інформативності зображень, експериментально встановлено, що при їх застосуванні отримуються неоднозначні результати, зокрема отримується завищена оцінка при низькій інформативності зображення, що погано корелює з експертною оцінкою інформативності. У зв'язку з цим удосконалено мультикритеріальну метрику оцінки інформативності зображень. Удосконалення метрики полягає у заміні ентропії, як одного з критеріїв метрики, на градієнт зображення; пороговому обмеженні кількості значущих

градацій яскравості; оцінюванні коефіцієнта контрасту зображення на основі середніх значень контрастів в його локальних областях. З урахуванням внесених змін, удосконалена метрика дає змогу оцінити інформативність зображення найбільш точно серед розглянутих методів (з коефіцієнтом кореляції  $> 0.8$ , що на 24,9% більше порівняно з методом на основі ентропії).

Проведено комп'ютерне моделювання проаналізованих в розділі I методів при комплексуванні зображень видимого та інфрачервоного діапазонів. Найбільш ефективними методами для комплексування зображень видимого та інфрачервоного діапазонів та такими, що стабільно дають хороші результати при комплексуванні зображень різного сюжетного змісту є два методи, а саме: комплексування на основі піраміди Лапласа та комплексування на основі дискретного вейвлет-перетворення. Причому найбільший потенціал для удосконалення має метод комплексування на основі дискретного вейвлет-перетворення, оскільки при його реалізації можна змінювати чотири вхідні параметри: 1) форму базисної вейвлет-функції; 2) кількість рівнів розкладу; 3) правило формування низькочастотних вейвлет-коефіцієнтів та 4) правило формування високочастотних вейвлет-коефіцієнтів результуючого вейвлет-спектру. Тому саме на основі дискретного вейвлет-перетворення доцільно розробити новий метод комплексування, що дасть змогу підвищити ефективність, зокрема інформативність, мультиспектральної системи моніторингу в складних умовах спостереження.

Третій розділ – «Розробка методу комплексування зображень видимого та інфрачервоного діапазонів на основі дискретного вейвлет перетворення» – присвячено розробці та дослідженню методу комплексування зображень видимого та інфрачервоного діапазонів, отриманих в складних умовах спостереження на основі дискретного вейвлет-перетворення.

Розроблений метод та алгоритм мультимодального комплексування зображень видимого та інфрачервоного діапазонів на основі дискретного вейвлет-перетворення в якому, на відміну від відомих методів, формування низькочастотних вейвлет-коефіцієнтів результуючого вейвлет-спектра



комплексованого зображення базується на основі регресійного аналізу відповідних частин вейвлет-спектрів вхідних зображень, що дає змогу підвищити інформативність комплексованого зображення приблизно на 10%, а також зменшити обсяг даних без втрати корисної інформації в середньому на 26.72%, порівняно з сумарним обсягом даних, що отримуються каналами видимого та інфрачервоного діапазонів. А розвинена модель комплексування дає змогу синтезувати кольорове комплексоване зображення, яке є більш адаптованим для психофізичного сприйняття людиною-оператором, ніж комплексоване зображення в градаціях сірого, що також є важливим при розробці систем, де кінцевим споживачем інформації є людина.

У четвертому розділі – «Моніторинг рухомих об'єктів мультиспектральною системою з комплексуванням зображень видимого та інфрачервоного діапазонів» – проведено дослідження функціонування мультиспектральної системи моніторингу з застосуванням запропонованого методу комплексування зображень при спостереженні за рухомими об'єктами.

Розроблений адаптивний до дестабілізуючих факторів метод та алгоритм виявлення рухомих об'єктів під час відеомоніторингу дає змогу ефективно виявляти рухомі об'єкти при наявності дестабілізуючих факторів, зокрема: виконувати коректне формування моделі фону навіть при наявності інтенсивного руху в полі зору камери; адаптуватися, як в просторі так і в часі, до зміни рівня шумів цифрової відеокамери та зміни фону; статистична оцінка порогу бінаризації, яка здійснюється під час роботи алгоритму, дає змогу використовувати даний алгоритм практично з будь-якою цифровою відеокамерою, незалежно від рівня її власних шумів, без емпіричного налаштування параметрів алгоритму; видалення рухомих тіней дозволяє усуває їх негативний вплив на якість виявлення рухомих об'єктів; візуалізація результатів виявлення шляхом виділення площі рухомих об'єктів в їх природних кольорах без малоінформативного фону дає змогу значно зменшити обсяг даних, які надходять із відеокамери.

Проведено комплексування відеосигналів видимого та інфрачервоного каналів системи моніторингу розробленим методом та виявлення рухомих об'єктів по комплексованому відеосигналі за допомогою розробленого алгоритму виявлення руху. Результати експериментів підтверджують, що на основі розроблених технологій за рахунок підвищення інформативності зображень досягається збільшення імовірності виявлення, розпізнавання та ідентифікації рухомих об'єктів мультиспектральною системою моніторингу, що, в свою чергу, дає змогу збільшити віддаль ефективного спостереження на 11%.

*Ключові слова:* мультиспектральний моніторинг, інформативність зображення, мультимодальне комплексування зображень, дискретне вейвлет перетворення, виявлення рухомих об'єктів.

Список публікацій здобувача:

*Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації:*

1. Гривачевський А. П. Аналіз методів комплексування сигналів парціальних спектральних каналів в системах моніторингу об'єктів та сцен / А. П. Гривачевський // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2015. – № 818: Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 55–61. (Index Copernicus)
2. Prudyus I. Factors affecting the quality of formation and resolution of images in remote sensing systems / I. Prudyus, V. Tkachenko, P. Kondratov, S. Fabirovskyy, L. Lazko, A. Hryvachevskiy // Computational Problems of Electrical Engineering. – 2015. – Volume 5, № 1. – P. 41–46.
3. Гривачевський А. П. Адаптивний алгоритм виявлення рухомих об'єктів при відеомоніторингу / А. П. Гривачевський, І. Н. Прудіус // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2016. – № 849: Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 168–172. (Index Copernicus)
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”. – 2017. – № 874: Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 73–80. (Index Copernicus)

5. Гривачевський А. П. Підвищення інформативності мультиспектральних зображень шляхом мультимодального комплексування / А. П. Гривачевський, І. Н. Прудіус // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2018. – № 73. – с. 40–49. (Web of Science)

6. Prudyus I. Monitoring of dynamic objects by observation systems of visible range of waves / I. Prudyus, V. Tkachenko, L. Lazko, P. Kondratov, S. Fabirovskyy, A. Hryvachevskyy // Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej (WAT). – 2018. – Volume 67, № 2. – P. 15–26. (Index Copernicus)

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

7. Prudyus I. Sub-pixel Based Forming of High-resolution Images / I. Prudyus, V. Tkachenko, L. Lazko, S. Fabirovskyy, A. Gryvachevskyy // The 15<sup>th</sup> International Conference on Computation Problems of Electrical Engineering (CPEE-2014), 9<sup>th</sup> – 12<sup>th</sup> of september 2014.: Proceedings of abstracts. – Terchová, Slovak Republic. – 2014. – P. 24.

8. Фабіровський С. Є. Формування зображень з підвищеною роздільною здатністю при субпіксельній обробці / С. Є. Фабіровський, А. П. Гривачевський // Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті: 19-й міжн. молодіж. форум, 20 – 22 квіт. 2015 р.: тези доп., Том 3. – Харків, 2015. – С. 104–105.

9. Prudyus I. Earth surface diagnostic based on cluster analysis of multispectral monitoring data / I. Prudyus, V. Tkachenko, P. Kondratov, L. Lazko, S. Fabirovskyy, A. Gryvachevskyy // IX Krajowa Konferencja “Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów” (DIAG’2015), 22 – 25 września 2015.: Streszczenia referatów. – Ustroń, Polska. – 2015. – S.79.

10. Hryvachevskyy A. Image segmentation based on cluster analysis of multispectral monitoring data / A. Hryvachevskyy, I. Prudyus // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET’2016):

Proceedings of the XIII<sup>th</sup> International Conference, February 23 – 26, 2016. – Lviv-Slavske, Ukraine. – 2016. – P. 226–229. (Scopus)

11. Kondratov P. Detection and allotment of the objects based on multispectral monitoring / P. Kondratov, A. Ohanesyan, V. Tkachenko, I. Prudyus, L. Lazko, A. Hryvachevskiy // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET'2016): Proceedings of the XIII<sup>th</sup> International Conference, February 23 – 26, 2016. – Lviv-Slavske, Ukraine. – 2016. – P. 259–262. (Scopus)

12. Гривачевський А. П. Кластерний аналіз даних мультиспектрального моніторингу / А. П. Гривачевський // Радіоелектроніка і молодь в XXI столітті: 20-й ювіл. міжн. молодіж. форум, 19 – 21 квіт. 2016 р.: тези доп., Том 3. – Харків, 2016. – С. 34–35.

13. Гривачевський А. П. Моделювання процесу детектування рухомих об'єктів по даних відеомоніторингу / А. П. Гривачевський, Л. В. Лазько, С. Є. Фабіровський // Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (УкрМіКо'2016/UkrMiCo'2016), 11 – 16 вер. 2016 р.: тези доп., – Київ, 2016. – С. 468–471.

14. Hryvachevskiy A. Improvement of Segmentation Quality of Multispectral Images by Increasing Resolution / A. Hryvachevskiy, I. Prudyus, L. Lazko, S. Fabirovskyy // Computation Problems of Electrical Engineering (CPEE-2016): XVII International Workshop, 14<sup>th</sup> – 17<sup>th</sup> September 2016.: Proceedings of Workshop. – Sandomierz, Poland. – 2016. (Scopus)

15. Hryvachevskiy A. An adaptive algorithm of moving objects detection / A. Hryvachevskiy, V. Nichoha, I. Prudyus, S. Fabirovskyy // Systemy Rozpoznania i Walki Radioelektronicznej (KNTWERE-2016): XI Konferencja Naukowo-Techniczna, 21 – 23 listopada 2016. – Ołtarzew, Polska. – 2016. – S. 24.

16. Гривачевський А. П. Виявлення рухомих тіней та усунення їх впливу на точність виявлення рухомих об'єктів під час відеомоніторингу / А. П. Гривачевський, Л. В. Лазько, С. Є. Фабіровський, Ю. О. Демчина // Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в

інфокомунікаційних системах: V-а Міжнародна науково-практична конференція, 3 – 5 лист. 2016 р.: тези доп., – Чернівці, 2016. – С. 177–178.

17. Гривачевський А. П. Пристрій моніторингу динамічних об'єктів у видимому діапазоні хвиль / А. П. Гривачевський, С. Є. Фабіровський // Радіоелектроніка і молодь в XXI столітті: 21-й міжн. молодіж. форум, 25 – 27 квіт. 2017 р.: тези доп., Том 3. – Харків, 2017. – С. 57–58.

18. Prudyus I. Monitoring of the static and dynamic objects by the visible range systems of waves / I. Prudyus, V. Tkachenko, L. Lazko, P. Kondratov, S. Fabirovskyy, A. Hryvachevskiy // Metrologia Wspomagana Komputerowo (MWK'2017): XI Szkoła-Konferencja, 23–26 maja, 2017. – Waplewo, Polska. – 2017. – S. 65.

19. Hryvachevskiy A. The influence of destabilizing factors in the high resolution multispectral imaging systems / A. Hryvachevskiy, S. Fabirovskyy, L. Lazko, V. Tkachenko // 2017 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2017), 11 – 17 September, 2017. – Odessa, Ukraine. – 2017. (Scopus)

20. Prudyus I. Improving the quality and informativeness of moving objects detecting / I. Prudyus, L. Lazko, A. Hryvachevskiy, S. Fabirovskyy // Advanced Rail Technologies (ART'2017): 6th International Scientific Conference, 15 – 16 November, 2017: Conference Proceedings. – Warszawa, Poland. – 2017. – S. 93.

21. Гривачевський А. П. Комплексування зображень в мультиспектральних системах моніторингу з сенсорами різної фізичної природи / А. П. Гривачевський, А. М. Зубков, Л. В. Лазько, Д. О. Мимріков, І. Н. Прудиус, С. Є. Фабіровський // Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку: VI-й Міжнародний радіоелектронний форум (МРФ–2017), 24 – 26 жовтня, 2017 р. – Харків. – С. 269–272.

22. Hryvachevskiy A. Methods of multispectral image fusion at the pixel level / A. Hryvachevskiy, I. Prudyus, L. Lazko, S. Fabirovskyy // 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and

Computer Engineering (TCSET'2018), February 20 – 24, 2018: Conference Proceedings – Lviv-Slavske, Ukraine. – 2018. (Scopus)

23. Hryvachevskyi A. Infrared and visible image fusion. XXXIV konferencja elektroniki telekomunikacji i energetyki studentów i młodych pracowników nauki (SECON-2018), 26 – 27 kwietnia 2018: Materiały konferencyjne. – Warszawa, Polska. – 2018. – S. 16.

## ANNOTATION

*Hryvachevskyi A. P.* Improving the informativeness of multispectral monitoring systems by image fusion of the visible and infrared ranges. – On the rights of the manuscript.

A thesis submitted in fulfilment of the Ph.D. degree in technical sciences on specialty 05.12.17 – «Radioengineering and Television Systems» (172 – Telecommunications and Radio Engineering). – Lviv Polytechnic National University of Ministry for Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

The dissertation is devoted to the solution of the actual scientific and technical task of developing methods for improving the efficiency, namely, increasing the informativeness and reducing the amount of redundant information generated by multispectral optoelectronic monitoring systems of objects and scenes that have in their composition sensors of the visible and infrared electromagnetic ranges of waves.

The introduction substantiates the relevance of the topic of the dissertation research, formulates the purpose of the research and the scientific and technical problems necessary for its achievement, shows the connection of the research with scientific programs and themes, presents the scientific novelty of the obtained results, their practical value and the individual contribution of the applicant, information about approbation of the work results.

The first section – "Analysis of methods and algorithms for image processing in modern monitoring systems" – is devoted to the analysis of literature on the topic of the dissertation. In the section outlined the main approaches currently used to improve monitoring systems (MS). It is established that the most promising approach

to improving the efficiency, in particular for increasing the informativeness of the MS, is the image fusion obtained in various ranges of electromagnetic waves with multispectral monitoring (MSM) of objects and scenes. The analysis and classification of existing methods of image fusion are carried out. The algorithms of fifteen different image fusion methods at the pixel level are considered and their advantages and disadvantages are stated. On the basis of the analysis, it was determined that the increase of the informativeness of MSM can be achieved by image fusion from different spectral ranges (multimodal image fusion), for which it is necessary to solve a number of scientific and technical tasks, in particular: to develop a metric for evaluating the informativeness of images; to determine the method of accurate spatial synchronization of images of different ranges and to develop a method of image fusion, which would give the opportunity to get a fused image with as much informative as possible.

In the second section – "Investigation of the process of image fusion of visible and infrared ranges" – the multicriteria metrics for estimating the informativeness of images have been improved, an effective criterion of binding of images of visible and infrared ranges has been determined, the simulation of the theoretical approaches considered in section I of fusion methods has been carried out, and their efficiency in visible and infrared ranges image fusion has been estimated.

During the study of existing image binding criteria, it has been experimentally determined that the most accurate synchronization of images of visible and infrared ranges provides a method based on maximizing of the mutual information.

On the basis of analysis and simulation of existing methods for evaluating the informativeness of images, it has been experimentally established that their application results in ambiguous results, in particular an overestimation is obtained with a low informative image that is poorly correlated with an expert evaluation of informativeness. In connection with this, the multi-criteria metric of image informativeness evaluation is improved. The improvement of the metric is to replace the entropy, as one of the metric criteria, with the image gradient; threshold limit of the number of significant brightness gradations; estimating of the image contrast ratio

based on the average values of contrasts in its local areas. Taking into account the changes made, the improved metric makes it possible to assess the informativeness of image most precisely among the considered methods (with a correlation coefficient  $> 0.8$ , which is 24.9% more compared to the entropy method).

The computer simulation of the analyzed in the section I methods at visible and infrared image fusion is carried out. Two methods are the most effective methods for visible and infrared image fusion and those that stably yield good results when fusion images of different plot contents: fusion on the basis of the Laplace's pyramid and the fusion on the basis of discrete wavelet transformation. Moreover, the greatest potential for improvement is the method of fusion on the basis of a discrete wavelet transform, since during its implementation it is possible to change the four input parameters: 1) the form of the base wavelet function; 2) the number of the schedule levels; 3) the rule for the formation of low-frequency wavelet coefficients; and 4) the rule for the formation of high-frequency wavelet coefficients of the resulting wavelet spectrum. Therefore, it is expedient to develop a new method of fusion based on discrete wavelet transformation, which will allow increasing efficiency, in particular, informativeness, multispectral monitoring system in difficult observation conditions.

The third section – "Development of the method of visible and infrared image fusion based on discrete wavelet transformation" – is devoted to the development and research of the image fusion method of visible and infrared ranges obtained in difficult observation conditions on the basis of discrete wavelet transformation.

The method and algorithm of multimodal image fusion of visible and infrared ranges based on discrete wavelet transformation are developed, in contrast to the known methods, the formation of low-frequency wavelet coefficients of the resulting wavelet spectrum of the fused image is based on the regression analysis of the corresponding parts of the wavelet spectra of the input images, which makes it possible to increase the informativeness of the fused image by about 10%, as well as to reduce the amount of data without loss of useful informs an average of 26.72% compared to the total amount of data received by channels of visible and infrared ranges. A well-developed model of fusion allows to synthesize a colour fused image,



which is more adapted for the psychophysical perception of a human operator than a fused image in grayscale, which is also important in the development of systems where the end user of information is a human.

In the fourth section – "Monitoring of moving objects by a multispectral system with visible and infrared image fusion" – the research of the functioning of the multispectral monitoring system with the application of the proposed method of image fusion in the monitoring of moving objects was conducted.

Developed an adaptive to destabilizing factors method and algorithm for detecting moving objects during video monitoring enables to effectively moving objects detection in the presence of destabilizing factors, in particular: to perform the correct formation of the background model even in the presence of intense movement in the camera field of view; adapt, both in space and in time, to change the level of noise of a digital video camera and change the background; the statistical estimation of the binarization threshold performed during the operation of the algorithm makes it possible to use this algorithm with practically any digital video camera, regardless of the level of its own noises, without empirical adjustment of the parameters of the algorithm; removal of moving shadows eliminates their negative impact on the quality of detection of moving objects; visualizing of detection results by allocating the area of moving objects in their natural colours without a small informative background allows you to significantly reduce the amount of data that comes from the video camera.

Fusion of video signals of visible and infrared channels of the monitoring system by the developed method and detection of moving objects on fused video signal by using of the developed algorithm of motion detection was carried out. The experimental results show that based on technologies developed by improving the informativeness of images is achieved by increasing the probability of detection, recognition and identification of moving objects multispectral monitoring system, which in turn maximizes the effective observation distance by 11%.

*Keywords:* multispectral monitoring, image informativeness, multimodal image fusion, discrete wavelet transformation, moving object detection.

The list of author's publications:

*Proceedings where basic scientific results of thesis are published:*

1. Hryvachevskiy A. Analysis of the methods of signal data fusion of partial spectral channels in the monitoring systems of objects and scenes / A. Hryvachevskiy // Herald of Lviv Polytechnic National University, Series of Radioelectronics and Telecommunications, No. 818. – Lviv. – 2015. – P. 55-61. (Index Copernicus)
2. Prudyus I. Factors affecting the quality of formation and resolution of images in remote sensing systems / I. Prudyus, V. Tkachenko, P. Kondratov, S. Fabirovskyy, L. Lazko, A. Hryvachevskiy // Computational Problems of Electrical Engineering. – 2015. – Volume 5, № 1. – P. 41–46.
3. Hryvachevskiy A. Adaptive algorithm of moving objects detection in video monitoring / A. Hryvachevskiy, I. Prudyus // Herald of Lviv Polytechnic National University, Series of Radioelectronics and Telecommunications, No. 849. – Lviv. – 2016. – P. 168-172. (Index Copernicus)
4. Hryvachevskiy A. Matching up of images which formed by sensors of different physical nature in the process of signal fusion in multispectral monitoring systems / A. Hryvachevskiy, S. Fabirovskyy // Herald of Lviv Polytechnic National University, Series of Radioelectronics and Telecommunications, No. 874. – Lviv. – 2017. – P. 73-80. (Index Copernicus)
5. Hryvachevskiy A. Enhancing the Informativeness of Multispectral Images by means of Multimodal Image Fusion / A. Hryvachevskiy, I. Prudyus // Herald of NTUU KPI, Series of Radioengineering and Radio Instrumentation, No. 73. – Kyiv. – 2018. – P. 40-49. (Web of Science)
6. Prudyus I. Monitoring of dynamic objects by observation systems of visible range of waves / I. Prudyus, V. Tkachenko, L. Lazko, P. Kondratov, S. Fabirovskyy, A. Hryvachevskiy // Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej (WAT). – 2018. – Volume 67, № 2. – P. 15–26. (Index Copernicus)

*Proceedings that certify an approvement of thesis:*

7. Prudyus I. Sub-pixel Based Forming of High-resolution Images / I. Prudyus, V. Tkachenko, L. Lazko, S. Fabirovskyy, A. Gryvachevskyy // The 15<sup>th</sup>

International Conference on Computation Problems of Electrical Engineering (CPEE-2014), 9<sup>th</sup> – 12<sup>th</sup> of september 2014.: Proceedings of abstracts. – Terchová, Slovak Republic. – 2014. – P. 24.

8. Fabirovskyy S. Image formation with enhanced resolution at subpixel processing / S. Fabirovskyy, A. Hryvachevskiy // 19th International Youth Forum: Radio electronics and youth in the 21st century, April 20 – 22, 2015.: Proceedings of abstracts. – Kharkiv. – 2015. – Volume 3, P. 104–105.

9. Prudyus I. Earth surface diagnostic based on cluster analysis of multispectral monitoring data / I. Prudyus, V. Tkachenko, P. Kondratov, L. Lazko, S. Fabirovskyy, A. Gryvachevskyy // IX National Conference “Technical diagnostics of devices and systems” (DIAG’2015), September 22 – 25, 2015.: Abstracts of papers. – Ustroń, Poland. – 2015. – P. 79.

10. Hryvachevskiy A. Image segmentation based on cluster analysis of multispectral monitoring data / A. Hryvachevskiy, I. Prudyus // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET'2016): Proceedings of the XIII<sup>th</sup> International Conference, February 23 – 26, 2016. – Lviv-Slavske, Ukraine. – 2016. – P. 226–229. (Scopus)

11. Kondratov P. Detection and allotment of the objects based on multispectral monitoring / P. Kondratov, A. Ohanesyan, V. Tkachenko, I. Prudyus, L. Lazko, A. Hryvachevskiy // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET'2016): Proceedings of the XIII<sup>th</sup> International Conference, February 23 – 26, 2016. – Lviv-Slavske, Ukraine. – 2016. – P. 259–262. (Scopus)

12. Hryvachevskiy A. Cluster analysis of multispectral monitoring data / 20th International Youth Forum: Radio electronics and youth in the 21st century, April 19 – 21, 2016.: Proceedings of abstracts. – Kharkiv. – 2016. – Volume 3, P. 34–35.

13. Hryvachevskiy A. Simulation of Moving Object Detection in Video Monitoring Data / A. Hryvachevskiy, L. Lazko, S. Fabirovskyy // International Conference on Information and Telecommunications Technology and Radio

Electronics (UkrMiCo'2016), September 11 – 16, 2016.: Abstracts of papers. – Kyiv. – 2016. – P. 468–471.

14. Hryvachevskiy A. Improvement of Segmentation Quality of Multispectral Images by Increasing Resolution / A. Hryvachevskiy, I. Prudyus, L. Lazko, S. Fabirovskyy // Computation Problems of Electrical Engineering (CPEE-2016): XVII International Workshop, 14<sup>th</sup> – 17<sup>th</sup> September 2016.: Proceedings of Workshop. – Sandomierz, Poland. – 2016. (Scopus)

15. Hryvachevskiy A. An adaptive algorithm of moving objects detection / A. Hryvachevskiy, V. Nichoha, I. Prudyus, S. Fabirovskyy // Systems of Recognition and Electronic Radio (KNTWERE-2016): XI Scientific and Technical Conference, November 21 – 23, 2016. – Ołtarzew, Poland. – 2016. – P. 24.

16. Hryvachevskiy A. Detect moving shadows and eliminate their influence on the accuracy of detecting moving objects during video monitoring / A. Hryvachevskiy, L. Lazko, S. Fabirovskyy, Yu. Demchyna // Physical and technological problems of transmission, processing and storage of information in information and communication systems: V-th International Scientific and Practical Conference, November 3 – 5, 2016.: Abstracts of papers. – Chernivtsi, 2016. – P. 177–178.

17. Hryvachevskiy A. Device for monitoring dynamic objects in the visible wavelength range / A. Hryvachevskiy, S. Fabirovskyy // 21th International Youth Forum: Radio electronics and youth in the 21st century, April 25 – 27, 2017.: Proceedings of abstracts. – Kharkiv. – 2017. – Volume 3, P. 57–57.

18. Prudyus I. Monitoring of the static and dynamic objects by the visible range systems of waves / I. Prudyus, V. Tkachenko, L. Lazko, P. Kondratov, S. Fabirovskyy, A. Hryvachevskiy // Computer-assisted metrology (MWK'2017): XI School-Conference, May 23–26, 2017. – Waplewo, Poland. – 2017. – P. 65.

19. Hryvachevskiy A. The influence of destabilizing factors in the high resolution multispectral imaging systems / A. Hryvachevskiy, S. Fabirovskyy, L. Lazko, V. Tkachenko // 2017 International Conference on Information and

Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2017), 11 – 17 September, 2017. – Odessa, Ukraine. – 2017. (Scopus)

20. Prudyus I. Improving the quality and informativeness of moving objects detecting / I. Prudyus, L. Lazko, A. Hryvachevskyi, S. Fabirovskyy // *Advanced Rail Technologies (ART`2017): 6th International Scientific Conference*, 15 – 16 November, 2017: Conference Proceedings. – Warszawa, Poland. – 2017. – S. 93.

21. Hryvachevskyi A. Image fusion in multispectral monitoring systems with sensors of different physical nature / A. Hryvachevskyi, A. Zubkov, L. Lazko, D. Mymrikov, I. Prudyus, S. Fabirovskyy // *Applied electronics. State and Development Prospects: VIth International Radio-Electronic Forum (MRF–2017)*, October 24 – 26, 2017 p. – Kharkiv. – P. 269–272.

22. Hryvachevskyi A. Methods of multispectral image fusion at the pixel level / Andrii Hryvachevskyi, I. Prudyus, L. Lazko, S. Fabirovskyy // *14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET'2018)*, February 20 – 24, 2018: Conference Proceedings – Lviv-Slavske, Ukraine. – 2018. (Scopus)

23. Hryvachevskyi A. Infrared and visible image fusion. XXXIV conference of telecommunications and energy electronics of students and young researchers (SECON-2018), April 26 – 27, 2018: *Materialy konferencijne.* – Warsaw, Poland.– 2018. – P. 16.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	20
ВСТУП.....	21
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА АЛГОРИТМІВ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ В СУЧАСНИХ СИСТЕМАХ МОНІТОРИНГУ .....	31
1.1. Огляд літературних джерел з питань побудови та використання систем моніторингу об'єктів та сцен .....	32
1.2. Передумови комплексування парціальних спектральних каналів .....	35
1.3. Аналіз парціальних спектральних каналів, які використовуються в мультиспектральних системах моніторингу .....	41
1.4. Методи комплексування зображень .....	46
1.4.1. Класифікація методів комплексування .....	46
1.4.2. Аналіз методів комплексування на піксельному рівні .....	51
Висновки до розділу 1 .....	69
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КОМПЛЕКСУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ВИДИМОГО ТА ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНІВ.....	71
2.1. Прив'язка різноспектральних зображень .....	73
2.2. Оцінювання інформативності зображень.....	79
2.3. Методи оцінювання ефективності комплексування зображень .....	90
2.3.1. Метрика оцінювання ефективності комплексування на основі градієнта.....	91
2.3.2. Метрика оцінювання ефективності комплексування на основі блочного порівняння зображень.....	92
2.4. Моделювання процесу комплексування зображень.....	93
Висновки до розділу 2 .....	97
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МЕТОДУ КОМПЛЕКСУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ВИДИМОГО ТА ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНІВ НА ОСНОВІ ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ.....	99

3.1. Формування низькочастотних вейвлет-коефіцієнтів комплексованого зображення з використанням регресійного аналізу .....	101
3.2. Вплив на інформативність комплексованого зображення базисної функції вейвлет-перетворення та кількості рівнів розкладу .....	106
3.3. Мультимодальне комплексовання зображень в кольорі .....	114
3.4. Структурна схема мультимодального комплексовання зображень запропонованим методом.....	118
Висновки до розділу 3 .....	120
<b>РОЗДІЛ 4. МОНІТОРИНГ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЮ СИСТЕМОЮ З КОМПЛЕКСУВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ ВИДИМОГО ТА ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНІВ.....</b>	<b>122</b>
4.1. Моделювання процесу виявлення рухомих об'єктів мультиспектральною системою моніторингу з комплексованням.....	122
4.1.1. Алгоритм виявлення рухомих об'єктів по даних відеомоніторингу .....	122
4.1.2. Результати виявлення рухомих об'єктів по комплексованому відеосигналу .....	134
4.2. Імовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єктів МСМ з комплексованням зображень .....	137
4.3. Рекомендації по створенню апаратних засобів комплексовання зображень для мультиспектральних систем моніторингу .....	143
Висновки до розділу 4 .....	145
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>147</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>150</b>
<b>ДОДАТОК 1. Набір з десяти пар тестових зображень отриманих у видимому та тепловому діапазонах ЕМХ та попередньо просторово синхронізованих .....</b>	<b>163</b>
<b>ДОДАТОК 2. Акти впровадження результатів дисертаційних досліджень .....</b>	<b>167</b>
<b>ДОДАТОК 3. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....</b>	<b>169</b>

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

- ВСШ – Відношення сигнал/шум
- ДВП – Дискретне вейвлет-перетворення
- ЕМХ – Електромагнітні хвилі
- РЗ – Роздільна здатність
- РФП – Різної фізичної природи
- СКВ – Середнє квадратичне відхилення
- СМ – Система моніторингу
- ОЕСМ – Оптико-електронна система моніторингу
- ММ – Мультиспектральний моніторинг
- МПФ – Модуляційна передавальна функція
- МСМ – Мультиспектральна система моніторингу
- ІДВП – Інверсне дискретне вейвлет-перетворення
- ІЧ – Інфрачервоний
- УФ – Ультрафіолетовий
- ФПК – Функція порогового контрасту
- ФЦО – Фоно-цільова обстановка
- ТТР – Targeting Task Performance (успішність виконання завдання)
- SSIM – Structure SIMilarity (структурна подібність, індекс структурної подібності зображень)
- UIQI – Universal Image Quality Index (універсальний індекс якості зображення)



## ВСТУП

**Актуальність теми.** Системи моніторингу, що представляють інформацію про навколишнє середовище у графічному вигляді, широко застосовуються для різних цілей цивільного і військового характеру, зокрема: дистанційного зондування Землі та космосу; медичної діагностики; різноманітних наукових досліджень; спостереження для охорони об'єктів і територій; спостереження у військових цілях; дистанційної діагностики стану будівель, енергетичних мереж, технологічних процесів на виробництві тощо. Ключова перевага таких систем полягає в способі представлення зібраної інформації про досліджувані об'єкти у вигляді зображень, що є важливим з точки зору споживача інформації – людини, для якої зір це найбільш природний спосіб отримання інформації про об'єкти навколишнього середовища. Бурхливий розвиток нових технологій в галузях радіотехніки, обчислювальної техніки і програмного забезпечення привів до можливості підвищення ефективності таких систем моніторингу.

Вагомий внесок у дослідження і розвиток методів підвищення ефективності формування та обробки зображень для систем моніторингу об'єктів і сцен зробили українські та зарубіжні вчені, такі як: Бондаренко М.А., Дрикін В.І., Колобродов В.Г., Лукін В.В., Микитенко В.І., Прудіус І.Н., Русин Б.П., Зубков А.М., А.С. Bovic, Е.Р. Blasch, R.C. Gonzalez, Zheng Liu, V.S. Petrović, W.K. Pratt, R.A. Schowengerdt, Zhou Wang, R.E. Woods, C.S. Xydeas, Yufeng Zheng.

Основною складовою систем моніторингу є сенсори зображень, а інформація про об'єкти і сцени, як показано в працях згаданих вище вчених [5, 7, 10, 21, 22, 23, 28, 46, 47, 50, 52, 54, 56, 67, 70, 71, 72, 73, 74, 75], визначається результатами обробки сигналів (зображень) з цих сенсорів. Технічні параметри сучасних сенсорів дають змогу використовувати різноманітні способи та засоби для моніторингу об'єктів і сцен з високою точністю. Однак, в умовах сьогодення, актуальним є виявлення малоконтрастних та малопомітних об'єктів, які за своєю природою є такими або використовують засоби

екранування фізичних полів у видимому та/або інфрачервоному діапазонах електромагнітних хвиль. Для виявлення таких об'єктів здійснюють моніторинг одночасно в кількох спектральних діапазонах – мультиспектральний моніторинг. Однак об'єм даних, зібраних в результаті мультиспектрального моніторингу є дуже великим, причому частина інформації дублюється в кожному з парціальних спектральних каналів. В результаті виникає складність в оптимальній обробці зібраних даних та в їх передачі через канал зв'язку в режимі реального часу.

Тому існує потреба у підвищенні ефективності мультиспектральних систем моніторингу, зокрема, у підвищенні інформативності результуючих зображень та у зменшенні кількості надлишкової інформації. Підвищення інформативності можна досягти за рахунок інтелектуального об'єднання парціальних зображень в одне мультиспектральне, така технологія називається комплексуванням зображень (Image Fusion) [1, 23, 31, 32, 41, 50, 51]. Одними з найбільш складних завдань, які необхідно розв'язати при комплексуванні зображень, отриманих в різних спектральних діапазонах, є: 1) просторова синхронізація зображень та 2) сам процес їх злиття, тобто таке перенесення інформації з парціальних зображень в одне мультиспектральне, при якому результуюче зображення є більш інформативним, ніж кожне парціальне окремо.

Таким чином, є підстави стверджувати, що завдання удосконалення та розробки нових методів і засобів підвищення інформативності мультиспектральних систем моніторингу за рахунок комплексування зображень різних спектральних діапазонів для ефективного моніторингу об'єктів та сцен в довільний час доби та за складних погодних умов є актуальними.

**Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.** Результати теоретичних і практичних досліджень, які наведені в дисертаційній роботі, одержані автором у Національному університеті «Львівська політехніка».

Дисертаційні дослідження були проведені на кафедрі «Радіоелектронні пристрої та системи», відповідають науковому напрямку досліджень кафедри «Розроблення апаратного й програмного забезпечення радіотехнічних і телевізійних пристроїв, систем та комплексів із цифровими методами обробки інформації» та пов'язані з виконанням таких держбюджетних науково-дослідних робіт:

- «Розробка засад застосування та обробки сигналів перспективних сенсорів для космічних апаратів і для наземних камер» (ДБ-ТТХ), № держреєстрації 0113U001355, 2013-2014 рр.;
- «Розроблення засобів і методів формування та обробки багатоспектральних зображень для систем спеціального призначення» (ДБ-ЕМХ), № держреєстрації 0115U000435, 2015-2016 рр.;
- «Розроблення портативних засобів вимірювання магнітних та електричних полів кораблів і засад оптико-радіолокаційного моніторингу надводної обстановки в місцях базування кораблів ВМС» (ДБ-ВМС), № держреєстрації 0117U004454, 2017-2018 рр.

Участь автора полягала в дослідженні методів та алгоритмів підвищення ефективності оптико-електронних систем мультиспектрального моніторингу шляхом застосування комплексування зображень видимого та інфрачервоного каналів, кластерного аналізу даних мультиспектрального моніторингу, виявлення рухомих об'єктів за результатами мультиспектрального моніторингу; в розробленні методу мультимодального комплексування зображень та методу виявлення рухомих об'єктів; в розробленні рекомендацій щодо апаратної реалізації мультиспектральної системи моніторингу з комплексуванням зображень.

**Мета і завдання досліджень.** Метою дисертаційних досліджень є підвищення інформативності оптико-електронних мультиспектральних систем моніторингу об'єктів та сцен, що мають у своєму складі сенсори видимого та інфрачервоного діапазонів та зменшення кількості надлишкової інформації, що

надходить до оператора системи на основі розробки моделей, методів та алгоритмів формування мультиспектральних комплексованих зображень.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язано наступні завдання:

1. Проведено аналіз парціальних спектральних каналів, які використовуються в даний час в системах моніторингу, визначено їх переваги та недоліки. Обґрунтовано, що комплексування зображень, отриманих каналами видимого та інфрачервоного діапазонів підвищує інформативність системи в складних умовах спостереження.

2. Виконано класифікацію існуючих методів комплексування зображень та визначено найбільш ефективний метод з точки зору підвищення інформативності мультиспектральних зображень.

3. Досліджено існуючі методи просторової прив'язки різноспектральних зображень з метою вибору найбільш ефективного підходу для точної просторової синхронізації різноспектральних зображень.

4. Удосконалено метод оцінювання інформативності зображень, що ґрунтується на їх мультикритеріальному аналізі шляхом заміни ентропії, як одного з критеріїв метрики, на градієнт зображення.

5. Розроблено метод та на його основі алгоритм підвищення інформативності мультиспектральних зображень шляхом комплексування зображень видимого та інфрачервоного діапазонів на основі дискретного вейвлет-перетворення, який, на відміну від відомих, базується на регресійному аналізі різноспектральних зображень.

6. Проведено комп'ютерне моделювання та дослідження функціонування мультиспектральної системи моніторингу з комплексуванням зображень при спостереженні за рухомими об'єктами. Визначено імовірності виявлення об'єктів мультиспектральною системою моніторингу поканально та при застосуванні розробленого методу комплексування зображень.

7. Розроблено структурну схему та елементи архітектури блоку цифрової обробки і комплексування різноспектральних зображень та

рекомендації щодо апаратної реалізації мультиспектральної системи моніторингу з комплексуванням різноспектральних зображень.

**Об'єктом дослідження** є процес формування та обробки зображень в мультиспектральній оптико-електронній системі моніторингу об'єктів та сцен.

**Предметом дослідження** є моделі, методи та алгоритми підвищення інформативності оптико-електронних систем моніторингу шляхом комплексування зображень, отриманих у видимому та інфрачервоному діапазонах спектру електромагнітного випромінювання.

**Методи дослідження** базуються на основних положеннях положення теорії інформації, математичної статистики, комп'ютерного бачення, оптики, методи цифрової обробки сигналів та зображень, числового аналізу та комп'ютерного моделювання.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Вперше розроблено метод комплексування зображень видимого та інфрачервоного діапазонів на основі дискретного вейвлет-перетворення, в якому, на відміну від відомих, у процесі комплексування зображень запропоновано формувати низькочастотні коефіцієнти результуючого вейвлет-спектру на основі регресійного аналізу зв'язків між відповідними низькочастотними коефіцієнтами вейвлет-спектрів вхідних зображень.

2. Удосконалено багатокритеріальну метрику оцінювання інформативності зображень шляхом заміни ентропії зображення, як одного з критеріїв метрики, на градієнт зображення; порогового обмеження кількості значущих градацій яскравості; оцінювання коефіцієнта контрасту зображення на основі середніх значень контрастів в його локальних областях; при цьому значення інформативності, розраховані з урахуванням вказаних пропозицій є найбільш близькими до експертних оцінок (з коефіцієнтом кореляції  $> 0.8$ , що збільшився приблизно на 25%, порівняно з відомими методами).

3. Набула подальшого розвитку модель процесу комплексування зображень, яка, на відміну від відомих, дає змогу одержати кольорове комплексоване зображення, яке є більш адаптованим для психофізичного

сприйняття людиною-оператором у порівнянні з комплексуванням, при якому результуюче зображення є монохромним.

4. Набула подальшого розвитку модель процесу виявлення рухомих об'єктів під час відеомоніторингу, яка, на відміну від відомих, для виявлення руху передбачає одночасне використання методу віднімання фону та методу міжкадрової різниці, а також адаптується до дестабілізуючих факторів під час відеомоніторингу та усуває негативний вплив рухомих тіней, шляхом їх детектування та компенсації.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Удосконалена багатокритеріальна методика та розроблений на її основі алгоритм оцінювання інформативності зображень, які дають змогу автоматизовано кількісно оцінювати інформативність зображень максимально наближено (з коефіцієнтом кореляції 0.801), порівняно з широко вживаним методом ентропії (коефіцієнт кореляції 0.552), до значень інформативності, які отримуються групою експертів, що є важливим при створенні методів та побудові систем формування й обробки зображень, де кінцевим споживачем інформації є як людина-оператор, так і інша система.

2. Запропонований метод та розроблений на його основі алгоритм мультимодального комплексування зображень у площині коефіцієнтів вейвлет-розкладу, який, на відміну від відомих базується на регресійному аналізі, дає змогу підвищити інформативність результуючого мультиспектрального зображення в середньому на 12.2%, порівняно з найбільш інформативним каналом мультиспектральної системи моніторингу та на 4.7%, порівняно з іншими методами комплексування, а також дає змогу зменшити обсяг даних без втрати корисної інформації в середньому на 26.72%, порівняно з сумарним обсягом даних, що отримуються каналами видимого та ІЧ діапазонів.

3. Одержані результати оцінювання впливу на інформативність комплексованого зображення кількості рівнів розкладу та виду базисної функції при виконанні вейвлет-перетворення дають змогу вибирати оптимальні параметри налаштування алгоритму мультимодального комплексування

зображень видимого та інфрачервоного діапазонів для отримання максимально можливого за інформативністю комплексованого зображення.

4. Удосконалений метод виявлення рухомих об'єктів дає змогу, за рахунок підвищення інформативності шляхом комплексування зображень видимого та інфрачервоного діапазонів, збільшити імовірність виявлення рухомих об'єктів мультиспектральною системою моніторингу на 11%, порівняно з аналогічною системою без використання комплексування.

Розроблені в дисертації теоретичні положення та практичні пропозиції є важливим внеском у систему знань про процеси формування та обробки сигналів та зображень в мультиспектральних системах моніторингу об'єктів і сцен. Розроблені алгоритми та прикладні програми формування і обробки зображень можуть бути покладені в методологію створення ефективних мультиспектральних систем з комплексуванням даних парціальних каналів для підвищення імовірності виявлення об'єктів у складних умовах спостереження. Результати проведених досліджень використовувалися в навчальному процесі при підготовці фахівців зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» у Національному університеті «Львівська політехніка», під час виконання держбюджетних науково-дослідних робіт в Національному університеті «Львівська політехніка» на тему: «Розробка засад застосування та обробки сигналів перспективних сенсорів для космічних апаратів і для наземних камер» (ДБ-ТТХ), № держреєстрації 0113U001355, 2013-2014 рр.; «Розроблення засобів і методів формування та обробки багатоспектральних зображень для систем спеціального призначення» (ДБ-ЕМХ), № держреєстрації 0115U000435, 2015-2016 рр.; «Розроблення портативних засобів вимірювання магнітних та електричних полів кораблів і засад оптико-радіолокаційного моніторингу надводної обстановки в місцях базування кораблів ВМС» (ДБ-ВМС), № держреєстрації 0117U004454, 2017-2018 рр.

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати, що становлять основу дисертаційної роботи, були сформульовані та одержані автором самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належать:

- дослідження впливів дестабілізуючих факторів на якість та просторову роздільну здатність сенсорів різних діапазонів [24, 25];
- моделювання субпіксельної технології підвищення просторової роздільної здатності сенсорів видимого діапазону [17, 18];
- аналіз технологій, моделей та методів комплексування сигналів та зображень в мультиспектральних системах моніторингу, їх комп'ютерне моделювання [35, 38];
- дослідження методів просторової синхронізації різноспектральних зображень [59];
- розроблення методу та на його основі алгоритму комплексування зображень видимого та інфрачервоного діапазонів та удосконалення методу оцінювання інформативності зображень [53];
- кластеризація даних мультиспектрального моніторингу, виділення об'єктів на мультиспектральних зображеннях [14, 81, 82, 84];
- аналіз існуючих методів виявлення рухомих об'єктів та тіней, розроблення нового методу виявлення, його моделювання та дослідження [85-88, 95, 97, 101, 102].

Основні результати досліджень, представлені у дисертаційній роботі, були апробовані на наступних наукових заходах:

- XV Міжнародна конференція «Computational Problems of Electrical Engineering» (CPEE'2014), 9-12 вересня, 2014 р., Жиліна, Словацька Республіка.
- 19-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті», 20-22 квітня, 2015 р., Харків, Україна.
- IX Міжнародна конференція “Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów” (Diag'2015), 22-25 вересня 2015 р. Устронь, Польща.
- XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії» (TCSET'2016), 23-26 лютого, 2016 р., Славське, Україна.



- XVII Міжнародна конференція «Computational Problems of Electrical Engineering» (CPPE'2016), 14-17 вересня, 2016 р., Сандомеж, Польща.
- 20-й ювілейний Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті», 19-21 квітня, 2016 р., Харків, Україна.
- V-а Міжнародна науково-практична конференція «Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах», 3-5 листопада, 2016 р., Чернівці, Україна.
- Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (UkrMiCo'2016/UkrMiCo'2016), 11-16 вересня, 2016 р., Одеса, Україна.
- XI Міжнародна науково-технічна конференція «Reconnaissance and Electronic Warfare Systems» 21-23 листопада 2016 р., Ольтажев, Польща.
- 21-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті», 25-27 квітня, 2017 р., Харків, Україна.
- XI Міжнародна науково-технічна конференція «Metrologia wspomagana komputerowo» 23-26 травня, 2017 р., Ваплево, Польща.
- II Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (UkrMiCo'2017), 11-15 вересня, 2017 р., Одеса, Україна.
- VI Міжнародний радіоелектронний форум «Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку» (МРФ–2017), 10-13 жовтня, 2017 р., Харків, Україна.
- VI Міжнародна конференція «Najnowsze technologie w transporcie szynowym», 15-16 листопада 2017 р., Варшава, Польща.
- XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії» (TCSET–2018), 20-24 лютого, 2018 р., Славське, Україна.

- XXXIV «Konferencja elektroniki, telekomunikacji i energetyki studentów i młodych pracowników nauki» (SECON'2018), 26-27 квітня, 2018 р., Варшава, Польща.

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботи опубліковано 23 наукових праці, з них 5 статей у наукових фахових виданнях України [24, 33, 53, 59, 87] та 1 – у науковому періодичному виданні іншої держави [86], зокрема 5 статей опубліковано у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз даних Index Copernicus [33, 59, 86, 87] та Web of Science [53]. 17 є публікаціями у матеріалах міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференцій, симпозіумів та форумів [14, 17, 18, 25, 35, 38, 78, 81-85, 88, 95, 97, 101, 102], з них 5 опубліковані у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних Scopus [14, 25, 38, 82, 84].

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 113 найменувань та 3 додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 170 сторінок, із них 116 сторінок – основний текст, в тексті наведено 62 рисунків та 16 таблиць.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА АЛГОРИТМІВ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ В СУЧАСНИХ СИСТЕМАХ МОНІТОРИНГУ

В міру стрімкого розвитку техніки і зростання потреб в оперативному спостереженні за різними об'єктами і явищами навколишнього середовища<sup>1</sup> все більш широке застосування знаходять дистанційні методи моніторингу [1]. Їх найважливішою особливістю є можливість отримання інформації про параметри досліджуваного об'єкта на відстані шляхом вимірювання величин, пов'язаних з характеристиками об'єкта, таких, як, наприклад, інтенсивність електромагнітної енергії (власної чи перевідбитої), що ним випромінюється. Головна перевага дистанційних методів моніторингу полягає у відсутності необхідності безпосереднього контакту вимірювальних засобів з досліджуваним об'єктом чи середовищем, що дає змогу істотно спростити і здешевити процес спостереження [2].

Оскільки приблизно 95% інформації про навколишнє середовище людина отримує через зорову систему шляхом аналізу зображення, яке формується на сітківці очей [3], то очевидним напрямком розширення можливостей отримання візуальної інформації вже кілька десятиліть є розробка та вдосконалення іконічних<sup>2</sup> систем моніторингу (СМ): оптичних, оптико-електронних та радіотехнічних; які представляють інформацію про навколишнє середовище у вигляді його зображень.

Примітка:

1. Під навколишнім середовищем розуміється повітряний, наземний, водний, а іноді і підповерхневий простір або будь-яка їх сукупність, а під об'єктами – будь-які сутності матеріального світу, в тому числі, поодинокі малорозмірні об'єкти, групові об'єкти, розподілені (площинні і об'ємні) об'єкти.
2. Іконічний – характеристика образа, ілюстроване представлення чогонебудь [4, с. 491].

## 1.1. Огляд літературних джерел з питань побудови та використання систем моніторингу об'єктів та сцен

Попри значні успіхи в розробці та застосуванні СМ [2, 3, 5-10] до теперішнього часу їх можливості розкриті не повністю. Оскільки, незважаючи на те, що сучасні СМ вже давно перевершили людській зір по роздільній здатності, котра дорівнює близько  $1'$  ( $0,02^\circ$ ), що відповідає  $0,3$  м на відстані в  $1$  км [11], інтерпретацію отриманої графічної інформації в більшості випадків досі виконує людина-оператор [12].

Примітка. Оператор – Фахівець, що керує роботою складного механізму або відповідає за виконання певного виробничого процесу. // Людина, яка працює на технічному пристрої, комп'ютері і виконує регламентований інструкціями набір дій, операцій [4, с. 845].

Під роздільною здатністю розуміється гранична роздільна здатність системи формування зображень, визначена по критерію Релея (рис. 1.1), а саме, це мінімальна кутова відстань  $\theta$  між двома точками, при якій їх зображення можна відрізнити від зображення однієї точки [11, 13]:

$$\theta = 1,22 \frac{\lambda}{D}, \quad (1.1)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі,  $D$  – діаметр світлового пучка (апертури оптичної системи).

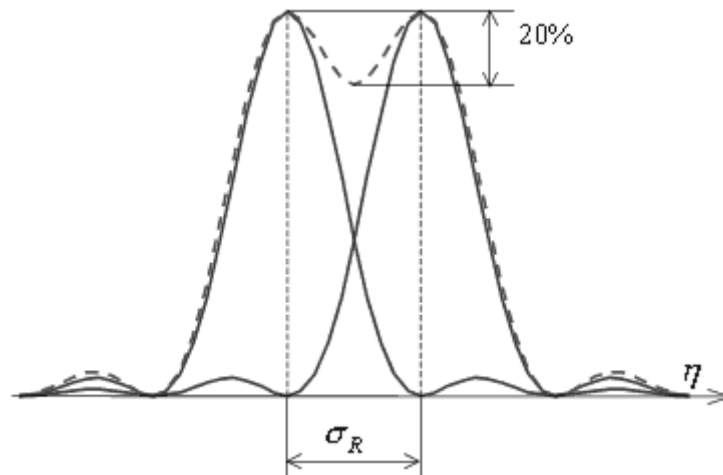


Рис. 1.1. Роздільна здатність за критерієм Релея:  $\sigma_R$  – відстань між точками на зображенні, яка прямо пропорційна  $2\theta$ ;  $\eta$  – просторова частота

Критерій Релея свідчить, що при провалі в розподілі інтенсивності в зображенні двох близьких точок в 20%, точки сприйматимуться як роздільні. Для цього необхідно, щоб центральний максимум в зображенні однієї точки припадав на перший мінімум в зображенні іншої.

Згідно робіт [7, 10, 15, 16, 20, 22], основні тенденції розвитку та удосконалення оптико-електронних СМ (ОЕСМ) довгий час ґрунтувалися на основі удосконалення окремих блоків, в основному сенсорів, зокрема:

- підвищення роздільної здатності: геометричної (кутової), спектральної, часової та енергетичної (температурної);
- розширення області спектральної чутливості ОЕСМ як в сторону ультрафіолетового (УФ), так і в сторону довгохвильового інфрачервоного (ІЧ) випромінювання;
- розширення кола задач, що вирішуються однією і тією ж ОЕСМ, наприклад, задач спостереження, виявлення, розпізнавання та ідентифікації;
- вдосконалення методів обробки сигналів в самому сенсорі та електронному тракті системи;
- створення адаптивних ОЕСМ з перестроюваними параметрами і характеристиками як усієї системи, так і окремих її складових (оптичної системи, сенсора, електронного тракту, системи відображення інформації);
- зменшення габаритів, маси, енергоспоживання та зниження вартості.

В останні роки для підвищення просторової роздільної здатності сенсорів значного поширення набула технологія субпіксельної зйомки [17-19] і відповідної обробки отриманих таким чином зображень. Проте, незважаючи на значні успіхи в розробці окремих сенсорів для СМ, їх використання має багато обмежень, оскільки спектральні характеристики випромінювання об'єктів можуть помітно відрізнятися [5, 23] при реєстрації в різних діапазонах електромагнітних хвиль (ЕМХ) в залежності від властивостей поверхні об'єктів

та параметрів середовища поширення ЕМХ [24, 25], а створення єдиного сенсора, який перекривав би весь оптичний діапазон від ультрафіолетового (УФ) до далекого інфрачервоного (ІЧ) і володів би високими значеннями просторової і спектральної роздільної здатності, є досить проблематичним [26]. Тому щоб збільшити ймовірність надійного розділення об'єктів, активно розвивається принцип одночасної зйомки спостережуваної сцени в декількох спектральних діапазонах сенсорами різної фізичної природи (РФП), який має назву мультиспектральний моніторинг (ММ) [6]. Проте при ММ стрімко збільшується кількість інформації, яку збирають і якою обмінюються різноманітні СМ, причому особливістю такого моніторингу є обов'язкова наявність надлишкової дублюючої інформації від декількох паралельно працюючих сенсорів [27, 28]. В силу природних обмежень оператор не може швидко обробляти великі обсяги даних і тому залишається "вузьким місцем" в процесі збору, обробки та управління візуальною інформацією, що надходить від систем мультиспектрального моніторингу [12]. Тому в останні роки при вдосконаленні СМ на перший план виходять підходи для більш повного використання потенційно доступної інформації з різних каналів при ММ та раціонального її представлення для оператора системи і передачі по каналах зв'язку. Одним з таких підходів, що представляється в літературі [1, 7, 23, 26-32] як найбільш перспективний, є інформаційне комплексування (в англійській літературі – *fusion*) парціальних спектральних каналів в мультиспектральних системах моніторингу (МСМ) [33-35]. Кількість публікацій по даній тематиці щороку росте (рис. 1.2), що також свідчить про актуальність та перспективність такого підходу.

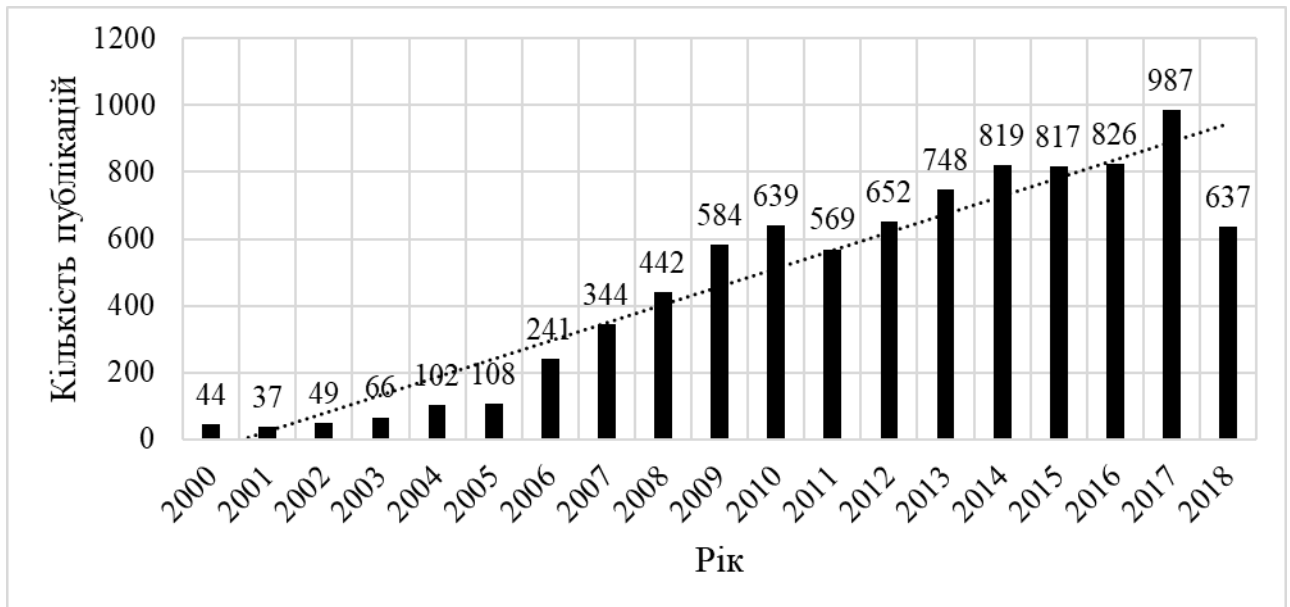


Рис. 1.2. Кількість публікацій в міжнародній науково-метричній базі [IEEE](#) в назві яких присутнє словосполучення «комплексування зображень (англ. *image fusion*)» за період з 2000 по 2018 роки

Примітка. Парціальний – який складає частину чого-небудь; частковий, окремий [4, с. 891].

## 1.2. Передумови комплексування парціальних спектральних каналів

Оскільки сучасні СМ дозволяють виконувати одночасну зйомку спостережуваної сцени в декількох спектральних діапазонах причому з різною роздільною здатністю [6, 34], отримані дані формально можуть бути описані багатозональною матрицею  $D = \{B_1, B_2, \dots, B_k\}$ , елементами якої є набір

значень енергетичної яскравості, що зафіксована в  $k$  спектральних діапазонах

$$B(n, m) = \{B_i(n, m); i = \overline{1, k}\};$$

$$B_i(n, m) = \int_0^{\infty} E(n, m, \lambda) S_i(\lambda) d\lambda, \quad i = \overline{1, k}, \quad (1.2)$$

де  $\lambda$  – довжина ЕМХ;  $S_i(\lambda)$  – спектральна чутливість сенсора в  $i$ -му діапазоні;  $E(n, m, \lambda)$  – спектральна яскравість спостережуваної сцени;  $n, m$  – номери рядків і стовпців зображення, що відповідають координатам  $x, y, z$  деякої точки спостережуваної сцени.

Від самого початку мультиспектральний метод зйомки розроблявся з метою одночасного отримання декількох зображень в різних спектральних діапазонах для вирішення задач дешифрування об'єктів спостережуваної сцени. Однак розбиття вхідної електромагнітної енергії на  $k$  спектральних діапазонів призводить до зменшення енергії в кожному з діапазонів, що погіршує (знижує) відношення сигнал/шум (ВСШ) і призводить до втрат роздільної здатності по відношенню до панхроматичної зйомки. Тобто, виникає протиріччя, з одного боку мультиспектральний спосіб моніторингу дає змогу отримати додаткову інформацію про спектральний склад випромінювання об'єктів спостережуваної сцени, а з іншого боку, зменшує роздільну здатність зображень.

Більшість наукових праць, що присвячені формуванню та обробці мультиспектральних даних, пов'язані з формалізацією і автоматизацією процесів виділення об'єктів спостережуваної сцени [3, 6, 12, 14, 20, 21]. В той же час почали з'являтися роботи (переважно з обмеженим до них доступом), в яких розглядається комплексування мультиспектральних зображень з метою отримання на їх основі нового більш інформативного зображення, на якому на відміну від панхроматичної зйомки більш чітко відображалися б об'єкти спостережуваної сцени. Ця задача в певній мірі є зворотною по відношенню до мультиспектрального моніторингу, і для її вирішення є вагомими передумови.

Щоб переконатися в цьому, розглянемо біспектральну зйомку для наступного ідеалізованого випадку. Нехай СМ має два сенсори, що працюють в різних спектральних каналах, в яких функції спектральної чутливості  $S_1(\lambda)$  і  $S_2(\lambda)$  зміщені один відносно іншого по осі  $\lambda$  і симетричні відносно деякого значення  $\lambda_0$ . Будемо вважати, що система моніторингу еквівалентна панхроматичному каналу з спектральною чутливістю  $S(\lambda) = 0.5(S_1(\lambda) + S_2(\lambda))$  (рис. 1.3).



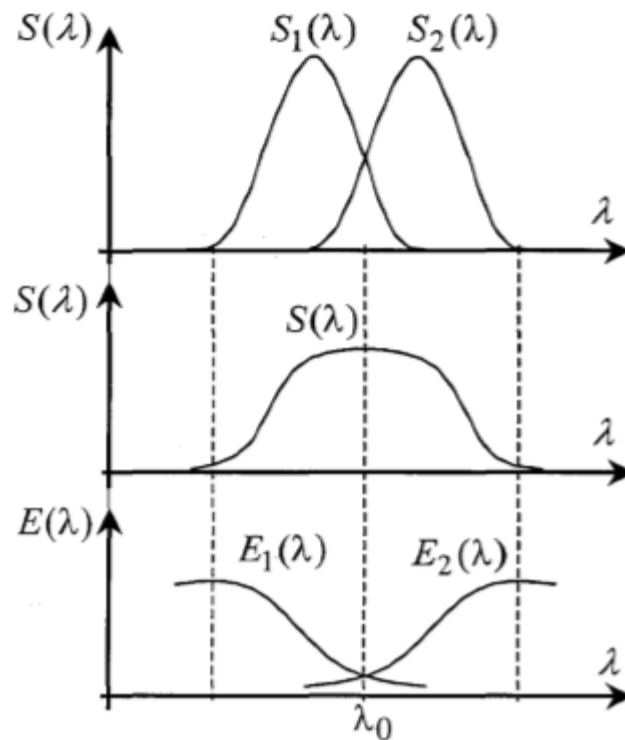


Рис. 1.3. Графіки функцій спектральних чутливостей каналів спостереження  $S_1(\lambda)$ ,  $S_2(\lambda)$ ,  $S(\lambda)$  та функцій спектральних яскравостей двох точок спостережуваної сцени  $E_1(\lambda)$  і  $E_2(\lambda)$

Розглянемо дві точки земної поверхні з функціями спектральної яскравості  $E_1(\lambda)$  і  $E_2(\lambda)$ , які також симетричні відносно точки  $\lambda_0$ . В результаті біспектральної зйомки системою моніторингу будуть сформовані значення яскравостей для першої точки  $(B_{1,1}, B_{2,1})$ , та для другої точки –  $(B_{1,2}, B_{2,2})$ :

$$\begin{aligned}
 B_{1,1} &= \int_0^{\infty} E_1(\lambda) S_1(\lambda) d\lambda, & B_{1,2} &= \int_0^{\infty} E_2(\lambda) S_1(\lambda) d\lambda, \\
 B_{2,1} &= \int_0^{\infty} E_1(\lambda) S_2(\lambda) d\lambda, & B_{2,2} &= \int_0^{\infty} E_2(\lambda) S_2(\lambda) d\lambda,
 \end{aligned}
 \tag{1.3}$$

де для  $B_{i,j}$  перший індекс ( $i = \overline{1,2}$ ), характеризує номер спектрального каналу, а другий ( $j = \overline{1,2}$ ) – номер точки.

Відобразимо ці точки в двомірному спектральному просторі, тобто в системі координат  $(B_1, B_2)$  (рис. 1.4).

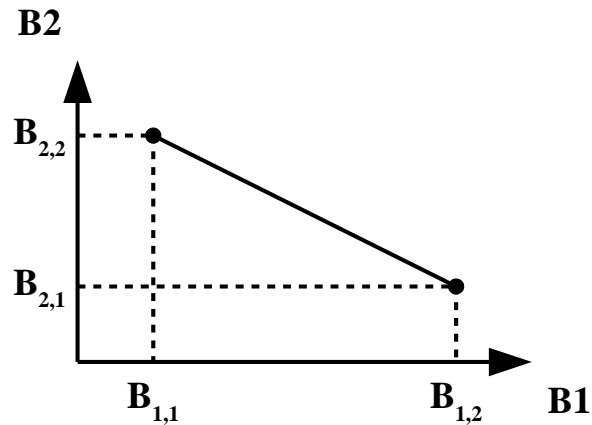


Рис. 1.4. Спектральний простір

Введемо в розгляд міри розділення цих точок при панхроматичній і мультиспектральній зйомці.

Примітка. Панхроматичний знімок – моноспектральне зображення, отримане в усьому видимому діапазоні спектра. Панхроматичні знімки є чорно-білими [4].

При панхроматичній зйомці в якості міри розділення точок природно прийняти величину:

$$R_P = \frac{|(B_{1,2} + B_{2,2}) - (B_{1,1} + B_{2,1})|}{2} = \frac{|(B_{1,2} - B_{1,1}) + (B_{2,2} - B_{2,1})|}{2} = \frac{|x_1 + x_2|}{2}, \quad (1.4)$$

де  $x_1, x_2$  – проекції вектора, який з'єднує точки, що розглядаються на осі  $B_1, B_2$ , відповідно;  $R_P \in [0, B_{max}]$ ,  $B_{max}$  – максимальне значення яскравості.

В якості міри розділення точок при мультиспектральній зйомці природно прийняти відстань між ними  $R_M$  в мультиспектральному просторі, пронормувавши її так, щоб діапазон зміни  $R_M$  збігався з діапазоном зміни  $R_P$ :

$$R_M = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{x_1^2 + x_2^2}, \quad R_M \in [0, B_{max}]. \quad (1.5)$$

Розглянемо відношення цих мір

$$\gamma = \frac{R_P}{R_M} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{|x_1 + x_2|}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{|\alpha + 1|}{\sqrt{\alpha^2 + 1}}, \quad \text{де } \alpha = \frac{x_1}{x_2}. \quad (1.6)$$

Залежність  $\gamma$  від  $\alpha$  представлена на рис. 1.5.

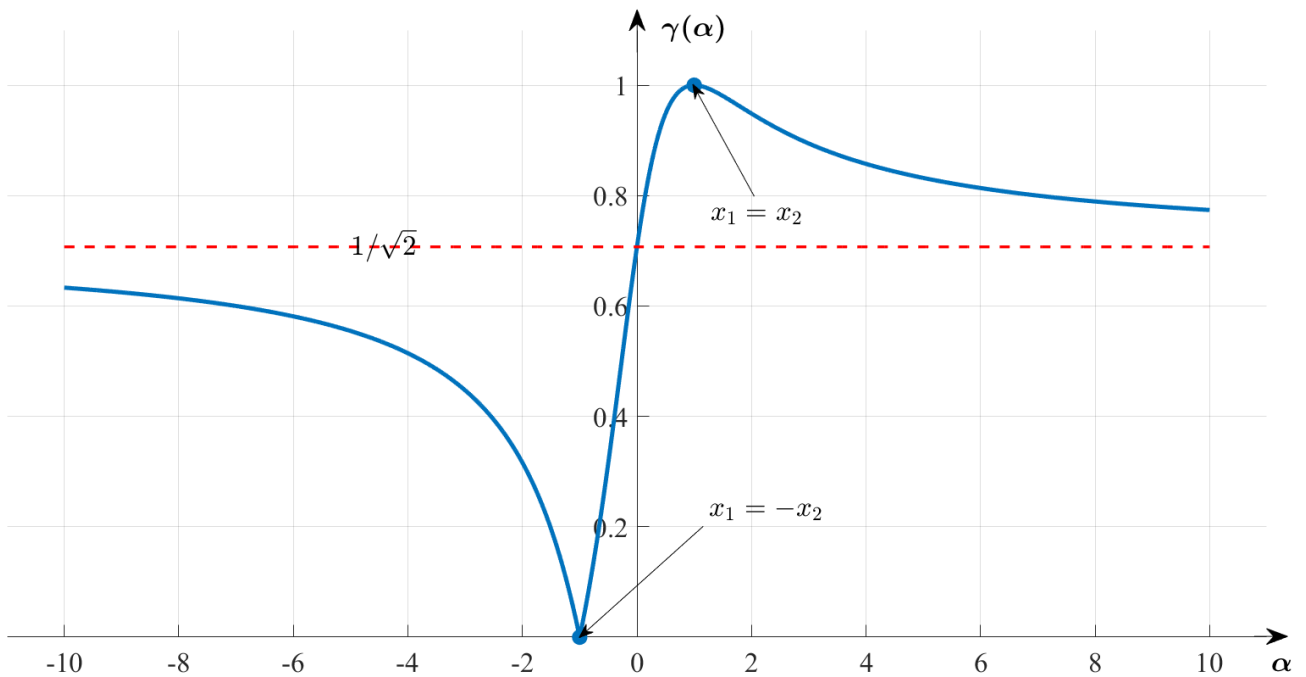


Рис. 1.5. Графік функції  $\gamma(\alpha)$

З кривої на рис. 1.5 випливає, що міра розділення мультиспектральних даних  $R_M$  завжди перевершує або, принаймні, дорівнює  $R_P$ . Тобто об'єкти на мультиспектральних знімках більш помітні, ніж на панхроматичному зображенні. Лише у випадку, коли приріст мультиспектральних компонент при переході від однієї точки до іншої однаковій ( $x_1 = x_2$ ), розділення точок на панхроматичному і мультиспектральних знімках збігаються.

Якщо прирости мультиспектральних компонент при переході від однієї точки до іншої рівні по модулю і протилежні за знаком ( $x_1 = -x_2$ ), то мультиспектральна зйомка має максимальну перевагу. В даному випадку на 1-му спектральному зображенні перша точка світліша другої, а на 2-му зображенні на стільки ж темніша, або навпаки, і ці точки завжди мають не нульову міру розділення. На відміну від цього, на панхроматичному зображенні ці точки будуть мати однакові яскравості, тобто матимуть нульову роздільність  $R_P = 0$ .

Отже, зазначені факти створюють передумови для отримання за даними мультиспектральної зйомки деякого нового більш інформативного<sup>1</sup> зображення<sup>2</sup>,

на якому по відношенню до панхроматичного знімку більш чітко відображаються об'єкти спостережуваної сцени.

Примітка:

1. Інформативність – кількість відомостей, елементів змісту; насиченість змістом, інформацією; поінформованість [4, с. 503].

2. Під інформативністю зображень слід розуміти загальну кількість інформації, що отримується споживачем по просторових, спектрально-енергетичних, часових і інших ознаках при їх сприйнятті та аналізі [36]. Більш точна оцінка інформативності зображення являється комплексною і залежить від кількох показників, включаючи локальні контрасти і детальність.

Зроблені висновки легко поширити для загального випадку мультиспектральної зйомки в  $k$  спектральних діапазонах. Тут за аналогією з (1.4-1.6) отримаємо:

$$R_P = \frac{1}{k} \left| \sum_{i=1}^k x_i \right|, \quad (1.7)$$

$$R_M = \frac{1}{\sqrt{k}} \sqrt{\sum_{i=1}^k x_i^2}, \quad (1.8)$$

$$\gamma = \frac{R_P}{R_M} = \frac{1}{\sqrt{k}} \left| \sum_{i=1}^k x_i \right| / \sqrt{\sum_{i=1}^k x_i^2}. \quad (1.9)$$

В даному випадку лише при  $x_1 = x_2 = \dots = x_k$ :  $\gamma = 1$ , і мультиспектральна зйомка не дає додаткової інформації для підвищення інформативності зображення. По мірі взаємної компенсації приростів спектральних компонент  $R_P \rightarrow 0$  створюються найкращі умови для комплексування мультиспектральних даних.

### **1.3. Аналіз парціальних спектральних каналів, які використовуються в мультиспектральних системах моніторингу**

Інформативність МСМ залежить від кількості та параметрів робочих спектральних діапазонів, в рамках яких збираються дані про спостережувану сцену [7]. Тому дуже важливим є визначення кількості і типу інформаційних каналів, які необхідні для надійного розпізнавання об'єктів на зображеннях спостережуваної сцени оператором МСМ. З теорії розпізнавання образів відомо, що при зростанні числа спектральних каналів, точність розпізнавання зростає лише до певного моменту, а потім, при подальшому збільшенні цього числа, вона падає [8]. Це пояснюється тим, що при збільшенні числа інформаційних каналів необхідна оцінка множини статистик все більш високої розмірності по обмеженому фіксованому числу вибірок [7]. При цьому помітно ускладнюється обробка даних в реальній системі, наприклад, значно збільшується машинний час, необхідний для проведення складних обчислень. Таким чином, існує оптимальна кількість спектральних ознак. Наприклад, при дистанційному зондуванні природних ресурсів було встановлено, що максимум вірогідності розпізнавання по спектральних ознаках досягається при трьох релевантних ознаках. Ймовірність розпізнавання при використанні більшого числа ознак істотно менша [8].

В табл. 1.1 наведені приклади інформаційних каналів, що формують двовимірне зображення спостережуваної сцени та використовуються для вирішення типових задач дистанційного моніторингу [2, 5-9].

Таблиця 1.1.

**Типи сенсорів зображення для вирішення типових задач дистанційного моніторингу**

Задача дистанційного моніторингу	Типи сенсорів / інформаційних каналів
Дистанційне зондування Землі	<ul style="list-style-type: none"> <li>- панхроматичні та мультиспектральні сенсори видимого діапазону;</li> <li>- сенсори близького, середнього та довгохвильового піддіапазонів ІЧ діапазону;</li> <li>- сенсори ультрафіолетового діапазону;</li> <li>- активні та пасивні мікрохвильові радари;</li> <li>- радіолокатори з синтезованою апертурою;</li> <li>- лазерні скануючі далекомірні системи;</li> <li>- відеоспектрометри;</li> </ul>
Картографування	<ul style="list-style-type: none"> <li>- панхроматичні та мультиспектральні сенсори видимого діапазону;</li> <li>- радіолокатори з синтезованою апертурою;</li> </ul>
Стереофотограмметрія	<ul style="list-style-type: none"> <li>- панхроматичні та мультиспектральні сенсори видимого діапазону;</li> <li>- лазерні скануючі далекомірні системи;</li> </ul>
Огляд транспортних засобів	<ul style="list-style-type: none"> <li>- панхроматичні та мультиспектральні сенсори видимого діапазону;</li> <li>- сенсори близького, середнього та довгохвильового піддіапазонів ІЧ діапазону;</li> <li>- лазерні скануючі далекомірні системи;</li> <li>- системи рентгенівського випромінювання;</li> </ul>

## Продовження таблиці 1.1.

Задача дистанційного моніторингу	Типи сенсорів / інформаційних каналів
Оглядові та прицільно-оглядові системи військового призначення	<ul style="list-style-type: none"> <li>- панхроматичні та мультиспектральні сенсори видимого діапазону;</li> <li>- сенсори близького, середнього та довгохвильового піддіапазонів ІЧ діапазону;</li> <li>- електронно-оптичні перетворювачі (ЕОП);</li> <li>- активні та пасивні мікрохвильові радари;</li> <li>- радіолокатори з синтезованою апертурою;</li> <li>- лазерні скануючі далекомірні системи;</li> </ul>
Медична діагностика	<ul style="list-style-type: none"> <li>- системи рентгенівського випромінювання;</li> <li>- сенсори видимого діапазону;</li> <li>- довгохвильові тепловізійні системи;</li> <li>- ультразвукові системи;</li> </ul>
Спостереження навколишнього простору самохідними роботизованими пристроями	<ul style="list-style-type: none"> <li>- лазерні скануючі далекомірні системи (лідари);</li> <li>- сенсори видимого діапазону.</li> </ul>

Як видно з табл. 1.1 найбільш часто вживаними сенсорами (інформаційними каналами) в СМ є сенсори видимого та інфрачервоного діапазонів, причому з інфрачервоного діапазону найбільш доцільно використовувати довгохвильовий піддіапазон з довжинами хвиль 8-14 мкм (часто його називають тепловим), оскільки в ньому, згідно закону зміщення Віна, знаходиться пік власного випромінювання тіл з температурою від 207°K (-66°С) до 362°K (+89°С), а також він співпадає з відповідним вікном прозорості атмосфери [5].

Розглянемо ці канали детальніше (див. табл. 1.2) та порівняємо їх між собою.

Таблиця 1.2.

**Порівняння характеристик і параметрів каналів спостереження**

Канали спостереження Характеристика	Видимий (0,4-0,7 мкм)	Інфрачервоний (тепловий) (8-14 мкм)
Джерело інформації	енергія випромінювана джерелом (зазвичай Сонцем), яка відбита від спостережуваного об'єкта	енергія ЕМХ, яка формується безпосередньо формоутворюючою поверхнею спостережуваного об'єкта, що має фізичну температуру більшу за 0°К
Роздільна здатність	надвисока кутова роздільна здатність	висока кутова роздільна здатність
Обмеження використання каналів спостереження	залежить від рівня прозорості атмосфери і наявності освітлення	працює у довільний час доби

З наведених в табл. 1.2 основних типових характеристик каналів спостереження видимого та теплового діапазонів можна виділити їх основні переваги та недоліки, які подані у табл. 1.3.



Таблиця 1.3

**Переваги і недоліки видимого та інфрачервоного каналів спостереження**

Канал спостереження	Переваги	Недоліки
Видимий (0,4-0,7 мкм)	- надвисока кутова роздільна здатність; - низькі масо-габаритні параметри; - зображення відповідає психофізіологічним властивостям оператора.	- немає можливостей отримувати зображення об'єктів і сцени за складних погодних умов, низькій прозорості атмосфери і відсутності освітленості; - вузький миттєвий просторовий кут спостереження; - не можна визначити швидкість об'єкта і віддаль до нього.
Інфрачервоний (тепловий) (8-14 мкм)	- висока кутова роздільна здатність; - спостереження у довільний час доби; - можливість отримувати зображення при погіршених погодних умовах.	- вузький миттєвий просторовий кут спостереження; - нижча роздільна здатність ніж у видимого каналу спостереження; - не можна визначити швидкість об'єкта і віддаль до нього.

Як видно з табл. 1.3 зображення видимого діапазону дають детальну інформацію про текстуру об'єктів з високою просторовою роздільною здатністю та представляють інформацію у звичний для зорової системи людини спосіб, проте їх ефективність різко падає з погіршенням умов спостереження. На відміну

від цього, інфрачервоні зображення дозволяють відрізнити цілі від їхнього фону завдяки різниці теплового випромінювання, незважаючи на складні погодні умови та відсутність зовнішнього освітлення, проте мають у кілька разів нижчу роздільну здатність. Тому бажано об'єднати ці два типи зображень, які можуть поєднувати в собі переваги теплового випромінювання на інфрачервоних зображеннях та докладну текстурну інформацію на видимих зображеннях. Для об'єднання інформації з вхідних окремих зображень, як вже було сказано в п. 1.1, доцільно використати процес комплексування.

#### **1.4. Методи комплексування зображень**

Метою комплексування зображень є підвищення інформативності вихідних мультиспектральних зображень, що формуються мультиспектральною системою моніторингу та зменшення надлишкової інформації, що надходить до оператора системи [33, 38, 53] або – більш узагальнено – ефективності виконання поточної задачі інформаційною системою.

##### **1.4.1. Класифікація методів комплексування**

В залежності від того, які дані використовуються при комплексуванні, можна виділити наступні його категорії [23, 32, 51]:

- комплексування зображень, отриманих від однотипних сенсорів в один і той же час, але з різних точок спостереження (*multiview image fusion*);
- комплексування зображень, отриманих від сенсорів різних типів (*multimodal image fusion*): інфрачервоні зображення з видимими та/або радіолокаційними, дані панхроматичного та спектрального знімання і т.п.;
- комплексування зображень, отриманих в різний час (*multitemporal image fusion*) для виявлення змін між ними або з метою синтезу зображень, в яких усунуті перешкоди, що заважають спостереженню в певні періоди часу;

- комплексування зображень однієї і тієї ж сцени, отриманих при різних фокусних віддальях об'єктиву (*multifocus image fusion*);
- комплексування зашумлених або спотворених зображень однієї і тієї ж сцени з метою покращення якості результуючого зображення – вільного від шуму та спотворень (*fusion for image restoration*);
- комплексування зображень низької роздільної здатності з метою отримання комбінованого зображення вищої роздільної здатності (*super resolution image fusion*).

У випадку мультиспектральних ОЕСМ найбільш актуальним є комплексування зображень, отриманих від сенсорів різних типів, зокрема зображень видимого та інфрачервоного діапазонів, так зване мультимодальне комплексування.

Для кожної категорії комплексування використовують відповідні методи, які можна поділити за рівнем абстракції на три групи (рис. 1.6) [32]:

- комплексування на рівні пікселів (сенсорів);
- комплексування на рівні релевантних ознак (узагальнених параметрів);
- комплексування на рівні рішень (умовисновків), прийнятих поканально.

Методи комплексування на рівні пікселів є найбільш простими в плані математичних розрахунків, а отже й найбільш поширеними. При комплексуванні на рівні пікселів результуюче зображення отримуємо шляхом математичних операцій над окремими пікселями або невеликими по площі областями пікселів вхідних зображень. Необхідною умовою ефективності методів даної групи є якісна попередня реєстрація та просторова синхронізація вхідних зображень.

При комплексуванні на рівні релевантних ознак об'єктами є не окремі пікселі, а певні характерні області вхідних зображень. В даному випадку виділення релевантних ознак здійснюється незалежно в кожному каналі. Методи комплексування на рівні релевантних ознак розвинуті значно менше і з'явилися значно пізніше, ніж алгоритми комплексування на рівні пікселів. Це пов'язано з

обчислювальною складністю даних алгоритмів, а також відсутністю універсальних алгоритмів сегментації та розпізнавання. Основна різниця між алгоритмами даного класу полягає в принципі сегментації, що використовується для виділення характерних ознак вхідних зображень.

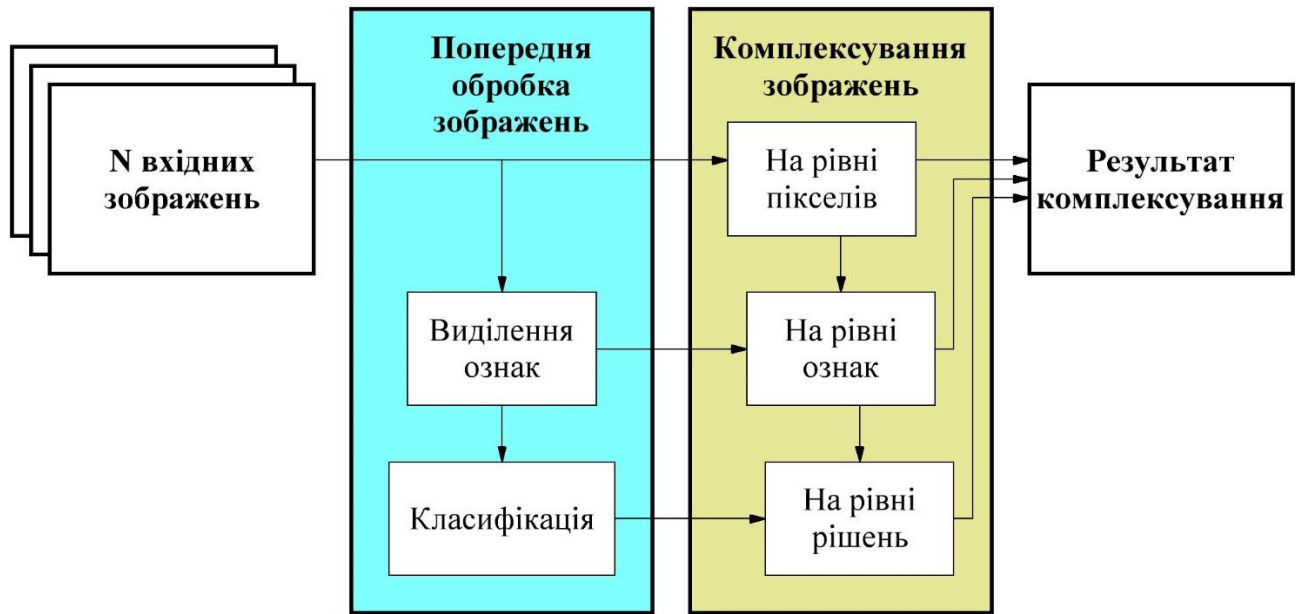


Рис. 1.6. Схема комплексування зображень на різних рівнях абстракції:  
 комплексування на рівні пікселів, комплексування на рівні ознак і  
 комплексування на рівні прийняття рішень

Комплексування на рівні прийняття рішень є менш поширеним та дещо ізольованим. Причиною цього є те, що результатом комплексування є не комбіноване зображення, а деяке судження, яке містить більш інформативний (абстрактний) опис реальної картини.

Рішення про застосування кожного з алгоритмів потрібно приймати в залежності від джерел інформації (категорії комплексування). Комплексування на рівні пікселів застосовується, коли джерела зображень близькі по своїм характеристикам, наприклад при комплексуванні зображень одного спектрального діапазону, але з різною роздільною здатністю, або отриманих в різний час. Комплексування на рівні релевантних ознак необхідно застосовувати, коли ступінь розбіжності між джерелами зображень вище, але області

підвищеного інтересу можуть бути асоціативно пов'язані. Комплексування на рівні прийняття рішень застосовується в тих випадках, коли вхідні зображення значно відрізняються по своїм характеристикам одне від одного.

На кожному рівні комплексування використовують відповідні методи комплексування (рис. 1.7) [7].

Методи комплексування на рівні пікселів поділяють на методи багатомасштабного розкладу (*Multiscale Decomposition Based Methods*) та методи без багатомасштабного розкладу (*Non Multiscale Decomposition Based Methods*).

До методів без багатомасштабного розкладу відносять: лінійні, нелінійні та методи спектрального кодування.



Рис. 1.7. Класифікація методів комплексування зображень

Найбільш простими є лінійні методи. Суть даних методів полягає в тому, що кожен піксель результуючого (комплексованого) зображення отримують шляхом додавання значень яскравості відповідних пікселів вхідних зображень, помножених на певний ваговий коефіцієнт. Вагові коефіцієнти можуть бути попередньо задані або розраховані в процесі виконання алгоритму

комплексування. В останньому випадку мають справу з методами адаптивного визначення коефіцієнтів, які в свою чергу поділяються на дві групи: з використанням апріорних даних та без використання апріорних даних. Згідно закордонних джерел, найбільш ефективними лінійними методами з використанням апріорних даних для визначення вагових коефіцієнтів є статистичні методи, а без використання апріорних даних – методи із застосуванням нейронних мереж. Одним з найбільш розповсюджених адаптивних методів є метод аналізу головних компонент [7, 27].

Суть методів спектрального кодування [31, 32] полягає в тому, що кожному вхідному зображенню виділяється свій піддіапазон із діапазону видимих частот. Таким чином, на результуючому зображенні будуть присутні всі елементи вхідних зображень, але забарвлені різним кольором в залежності від того, на якому із вхідних зображень вони є більш інтенсивними. Методи спектрального кодування часто використовуються в поєднанні з іншими методами.

Принцип роботи нелінійних методів полягає в тому, що вхідні зображення поділяються на дві складові, частіше за все низькочастотні та високочастотні. Кожна із складових підлягає подальшій обробці (фільтрації) незалежно від іншої. Потім відбувається комплексування відповідних компонент як самостійних зображень за допомогою будь-якого лінійного методу з подальшим їх об'єднанням в результуюче зображення.

Методи багатомасштабного розкладу передбачають багатомасштабний розклад вхідних зображень (*MST – multiscale transform*) з подальшим об'єднанням утворених складових згідно певного правила комплексування в комбіноване багатомасштабне представлення результуючого зображення [7]. Саме ж результуюче зображення отримують шляхом оберненого багатомасштабного розкладу. Найбільш розповсюдженими методами багатомасштабного розкладу є: пірамідальні схеми (піраміда Лапласа, контрастна піраміда, градієнтна, морфологічна, управляюча) та дискретне вейвлет перетворення (*discrete wavelet transform – DWT*) [29].

Методи комплексування на рівні характерних ознак поділяються за двома критеріями – методи прямого та опосередкованого оцінювання, одноступеневі та багатоступеневі [31]. Методи прямого оцінювання працюють безпосередньо з яскравістю вхідних зображень. За допомогою спеціальної функції на зображеннях виділяються потенційно інформативні області. При застосуванні методів опосередкованого оцінювання вхідне зображення попередньо обробляється спеціальними операторами з метою усунення імпульсного шуму та/або підкреслення інформативних зон. Одноступеневі методи працюють з оригінальними вхідними зображеннями. Багатоступеневі – із зображеннями, обробленими низькочастотними та високочастотними фільтрами. Відповідно області інтересу виділяються окремо на низькочастотних та високочастотних складових вхідних зображень. Принцип подальшої обробки майже однаковий для всіх методів даного рівня. Після знаходження меж та виділення областей проводиться їх аналіз. Він виконується по ряду ознак, що мають потенційний інтерес для спостерігача. Це можуть бути морфологічні, топологічні, ознаки яскравості та інші. Після аналізу здійснюється перенесення областей інтересу із вхідних зображень в єдине результуюче.

Отже, на основі вищесказаного, задачею комплексування є така обробка вхідних зображень, яка дозволяла б отримувати результуюче зображення з:

1. максимальною кількістю інформативних елементів, що присутні у вхідних зображеннях;
2. мінімальною кількістю завад, що присутні у вхідних зображеннях.

#### **1.4.2. Аналіз методів комплексування на піксельному рівні**

У зв'язку з тим, що основним завданням комплексування зображень є перенесення інформаційних складових з різноспектральних зображень в єдине мультиспектральне, при чому з високою швидкістю обробки даних в режимі реального часу, пропонується проаналізувати наступні методи комплексування зображень:

- 1) усереднення [38-42];

- 2) метод вагової функції [38-40];
- 3) максимум яскравості [38-41];
- 4) степеневе перетворення [38-40];
- 5) черезрядкове комплексування [38-40, 42];
- 6) метод маски [38-40];
- 7) підсилення відмінностей [27, 33, 37];
- 8) аналіз низько (НЧ) та високочастотних (ВЧ) складових [33, 37];
- 9) аналіз головних компонент (АГК) [27, 41, 50];
- 10) комплексування з пріоритетом [42, 43];
- 11) комплексування на основі оцінювання інформативності [44];
- 12) метод локального синтезу [45];
- 13) комплексування за допомогою тривимірного фільтра нижніх частот (3D ФНЧ) [46, 47];
- 14) комплексування на основі піраміди Лапласа [27, 41, 48, 49];
- 15) комплексування на основі дискретного вейвлет-перетворення [27, 32, 38, 41, 42, 48, 50-53];

Наведений список методів комплексування зображень не вичерпує всього їх різноманіття, проте така велика їх кількість свідчить, що на даний момент не існує універсального методу, а дослідження в даному напрямку є актуальними [53].

Проаналізуємо дані методи з точки зору можливості їх використання для комплексування двох різноспектральних зображень  $A$  та  $B$ , розміром  $N \times M$  елементів, тобто таких, що отримані з різних парціальних спектральних каналів МСМ.

Метод 1. Метод усереднення заснований на знаходженні середнього арифметичного з вхідних різноспектральних зображень:

$$F(n, m) = \frac{A(n, m) + B(n, m)}{2}, \quad (1.10)$$

де  $F$  – комплексоване зображення;  $(n, m)$  – номери рядків і стовпців зображення (координати елемента зображення – пікселя).



Примітка. Далі для спрощення математичних записів координати пікселя  $(n, m)$  будуть вказуватись тільки у випадку, де це потрібно для розуміння математичних операцій при описі конкретного методу, проте всі операції будуть і надалі здійснюватись над пікселями.

Операція усереднення потребує мінімальних обчислювальних затрат, але не використовує всі інформаційні переваги, які дає наявність декількох різноспектральних зображень. В результаті отримується зображення з згладженими деталями об'єктів і істотно зменшеним контрастом відносно вхідних зображень, але в той же час відбувається зменшення шумової складової.

Метод 2. Метод вагової функції подібний до методу усереднення і реалізується як лінійна комбінація значень вхідних зображень з деяким коефіцієнтом  $\alpha$ :

$$F = \alpha A + (1 - \alpha)B. \quad (1.11)$$

Коефіцієнт характеризує величину значущості кожного з каналів і може приймати значення в діапазоні  $[0;1]$ . Він може бути заданий на основі апріорного оцінювання ефективності кожного з каналів, але в такому випадку метод буде не адаптивним до постійно змінних умов зйомки. Тому в [39] пропонується розраховувати коефіцієнт на основі середнього значення яскравості пікселів вхідних зображень:

$$\alpha = \frac{\bar{B}}{\bar{A} + \bar{B}}, \quad (1.12)$$

де  $\bar{A}$  та  $\bar{B}$  – середні значення яскравості пікселів в зображеннях  $A$  та  $B$ , відповідно.

Такий спосіб знаходження вагового коефіцієнта призводить до того, що більш значущим стає те зображення, середній рівень яскравості якого є вищим. Проте тільки високий середній рівень яскравості зображення зовсім не означає, що зображення має високу якість чи несе в собі велику кількість інформації, що звісно є недоліком даного методу.

Метод 3. Суть методу максимуму яскравості полягає в заміні значень зображення  $I_A$  значеннями зображення  $I_B$  в тому випадку, якщо значення яскравості другого зображення більше:

$$F = \begin{cases} A, & A \geq B \\ B, & A < B \end{cases} \quad (1.13)$$

При використанні даного методу існує висока ймовірність втратити частину корисної інформації, оскільки максимальне значення яскравості не є очевидним показником інформативності точки зображення.

Метод 4. Метод степеневого перетворення полягає в зведенні одного з вхідних зображень в показник степеня, рівний нормованому значенню негатива другого зображення:

$$F = A^{1-B/2^n}, \quad (1.14)$$

де  $n$  – розрядність вхідних зображень, в класичному випадку  $n = 8$ , що еквівалентно 256-м рівням градацій сірого в зображенні.

Даний метод є модифікацією методу, запропонованого в роботі [54], де в якості показника степеня використовувалося відношення двох вхідних зображень з попередньою просторовою фільтрацією.

В результаті комплексування по (1.14) на результуючому зображенні мінімальні значення яскравості зображення  $B$  залишаються без змін, а для максимальних відбудеться суттєва зміна. Таким чином, діапазон значень вхідного зображення  $A$  розшириться, що дасть покращення контрасту на результуючому зображенні.

При виборі показника степеня (одного з вхідних зображень) виникає неоднозначність, яка обумовлена відсутністю критерія вибору зображення, яке є показником степеня. Таким чином, для використання методу на практиці необхідно обґрунтувати підходи до визначення показника степеня у (1.14).

Метод 5. Метод черезрядкового комплексування реалізується шляхом порядкового чергування одного зображення відносно іншого:

$$F(n, m) = \begin{cases} A(n, m), & n = 1, 3, 5 \dots N \\ B(n, m), & n = 2, 4, 6 \dots N - 1 \end{cases} \quad (1.15)$$

Основним недоліком даного методу є яскраво виражена періодична структура на результуючому зображенні, обумовлена принципом роботи методу. Можливим шляхом усунення даного дефекту є застосування фільтрів з максимально можливою постійною часу, наприклад фільтра Гауса. Однак такий підхід розмиває границі об'єктів спостереження.

Метод 6. При комплексуванні по методу маски одне з вхідних зображень являється маскою для іншого. Виразом (1.16) представлено найпоширеніший спосіб реалізації цього методу [39]:

$$F = \begin{cases} 2AB + A^2(1 - 2B), & A < T \\ 2A(1 - B) + \sqrt{A}(2B - 1), & A \geq T \end{cases} \quad (1.16)$$

де  $T$  – поріг яскравості зображення взятого за базове.

При застосуванні методу маски яскравість пікселів вхідних зображень спочатку приводиться до діапазону значень  $[0;1]$ . Результат комплексування представляється у вигляді зображення, взятого за базове (в даному випадку це зображення  $A$ ), пікселі якого мають збільшену або зменшену величину яскравості в залежності від величини порогу та яскравості пікселів зображення-маски.

Основною складністю при реалізації даного методу є відсутність однозначного критерію для вибору базового зображення. Його вибір можна здійснювати на основі значень середньої яскравості зображень, як в методі вагової функції або коефіцієнту кореляції. Також складністю є визначення необхідного рівня порогу  $T$ , неправильний вибір якого може призвести до втрати інформативних елементів на результуючому зображенні.

Метод 7. В методі на основі підсилення відмінностей в якості міри цінності значень пікселів з різноспектральних зображень при перенесенні в результуюче зображення прийнято їх відмінність від результату панхроматичної зйомки.

Алгоритм комплексування на основі підсилення відмінностей складається з наступних операцій:

1. Формується модель зображення, близького до панхроматичної зйомки (псевдо панхроматичне зображення):

$$P = \frac{A + B}{2}; \quad (1.17)$$

2. Визначаються величини відносної міри відмінності різноспектральних даних від даних панхроматичної зйомки:

$$\gamma_A = \frac{A}{P} \quad \text{та} \quad \gamma_B = \frac{B}{P}; \quad (1.18)$$

3. Визначається матриця коефіцієнтів, що характеризують відносну спектральну відмінність між вхідними зображеннями:

$$D = \sqrt{(\gamma_A - \gamma_B)^2}; \quad (1.19)$$

4. Формується результуюче зображення на базі найбільш інформативного зображення (наприклад, першого) шляхом додавання до нього об'єктів, які найбільш чітко відображені на іншому зображенні:

$$F = A[1 + \alpha(D - \bar{D})], \quad (1.20)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт підсилення спектральних відмінностей;  $\bar{D}$  – середнє арифметичне значення елементів матриці  $D$ .

Основними недоліками при реалізації даного методу є відсутність критерію для вибору найбільш інформативного зображення та критерію визначення коефіцієнта  $\alpha$ .

Метод 8. Оскільки основна інформація про контури об'єктів та дрібні деталі на зображенні міститься в ВЧ складових, тому для їх ефективного перенесення на результуюче зображення метод аналізу НЧ та ВЧ складових передбачає, що комплексування вхідних зображень проводиться окремо по НЧ і ВЧ складових [44].

Алгоритм комплексування на основі аналізу НЧ та ВЧ складових складається з наступних операцій:

1. Виділяються НЧ складові вхідних зображень, шляхом їх обробки НЧ фільтром. Фільтрація реалізується шляхом згортки вхідних зображень з згладжуючою маскою  $H$ :

$$A^{(НЧ)} = A \oplus H \quad \text{та} \quad B^{(НЧ)} = B \oplus H, \quad (1.21)$$

де  $\oplus$  – операція згортки.

Згладжуюча маска  $H$  формується добутком векторів  $V$  та  $V^T$ :

$$H = V \cdot V^T, \quad (1.22)$$

де вектор  $V$  являється ядром НЧ фільтра і формується, наприклад, за допомогою фільтра Гауса:

$$V(i) = e^{-\frac{(i/2-i)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1.23)$$

де  $i$  – розмір ядра НЧ фільтра (розмір маски  $H$ ).

2. Виділяються ВЧ складові вхідних зображень:

$$A^{(BЧ)} = pA - A^{(НЧ)} \quad \text{та} \quad B^{(BЧ)} = pB - B^{(НЧ)}, \quad (1.24)$$

де  $p$  – параметр, що характеризує рівень пріоритету ВЧ складових над НЧ.

3. Обчислюються значення яскравості НЧ складових результуючого зображення  $F^{(НЧ)}$  шляхом усереднення значень  $A^{(НЧ)}$  та  $B^{(НЧ)}$ .

4. Обчислюються значення яскравості ВЧ складових результуючого зображення  $F^{(BЧ)}$ :

$$F^{(BЧ)} = \text{sign}(A^{(BЧ)} + B^{(BЧ)}) \cdot F_0^{(BЧ)}, \quad (1.25)$$

де  $\text{sign}(\cdot)$  – оператор Signum-функції [55];  $F_0^{(BЧ)}$  – проміжне зображення, що визначається наступним чином:

$$F_0^{(BЧ)} = \begin{cases} A^{(BЧ)}, & |A^{(BЧ)}| \geq |B^{(BЧ)}| \\ B^{(BЧ)}, & |A^{(BЧ)}| < |B^{(BЧ)}| \end{cases} \quad (1.25)$$

5. Формується комплексоване зображення, як сума результуючих НЧ та ВЧ складових:

$$F = F^{(НЧ)} + F^{(BЧ)}. \quad (1.26)$$

Незважаючи на хороше виділення деталей, при комплексуванні на основі аналізу НЧ і ВЧ складових зображень має місце помилкове підкреслення контурів навколо границь об'єктів (з'являються ореоли), а також втрата локальних контрастів сцени.

Метод 9. Згідно [50] метод на основі аналізу головних компонент (АГК, *Principal Component Analysis algorithm* або *PCA-algorithm* в англійських джерелах) для комплексування двох зображень  $A$  і  $B$  передбачає, що зображення

представляють собою двовимірні масиви випадкових чисел розмірами  $M \times N$  елементів.

На першому кроці методу АГК обчислюється коваріаційна матриця, що має вигляд:

$$\begin{bmatrix} \text{Var}(A) & \text{Cov}(B, A) \\ \text{Cov}(A, B) & \text{Var}(B) \end{bmatrix}, \quad (1.27)$$

де  $\text{Var}(\cdot)$  – дисперсія значень яскравості пікселів зображення, наприклад для  $A$ :

$$\text{Var}(A) = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (A(m, n) - \bar{A})^2; \quad (1.28)$$

$\text{Cov}(A, B)$ ,  $\text{Cov}(B, A)$  – коваріація значень яскравості пікселів зображень:

$$\text{Cov}(A, B) = \text{Cov}(B, A) = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (A(m, n) - \bar{A})(B(m, n) - \bar{B}), \quad (1.29)$$

де  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$  – середнє значення яскравості зображення  $A$  та  $B$ , відповідно.

Далі визначаються власні вектори і власні значення матриці (1.27), при цьому вагові коефіцієнти комплексування визначаються, як коефіцієнти нормалізованого власного вектора, відповідного найбільшому з обчислених власних значень матриці коваріації:

$$\begin{cases} V_A = \frac{\varphi_A[0]}{\varphi_A[0] + \varphi_A[1]}, & V_B = \frac{\varphi_A[1]}{\varphi_A[0] + \varphi_A[1]}, & \text{при } \lambda_A > \lambda_B \\ V_A = \frac{\varphi_B[0]}{\varphi_B[0] + \varphi_B[1]}, & V_B = \frac{\varphi_B[1]}{\varphi_B[0] + \varphi_B[1]}, & \text{при } \lambda_A \leq \lambda_B \end{cases}, \quad (1.30)$$

де  $\varphi_i = \{\varphi_i[0], \varphi_i[1]\}$  – власні вектори коваріаційної матриці (1.27);  $\lambda_i$  – їм відповідні власні значення;  $i = A, B$ .

На останньому кроці формується комплексоване зображення за допомогою визначених вагових коефіцієнтів  $V_A$  та  $V_B$ :

$$A = V_A A + V_B B. \quad (1.31)$$

Істотний недолік методу на основі АГК проявляється при комплексуванні подібних між собою зображень. В цьому випадку матриця буде мати слабе діагональне вираження, тобто буде погано обумовлена, і метод в такій ситуації

працює нестабільно. Якщо ж подати на вхід два однакових зображення, то комбіноване зображення буде взагалі не визначено.

Метод 10. Даний метод заснований на пріоритеті телевізійного (ТВ) зображення (зображення отриманого у видимому діапазоні ЕМХ) в порівнянні з тепловізійним (ТПВ) зображенням (зображення отриманого у довгохвильовому ІЧ діапазоні ЕМХ). Позначимо ТВ зображення як  $A$ , а ТПВ зображення як  $B$ .

При їх комплексуванні ваги будуть залежати від середнього значення яскравості пікселів ТПВ зображення  $\bar{B}$  і середнього значення абсолютних відхилень яскравості  $\overline{\Delta B}$ :

$$F = A + |B - \bar{B}| - \overline{\Delta B}, \quad (1.32)$$

де  $\overline{\Delta B}$  визначається з виразу:

$$\overline{\Delta B} = \frac{1}{NM} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |B(n, m) - \bar{B}|. \quad (1.33)$$

Як пояснюють автори методу [43], в результаті формується комплексоване зображення  $F$ , телевізійне за характером розподілу яскравості, але доповнене інформативними елементами, взятими з ТПВ зображення.

Очевидним недоліком даного методу є його не адаптивність при наявності будь-яких завад чи шумів в ТВ зображенні, які в повному обсязі будуть перенесені на комплексоване зображення.

Метод 11. В основі даного методу лежить оцінка інформативності ділянки навколо кожного пікселя шляхом використання ковзного по зображенню вікна.

Алгоритм комплексування на основі оцінювання інформативності складається з наступної послідовності дій:

1. Вибирається розмір вікна  $(2w + 1) \times (2w + 1)$  елементів. В [44] рекомендують вибрати  $w = 3$ , тобто вікно розміром  $(7 \times 7)$  елементів, хоча візуально суттєвої різниці при тестуванні на різних зображеннях для інших  $w = 1, 2, \dots, 12$  на результаті комплексування не спостерігалось, різниця лише тільки в швидкості обробки;

2. Для кожного пікселя з позицією  $(n, m)$  на зображеннях  $A$  і  $B$  розміром  $M \times N$  пікселів, розраховується середньоквадратичне відхилення (СКВ) для центрального елемента у вікні [44]:

$$\sigma_A(w|n, m) = \frac{1}{(2w + 1)^2} \sum_{x=n-w}^{n+w} \sum_{y=m-w}^{m+w} (A(x, y) - A(n, m))^2, \quad (1.34)$$

$$0 < x \leq M, \quad 0 < y \leq N.$$

3. Розраховується максимальне значення СКВ для зображень  $A$  і  $B$ :

$$\sigma_A = \max_{m,n} (\sigma_A(w|n, m)); \quad (1.35)$$

4. Результируюче комплексоване зображення  $F$  визначається за формулою:

$$F = \frac{\sigma_B A + \sigma_A B}{\sigma_A + \sigma_B}. \quad (1.36)$$

Як і інші евристичні підходи, пов'язані з комплексуванням шляхом підбору коефіцієнтів змішування, даний метод є обчислювально ефективним, проте він володіє таким істотним недоліком, як нездатність до адаптації в залежності від вхідних даних, а також не враховує корисний вміст зображень, оскільки з однаковим значенням СКВ можна отримати зовсім різні по змісту зображення.

Метод 12. Методи локального синтезу засновані на пошуку і виділенні об'єктів інтересу по попередньо відомим ознаками. Один з таких методів представлений в роботі [45], де використовуються такі ознаки об'єктів, як яскравості і ознаки руху.

При комплексуванні двох зображень  $A$  та  $B$ , одне з них вибирається в якості базового (наприклад,  $A$ ), до якого додаються області з іншого зображення (в даному випадку це зображення  $B$ ), що перевищують по модулю порогові значення.

Алгоритм комплексування на основі локального синтезу полягає в наступному [45]:

1. Обчислюється діапазон модулів різниці вхідних зображень для визначення порогових значень:



$$D(n, m) = |A(n, m) - B(n, m)|, \quad (1.35)$$

$$D_{min} = \min_{m,n}(D(n, m)), \quad D_{max} = \max_{m,n}(D(n, m)); \quad (1.36)$$

2. На основі емпірично підібраних коефіцієнтів

$$a_1 = \frac{D_{max} + 3D_{min}}{4}, \quad a_2 = \frac{D_{min} + 3D_{max}}{4}; \quad (1.37)$$

обчислюються порогові значення  $b_1$  і  $b_2$  для вибору значень яскравості зображення:

$$\begin{aligned} b_1 &= D_{min} + a_1(D_{max} - D_{min}), \\ b_2 &= D_{min} + a_2(D_{max} - D_{min}); \end{aligned} \quad (1.38)$$

3. Обчислюються результуючі значення яскравості елементів комплексованого зображення:

$$F = \begin{cases} A, & D \leq b_1 \\ A + \frac{b_1 - D(A - B)}{b_1 + b_2}, & b_1 < D < b_2. \\ B, & D \geq b_2 \end{cases} \quad (1.39)$$

Незважаючи на ефективність у багатьох часткових прикладних задачах, комплексування на основі локального синтезу, не носить універсальний характер, так як різні об'єкти на зображеннях, що комплексуються можуть мати абсолютно різні ознаки, які сильно залежать від умов і особливостей моніторингу, а кінцевий результат має яскраво виражені артефакти сегментації [45].

Метод 13. Метод комплексування за допомогою 3D ФНЧ заснований на теорії оптимальної дискретизації багатомірних повідомлень, оскільки мультиспектральні зображення рахуються тривимірним: дві просторові координати  $x, y$  і одна спектральна  $\lambda$  [46, 47].

Комплексування виконується шляхом багатовимірної рекурсивно-нерекурсивної фільтрації вхідних зображень за допомогою синтезованого 3D ФНЧ першого порядку. З урахуванням властивості реальним зображенням анізотропії їх спектрів, область пропускання просторово-частотної

характеристики  $D_0$  тривимірного інтерполюючого ФНЧ визначається у вигляді октаедра [47]:

$$D_0 = |v_x| + |v_y| + |v_\lambda| = \alpha, \quad (1.40)$$

де  $\alpha \leq 1$ ;  $v_x, v_y, v_\lambda$  – відповідні нормовані поздовжні, поперечні і спектральні (в даному випадку, за джерелами формування зображень) частоти.

Область пропускання  $D_0$  є апроксимацію поверхні, яка оптимальним чином обмежує область існування відтворюваних просторових і спектральних частот мультиспектрального зображення. Для практичної реалізації у формулі (1.40) автори обирають коефіцієнт  $\alpha = 0,8$  [46, 47], що гарантує відсутність перекриття між частинами періодичного тривимірного дискретного спектра для комплексованого зображення і в той же час визначає область пропускання необхідного розміру.

На практиці область пропускання  $D_0$  в частотній області апроксимується просторово-частотною характеристикою (ПЧХ) [47] виду:

$$D_0(v_x, v_y, v_\lambda) \cong \frac{0,5(1 + e^{-j\pi v_\lambda})}{1 - \beta(v_x, v_y)e^{-j\pi v_\lambda}} [1 - \beta(v_x, v_y)] K_2(v_x, v_y), \quad (1.40)$$

де  $\beta(v_x, v_y)$  – двовимірна ПЧХ нерекурсивного кола зворотного зв'язку [47]:

$$\begin{aligned} \beta(v_x, v_y) = & 0,531 - 0,312(\cos(\pi v_x) + \cos(\pi v_y)) - \\ & - 0,436 \cos(\pi v_x) \cos(\pi v_y); \end{aligned} \quad (1.41)$$

$K_2(v_x, v_y)$  – двовимірна ПЧХ нерекурсивного кола корекції з лінійною фазовою характеристикою [47]:

$$\begin{aligned} K_2(v_x, v_y) = & 0,625 + 0,250(\cos(\pi v_x) + \cos(\pi v_y)) - \\ & - 0,125 \cos(\pi v_x) \cos(\pi v_y). \end{aligned} \quad (1.42)$$

Структурна схема фільтра стосовно завдання комплексування двох різноспектральних зображень  $A$  та  $B$  представлена на рис. 1.8.

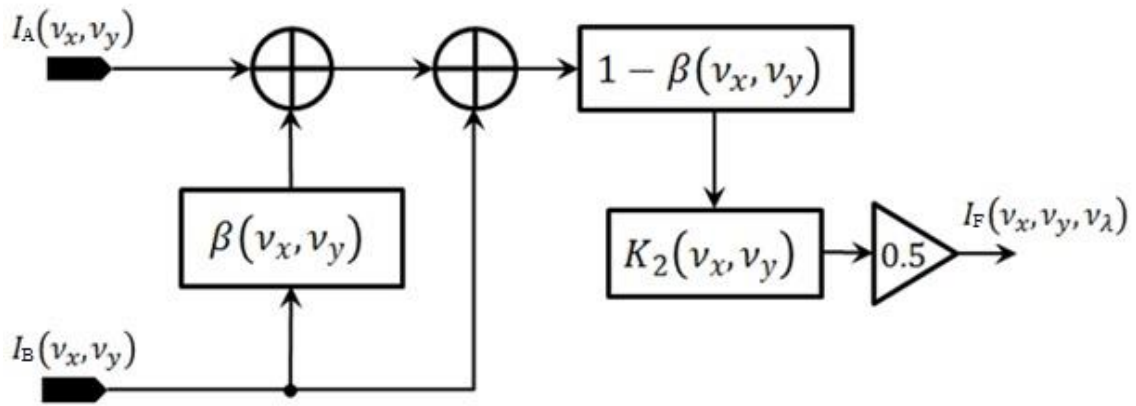


Рис. 1.8. Структурна схема 3D ФНЧ першого порядку для комплексування двох різноспектральних зображень

Як і в більшості методів комплексування, в яких одне з зображень являється базовим, в даному методі теж необґрунтовано по якому критерію вибирається базове зображення.

Метод 14. Метод на основі піраміди Лапласа полягає в розбитті вхідних зображень на декілька рівнів з різними (зазвичай кратними) масштабами і об'єднанні зображень на кожному з рівнів в результуюче по певному правилу. Зображення різних масштабів формують піраміду (рис. 1.9) під назвою піраміда Лапласа.

Передумови такого комплексування полягають в тому, що при аналізі зображення, спостерігаються зв'язані області однакової структури і яскравості, які, об'єднуючись, формують об'єкти на зображенні, якщо ці області мають малий розмір або низький контраст, то як правило вони аналізуються при великому масштабі; якщо ж вони мають великий розмір чи високий контраст, то достатньо і невеликого масштабу. Якщо на зображенні одночасно присутні як великі, так і малі об'єкти, то корисним може виявитися аналіз такого зображення при різних масштабах (при різних роздільних здатностях) [56].

Алгоритм комплексування на основі піраміди Лапласа реалізується наступним чином [27]:

1. Вхідні зображення шляхом низькочастотної фільтрації та проріджування розкладаються на  $L$  рівнів з різними масштабами (рис. 1.10), при

цьому отримується  $2L$  зображень різної розмірності, які формують піраміди зображення з НЧ та ВЧ складовими;

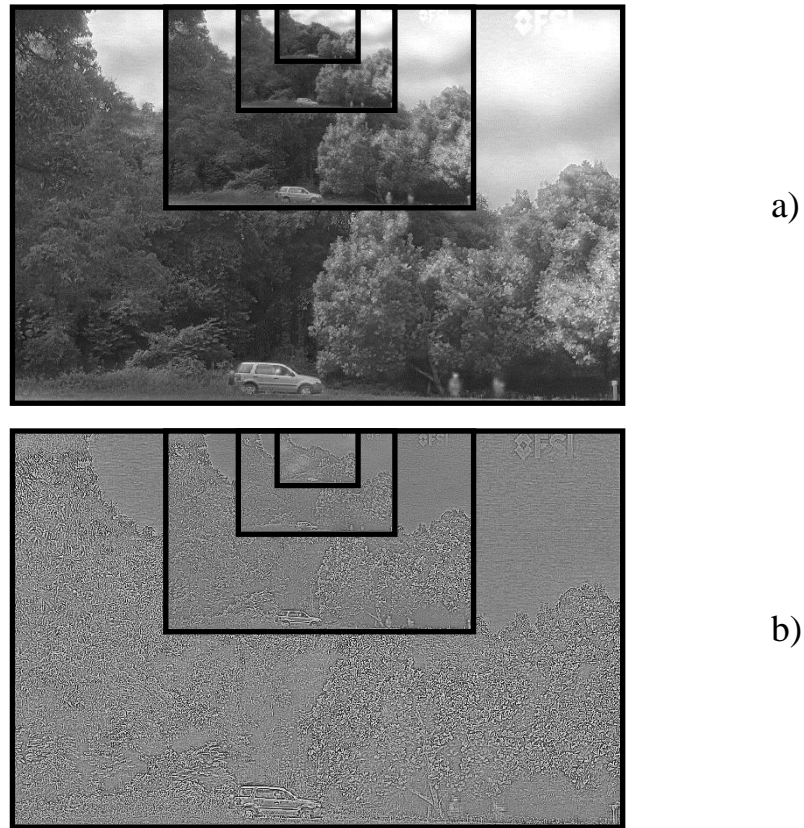


Рис. 1.9. Структура піраміди зображення: а) НЧ складові; б) ВЧ складові

2. Виконується комплексування однакових по масштабу зображень, використовуючи певне правило об'єднання (наприклад, максимум яскравості);

3. З отриманого результуючого набору зображень (результуючої піраміди) відновлюється результуюче комплексоване зображення того ж масштабу, що і вхідні зображення.

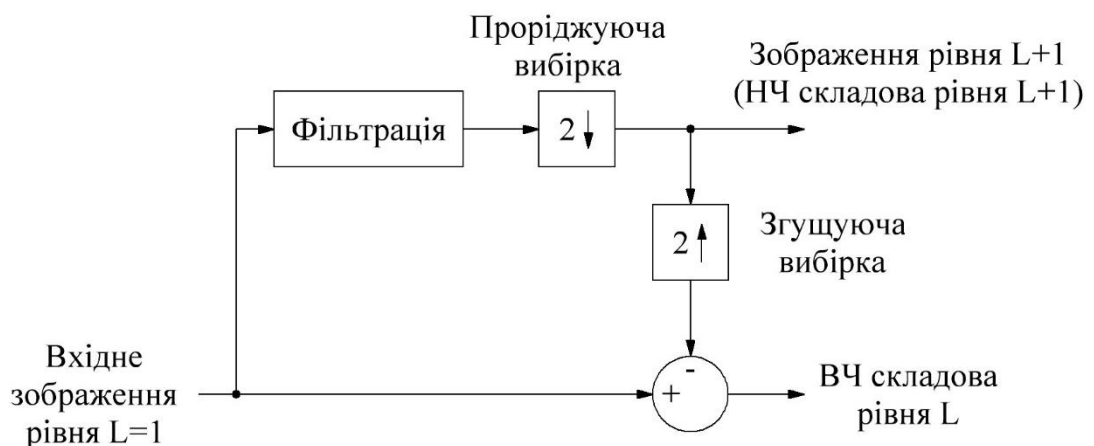


Рис. 1.10. Структура процедури формування піраміди зображення

Даний підхід дає змогу отримати високий локальний контраст зображення і, відповідно, велику деталізацію. Тим не менш, даний метод не враховує взаємозв'язок окремо взятого пікселя з сусідніми, що не дає змоги достовірно відобразити яскравість об'єктів сцени.

Метод 15. Метод на основі дискретного вейвлет перетворення. Вейвлет-перетворення (від англ. *wavelet transform*) – інтегральне перетворення, яке представляє собою згортку вейвлет-функції з сигналом. При дискретному одновимірному вейвлет-перетворенні вхідний сигнал  $x(i)$  спочатку пропускають через фільтр з імпульсною характеристикою  $g(i)$ , в результаті їх згортка має вигляд [51]:

$$y(i) = x(i) \oplus g(i) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)g(i - k). \quad (1.43)$$

Одночасно подібним чином сигнал розкладається за допомогою ВЧ фільтра з імпульсною характеристикою  $h(i)$  (рис. 1.11).

Вихідні сигнали ВЧ фільтра називають коефіцієнтами деталізації, а вихідні сигнали НЧ фільтра коефіцієнтами апроксимації. НЧ і ВЧ фільтри пов'язані один з одним і є квадратурними дзеркальними фільтрами (фільтри з кінцевою імпульсною характеристикою, частотна характеристика яких симетрична щодо половини частоти дискретизації). Так як половина частотного діапазону сигналу була відфільтрована, то, відповідно до теореми Котельникова [57], відліки сигналів можна прорідити в 2 рази:

$$\begin{aligned} y_{\text{НЧ}}(i) &= x(i) \oplus g(i) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)g(2i - k), \\ y_{\text{ВЧ}}(i) &= x(i) \oplus h(i) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)h(2i - k). \end{aligned} \quad (1.44)$$

Таке розкладання дає змогу вдвічі зменшити роздільну здатність за рахунок проріджування відліків сигналу. При цьому кожен з отриманих сигналів представляє половину частотної смуги вхідного сигналу, тому частотна роздільна здатність подвоюється.

За допомогою оператора проріджування « $\downarrow$ » ( $y(i) \downarrow r) = y(ri)$ , вищезгадані формули можна записати як:

$$\begin{aligned} y_{\text{НЧ}}(i) &= (x(i) \oplus g(i)) \downarrow 2; \\ y_{\text{ВЧ}}(i) &= (x(i) \oplus h(i)) \downarrow 2. \end{aligned} \quad (1.45)$$

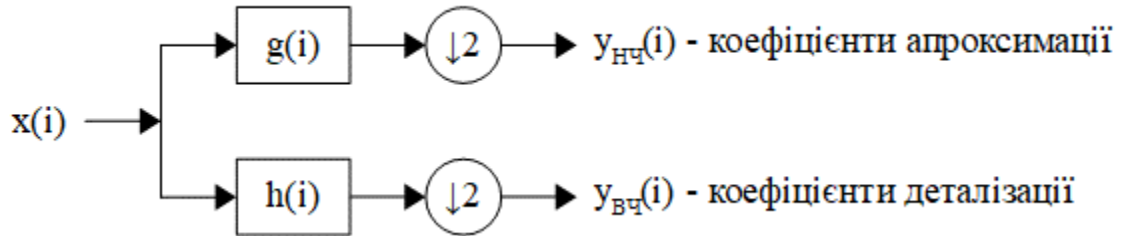


Рис. 1.11. Схема розкладу сигналу в ДВП

Аналогічним чином сигнал можна розкласти каскадно, застосовуючи кілька пар фільтрів до однієї з компонент сигналу. Кожен з каскадів називається рівнем дискретного вейвлет-перетворення (ДВП).

Двовимірне ДВП може бути реалізовано з застосуванням одновимірного ДВП спочатку уздовж строк, а потім уздовж стовпців зображення. Коли вейвлет-перетворення застосовується до зображення  $[\ ]$ , яке є двовимірним сигналом, то вхідне зображення розкладається на вейвлет-спектр цього зображення, який складається з чотирьох частин які є матрицями вейвлет-коефіцієнтів, як це показано на рис 1.12.

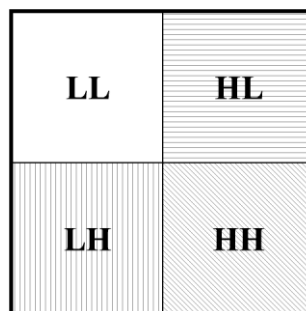


Рис. 1.12. Вейвлет-спектр зображення отриманий за допомогою ДВП

LL матриця містить коефіцієнти апроксимації і називається НЧ частиною вейвлет-спектра. ВЧ частина вейвлет-спектра складається з трьох матриць: HL матриця містить горизонтальні компоненти коефіцієнтів деталізації, LH матриця



– вертикальні, а НН матриця – діагональні. Детально реалізацію прямого та інверсного ДВП (ІДВП) показано на рис. 1.13 та рис. 1.14, відповідно.

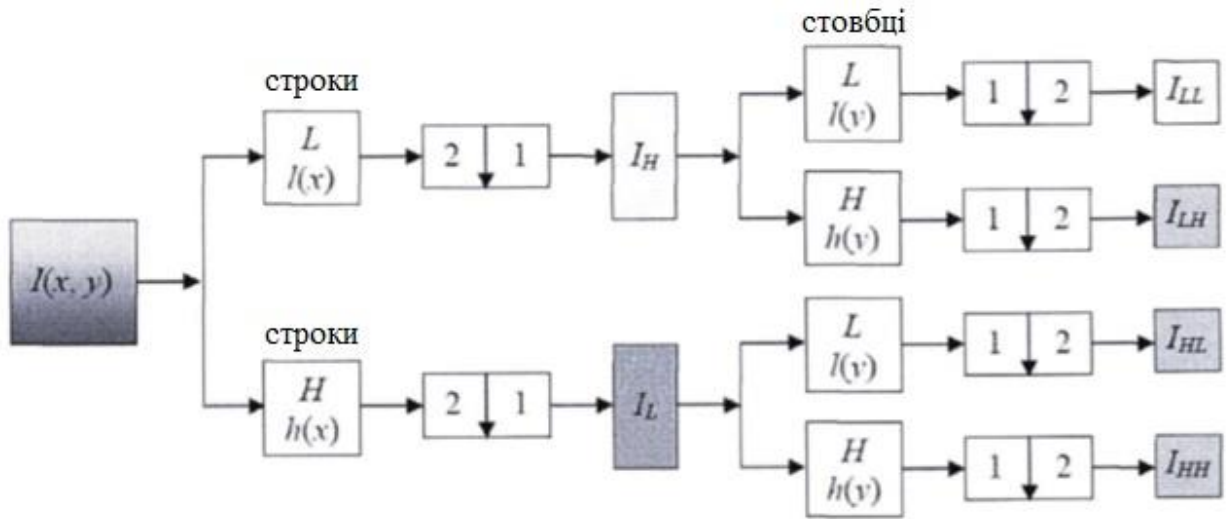


Рис. 1.13. Пряме ДВП зображення

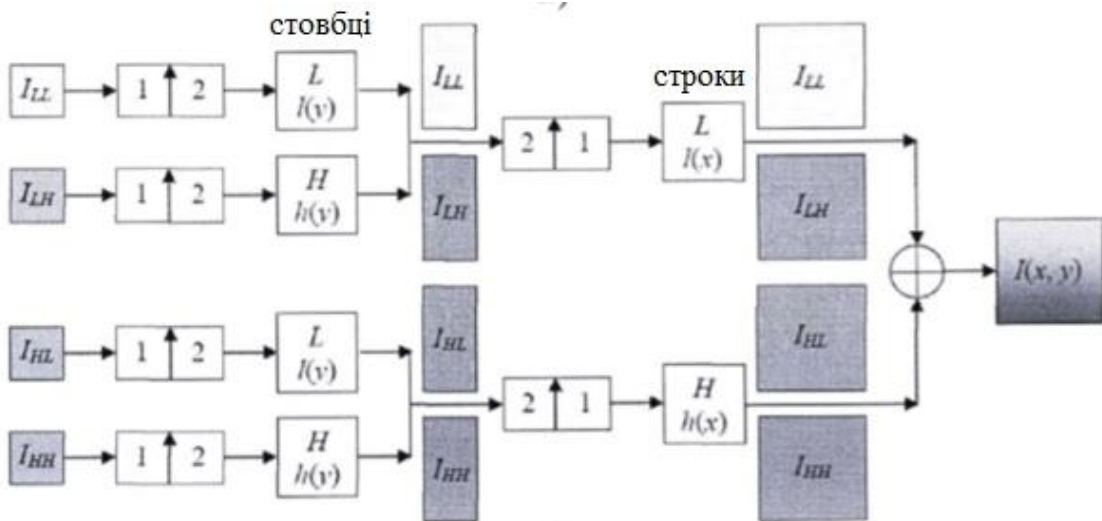


Рис. 1.14. Інверсне ДВП зображення

Циклічне застосування ДВП до НЧ частини вейвлет-спектра, тобто до LL матриці, дає кілька рівнів розкладу (рис. 1.15).

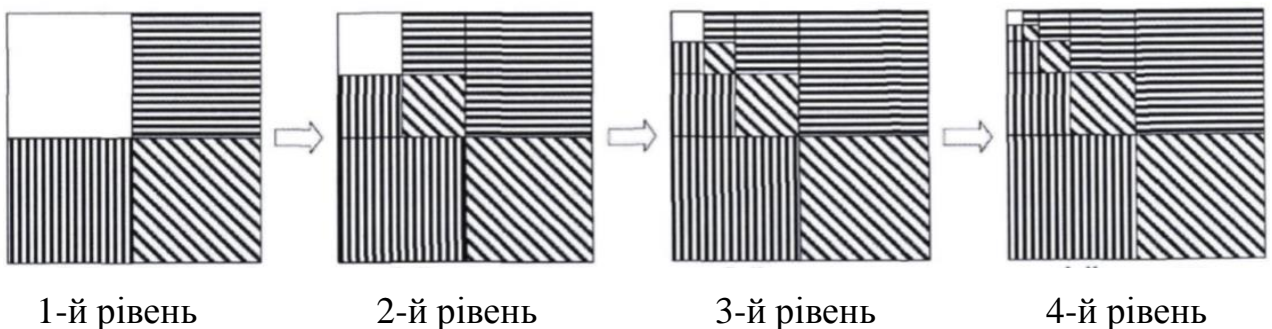


Рис. 1.15. Рівні кратномасштабного розкладу зображення за допомогою ДВП

Алгоритм комплексування зображень з використанням ДВП включає в себе наступні операції (рис. 1.16) [27, 50-52]:

1. Вхідні зображення синхронно розкладаються на кілька рівнів за допомогою ДВП з використанням вейвлета Хаара;
2. Обчислюються коефіцієнти апроксимації та деталізації результуючого вейвлет-спекру на відповідних рівнях із застосуванням певного правила об'єднання відповідних коефіцієнтів з вхідних зображень. Зазвичай для коефіцієнтів апроксимації правилом об'єднання є усереднення, а для коефіцієнтів деталізації – абсолютний максимум;
3. Відновлення результуючого зображення з сформованого вейвлет-спекру для кожного рівня розкладу за допомогою ІДВП.

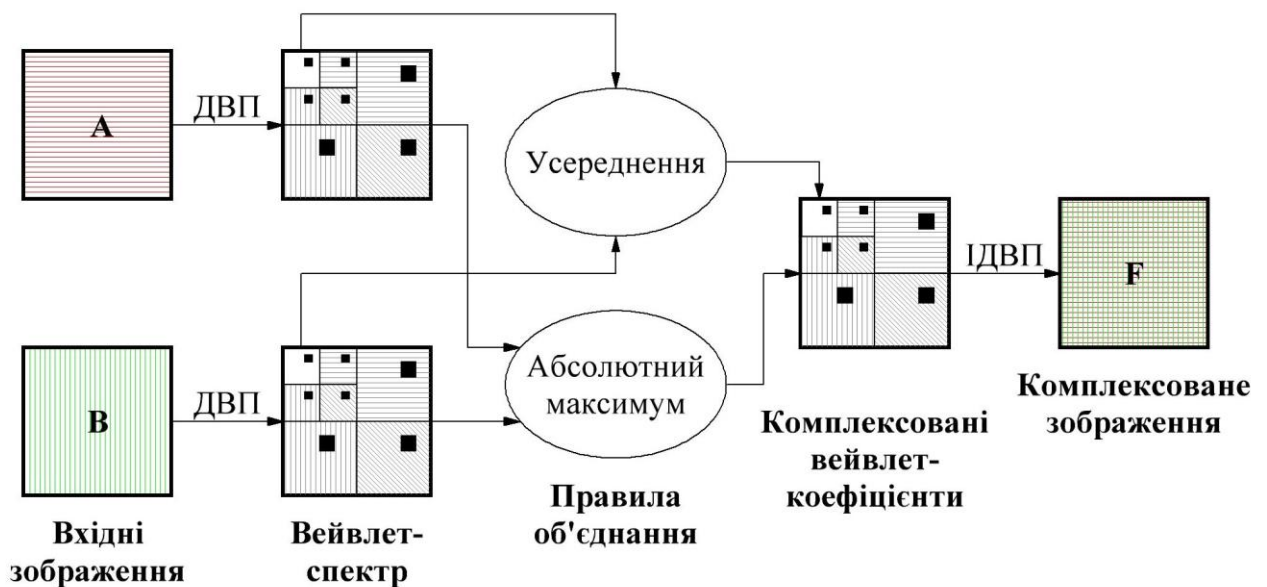


Рис. 1.16. Схема алгоритму комплексування зображень на основі ДВП

На відміну від методу на основі піраміди Лапласа, даний метод враховує взаємозв'язок окремо взятого пікселя з сусідніми, що дає змогу достовірно відобразити яскравість об'єктів сцени на результуючому зображенні після проведення комплексування.



## Висновки до розділу 1

Таким чином у першому розділі:

1. На основі аналізу літератури, присвяченої побудові та використанню систем дистанційного моніторингу об'єктів та сцен, обґрунтовано, що одним із перспективних напрямків підвищення їх ефективності, а саме підвищення інформативності, є створення мультиспектральних систем з можливістю комплексування сигналів (зображень) отриманих парціальними каналами в різних спектральних діапазонах ЕМХ.

2. Проведено аналіз парціальних спектральних каналів, які використовуються в даний час в системах моніторингу, визначено їх переваги та недоліки. Обґрунтовано, що комплексування зображень, отриманих каналами спостереження у видимого та інфрачервоного діапазонів, дасть змогу підвищити точність розділення об'єктів за рахунок об'єднання на одному мультиспектральному зображенні інформації з зображень видимого діапазону про текстуру об'єктів з високою просторовою роздільною здатністю та інформації з інфрачервоних зображень про теплові контрасти об'єктів;

3. Проведено аналіз та класифікацію існуючих методів комплексування зображень, які визначаються трьома рівнями обробки, а саме: комплексування на рівні пікселів; комплексування на рівні ознак; комплексування на рівні прийняття рішень. Проаналізовано процедури алгоритмів комплексування зображень приведеними методами, визначено їх переваги та недоліки;

4. Обґрунтовано, що для розробки ефективного методу комплексування зображень видимого та інфрачервоного діапазонів, який дасть змогу підвищити інформативність мультиспектральних систем моніторингу необхідно:

- визначити та обґрунтувати ефективний метод прив'язки різноспектральних зображень для їх точної просторової синхронізації, оскільки зображення в різних спектральних каналах формуються

сенсорами різної фізичної природи, у зв'язку з чим ці зображення мають різну роздільну здатність;

- розробити метод оцінювання інформативності зображень для визначення базового каналу (зображення) в конкретній фоно-цільовій обстановці при комплексуванні та для визначення коефіцієнта підвищення інформативності мультиспектрального зображення за рахунок комплексування порівняно із зображеннями кожного з парціальних каналів.

## РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КОМПЛЕКСУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ВИДИМОГО ТА ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНІВ

Розглянуті в п. 1.4.2 методи комплексування зображень розроблялися для вирішення різних завдань моніторингу (див. табл. 1.1) та передбачають використання різних вхідних даних (див. п. 1.4.1), тому доцільно провести їх комп'ютерне моделювання з метою порівняння і перевірки ефективності їх роботи при комплексуванні зображень реальних сцен, отриманих у видимому та тепловому діапазонах ЕМХ.

Сенсори, що працюють у видимому та тепловому діапазонах мають різну конструкцію і принцип роботи, у зв'язку з особливостями формування зображень в цих діапазонах. Тому в мультиспектральних системах моніторингу, переважно з економічних причин, використовуються сенсори, що мають не однакову просторову роздільну здатність або поле зору, а часто і те, і інше одночасно. Приклади таких систем, розроблених компанією FLIR, наведені на рис. 2.1, а їх параметри в табл. 2.1 [58].



Рис. 2.1. Мультиспектральні системи моніторингу від компанії FLIR для фіксованого відеоспостереження: а) Ranger MS-UC DefenderIR; б) Ranger THV MultiSensor; в) Ranger HDC MultiSensor

Наведені на рис. 2.1. мультиспектральні системи моніторингу мають у своєму складі два канали спостереження: видимого та теплового діапазону. Вони призначені для цілодобової охорони периметра, спостереження за морським простором та інших цілей [58].

Таблиця 2.1.

**Параметри сенсорів мультиспектральних системи моніторингу**

Сенсор		Камера видимого діапазону	Камера теплового діапазону
<b>Ranger MS-UC DefenderIR</b>			
Поле зору	широке	42°	н.д.
	вузьке	1,6°	н.д.
Тип приймача ЕМХ		Матриця на основі приладу із зарядовим зв'язком (ПЗЗ), 1/4"	Неохолоджувана мікроболометрична матриця
Роздільна здатність матриці		1280×960	640×480
<b>Ranger THV MultiSensor</b>			
Поле зору	широке	42°	18°×13,5°
	вузьке	1,6°	4,5°×3,5°
Тип приймача ЕМХ		Матриця на основі приладу із зарядовим зв'язком (ПЗЗ), 1/4"	Неохолоджувана мікроболометрична матриця
Роздільна здатність матриці		1280×960	640×480
<b>Ranger HDC MultiSensor</b>			
Поле зору	широке	23,8°	20,4°
	вузьке	0,4°	0,92°
Тип приймача ЕМХ		Матриця на основі приладу із зарядовим зв'язком (ПЗЗ), 1/2"	Неохолоджувана мікроболометрична матриця
Роздільна здатність матриці		1280×720	1280×720

Як видно з табл. 2.1. тепловізійні камери мають, або меншу роздільну здатність, або менше поле огляду ніж камери видимого діапазону. Це призводить до того, що кількість пікселів, які відповідають одному і тому ж об'єкту на сформованих різноспектральних зображеннях, буде різною. Тому перед комплексуванням потрібно виконати прив'язку цих зображень для точної їх просторової синхронізації.

## 2.1. Прив'язка різноспектральних зображень

Під прив'язкою зображень слід розуміти процес приведення до єдиної системи координат декількох зображень однієї і тієї ж сцени [53, 59], тобто іншими словами, це просторова синхронізація зображень.

В більшості робіт, що присвячені задачі комплексування різноспектральних зображень, не враховується просторова неузгодженість зображень [7, 23, 27, 29-32, 39, 40, 42], яка зумовлена конструктивними особливостями МСМ або розглядається досить абстрактно [60, 61]. Тому слід розглянути способи прив'язки зображень, оскільки без такого узгодження переходити до комплексування зображень на піксельному рівні неможливо.

Припустимо, що необхідно виконати прив'язку двох зображень  $A$  та  $B$ , що розглядаються як функції деякого (наприклад, Гільбертового) простору:

$$A: G_A \rightarrow R \text{ та } B: G_B \rightarrow R, \text{ де } G_A, G_B \subset \mathfrak{R}^d, R \subset \mathfrak{R}^p, \quad (2.1)$$

де  $G_A, G_B$  – області визначення функцій  $A$  та  $B$ , відповідно;  $R$  – область значень функції. Величина  $d$  – розмірність зображень, яка в нашому випадку рівна двом,  $p$  – розмірність вектора значень, що зберігаються у кожному пікселі зображення, наприклад, для зображень представлених градаціями сірого  $p = 1$ , а для кольорових  $RGB$  зображень  $p = 3$ .

Для суміщення заданих зображень необхідно знайти таке просторове Перетворення  $T: G_A \rightarrow G_B$ , яке дозволить перетворити одне зображення по відношенню до іншого таким чином, щоб відповідні між собою точки на обох зображеннях співпадали, приводячи їх в загальну (однакову) систему координат:

$$A(n, m) = A(T(n, m)), \text{ де } (n, m) \in G_A, T(n, m) \in G_B, \quad (2.2)$$

де  $(n, m)$  – координати пікселя в області зображення.

Критерієм точності даного просторового перетворення може бути цільова функція виду:

$$C_1(T) = \sum_{(n,m) \in G_A} (A(n, m) - B(T(n, m)))^2, \quad (2.3)$$

яка повинна приймати мінімальне значення.

Назвемо опорними точками такі точки, для яких відповідні позиції були ідентифіковані на обох зображеннях. В [62] опорними або реперними точками називаються такі точки на двох зображеннях, які є образами однієї і тієї ж ділянки сцени. Під образом на зображенні розуміється окрема область цього зображення в сукупності з інформацією, яка може бути отримана з цієї області, причому розміри і конфігурація образу можуть бути різними.

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

$$x_i^{(A)} = T(x_i^{(B)}), \text{ де } i = 1, 2, \dots, N, \quad (2.4)$$

де  $x_i^{(A)}$  і  $x_i^{(B)}$  – відповідні опорні точки на першому та другому зображеннях, а  $N$  – кількість пар опорних точок.

Похибки ототожнення опорних точок можуть бути використані для оцінювання точності даного просторового перетворення:

$$C_2(T) = \sum_{i=1}^N (x_i^{(A)} - T(x_i^{(B)}))^2. \quad (2.5)$$

Таким чином, завдання суміщення зображень зводиться до знаходження такого просторового перетворення  $T$ , яке дає мінімум цільової функції, що задається виразом (2.3) або (2.5). Також можуть використовуватися і інші критерії оцінювання точності, які визначають специфічні для конкретної задачі стратегії пошуку екстремуму цільової функції.

Важливим елементом методу суміщення є тип характерних ознак зображення, що використовуються. За цим критерієм виділяють два підходи, що істотно відрізняються: методи, засновані на площах, і методи, засновані 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 (2.3) або аналогічним. У другому випадку в якості характерних ознак можуть виступати 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'язку є знаходження відповідності між опорними точками, тобто необхідно мінімізувати цільову функцію, що задається виразом (2.5).

Методи, що базуються на площах, визнаються найбільш загальними, оскільки вони не накладають обмежень на контекст зображень. Також з їх допомогою можна отримувати найбільш точне суміщення, так як при цьому можна ефективно використовувати всю інформацію, яку містить зображення. Однак в цих методах, не проводиться розділення інваріантної інформації та інформації, що змінюється від зображення до зображення, тому їх складно застосовувати в ряді випадків. Через використання всього обсягу вихідних даних вони трудомісткі з обчислювальної точки зору, і з їх допомогою часто буває складно вести пошук глобального перетворення з великим числом параметрів.

Суміщення зображень з використанням різного роду структурних елементів є менш трудомістким з обчислювальної точки зору, оскільки розмірність вхідних даних в цьому підході сильно знижена. Оскільки структурні елементи не використовують безпосередньо значення інтенсивностей пікселів, вони набагато більш стійкі 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).

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 [59]. 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 взаємної інформації [59, 63-65]. Він є інваріантним до просторового розподілу яскравості і дає змогу виконати прив'язку зображень значно точніше. Взаємна інформація  $MI(\cdot)$ , як показано в [59], обчислюється з використанням ентропії  $E$  зображення:

$$MI(A, B) = E(A) + E(B) - E(A, B), \quad (2.6)$$

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

Відособлену ентропію, наприклад, для цифрового напівтонового зображення  $A$  з 256-ма градаціями яскравості пікселів можна обчислити по Шенону [59, 67, 68]:

$$E(A) = - \sum_{i=0}^{255} P(i) \log_2 P(i), \quad (2.7)$$

де  $P_A(i) = H_A(i)/N_A$  – імовірність появи пікселя з інтенсивністю  $i = 0, 1, \dots, 255$  (для восьмибітного зображення);  $H_A(i)$  – вектор значень гістограми зображення  $A$ ;  $N_A$  – кількість пікселів у зображенні  $A$ .

Спільна ентропія для цифрових напівтонових зображень  $A$  та  $B$  з 256-ма градаціями яскравості пікселів, обчислюється за формулою:



$$E(A, B) = - \sum_{i_A=0}^{255} \sum_{i_B=0}^{255} P(i_A, i_B) \log_2 P(i_A, i_B), \quad (2.8)$$

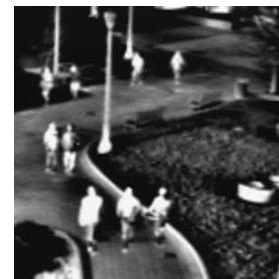
де  $P(i_A, i_B)$  – спільна імовірність появи пікселів з інтенсивністю  $i_A$  та  $i_B$ .

Величина взаємної інформації  $MI(\cdot)$  є інваріантною до довільних глобальних (не залежних від координат) перетворень яскравості зображень, а не тільки до лінійних перетворень, як це має місце у випадку кореляції, що робить цю міру подібності образів істотно більш універсальною.

Виконаємо суміщення двох зображень:  $A$  – сформоване сенсором видимого діапазону (рис. 2.2, А), і  $B$  – сформоване сенсором ІЧ діапазону (рис. 2.2, В).



А)



В)

Рис. 2.2. Вхідні зображень А та В

Виконавши пошук опорної точки в залежності від зміщення одного зображення по відношенню до іншого за допомогою виразу (2.6), отримаємо розподіл або функцію взаємної інформації  $MI(A(n, m), B(x - n, y - m))$  між заданими зображеннями (рис. 2.3) в залежності від координат зміщення  $(x, y)$ .

Положення максимуму функції взаємної інформації на рис. 2.3 визначає оптимальне зміщення між еталоном (фіксованим фрагментом першого зображення –  $A$ ) і образом (фрагментом другого зображення –  $B$ ), що дає пару опорних точок для суміщення.

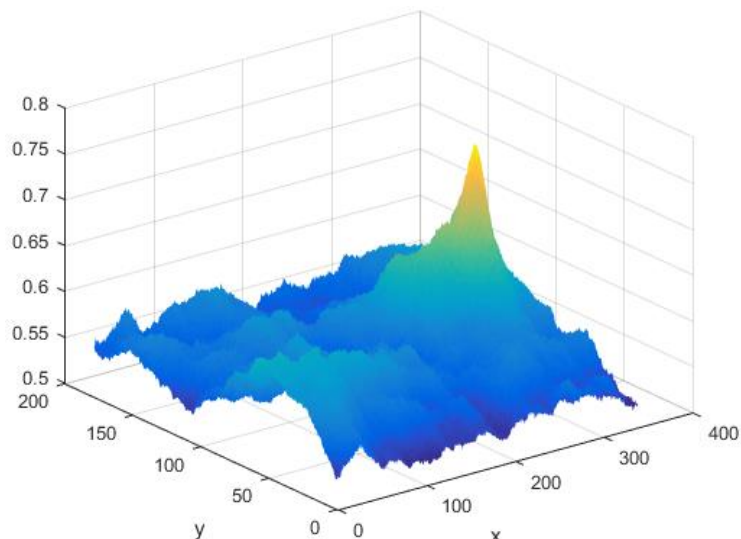


Рис. 2.3. Функція взаємної інформації для зображень *A* та *B*

Маючи координати кількох опорних точок можна знайти значення зсуву між елементами зображень та виконати суміщення зображень результат якого показаний на рис. 2.4.



Рис. 2.4. Результат суміщення телевізійного та тепловізійного зображень

Проведемо моделювання, припускаючи, що суміщення проводиться в погіршених погодних умовах – при наявності туману, або при дії димової завіси. Результат суміщення, при даних умовах, показано на рис. 2.5.



Рис. 2.5. Результат суміщення зображень *A* та *B* при погіршеній видимості в видимому діапазоні

Отриманий результат (рис. 2.5) свідчить, що використання функції взаємної інформації, дає змогу суміщення мультиспектральних зображень, які сформовані сенсорами РФП, навіть при погіршенні видимості у одному з каналів.

## 2.2. Оцінювання інформативності зображень

Більшість серед розглянутих в п. 1.4.2 методів комплексування реалізуються по схожому алгоритму, який передбачає вибір базового зображення, з поміж вхідних, і його доповнення елементами іншого зображення. Критерії вибору базового зображення є різними для різних методів. В загальному випадку, як базове зображення повинно бути вибрано найбільш інформативне. Наприклад, в методі вагової функції (див. п. 1.4.2.2) базове зображення вибирається по критерію максимального середнього значення яскравості, а в методі на основі оцінювання інформативності (див. п. 1.4.2.11), по критерію найбільшого СКВ. Для таких методів як степеневе перетворення (п. 1.4.2.4), метод маски (п. 1.4.2.6), підсилення відмінностей (п. 1.4.2.7), метод пріоритету (п. 1.4.2.10), метод локального синтезу (п. 1.4.2.12) і метод на основі 3D ФНЧ (п. 1.4.2.13) критерій вибору базового зображення взагалі математично не визначений. Згадані вище критерії, а саме, максимум середньої яскравості та

величина СКВ якості з точки зору людського сприйняття досить слабо корелюють з інформативністю зображень. Тому необхідно визначити такий критерій вибору базового зображення, який буде базуватися на достовірній кількісній оцінці інформативності вхідних зображень.

В даний час найбільш достовірним методом оцінювання інформативності зображень невідомого сюжетного змісту, вважається метод експертних оцінок [66]. Однак недоліками цього методу є: трудомісткість, значні матеріальні витрати і неможливість використання результатів оцінювання для корекції цифрової обробки в реальному масштабі часу. Тому для вирішення задач цифрової обробки зображень не припиняються дослідження по розробці методів автономного кількісного та об'єктивного оцінювання параметри зображень, зокрема їх інформативності [67-72].

Традиційним підходом до оцінки інформативності  $I$  зображення  $A$  є обчислення його ентропії  $E(A)$  по Шенону за допомогою (2.7):

$$I_E = E(A), \quad (2.9)$$

де  $I_E$  – інформативність зображення  $A$ , що еквівалентна ентропії.

Для ідеального зображення, тобто без шумів та спотворень, ентропія дозволяє досить об'єктивно оцінювати інформативність, проте для реальних зображень подібна еквівалентність ентропії та інформативності може бути позбавлена сенсу [67], так як не враховуються просторова зміна якості елементів зображення і особливості її зорового сприйняття.

Часто в літературі [67, 69], 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) [70] та індекс структурної подібності (SSIM – Structure SIMilarity) [71] орієнтовані на знаходження схожості обробленого, тим чи іншим способом, зображення з еталонним і ефективно працюють в основному для оцінки алгоритмів кодування зображень. Показники UIQI та SSIM дозволяють оцінити якість зображення значно краще, ніж широко вживані середньоквадратична похибка та відношення сигнал/шум (ВСШ). Однак для оцінки алгоритмів підвищення інформативності

зображень, орієнтованих на покращення їх психофізичного сприйняття людиною, показники дають неоднозначні результати. Крім того, при оцінці комплексованого зображення, для якого не існує еталону, застосування даних метрик нічим не обґрунтовано.

Отже, хоча в літературі поняття «інформативність» та «якість» зображення часто використовують поряд (як синоніми), насправді вони не тотожні: зображення може бути якісним без шумів і спотворень (наприклад, артефактів), але при цьому бути неінформативним [67]. 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 [69].

В роботі [69] для оцінювання інформативності зображень пропонується мультикритеріальний показник, назовемо його ISI (від англ. *Integral Score of Informativeness*), що враховує наступні параметри зображення:

- $K$  – контраст;
- $E$  – інформаційну ентропію зображення;
- $L$  – середнє значення яскравості;
- $\sigma$  – СКВ яскравості від середнього значення;
- $H$  – кількість градацій яскравості.

Оскільки задача інтегрального оцінювання має мультикритеріальний характер, то в [69] вводиться узагальнений критерій інформативності  $I_{ISI}$ , що має вигляд:

$$I_{ISI} = \sum_{i=1}^N \omega_i C_i, \quad (2.10)$$

де  $\omega_i$  – ваговий коефіцієнт;  $C_i$  – частковий показник;  $N$  – кількість часткових показників.

Вагові коефіцієнти визначаються по критерію Фішберна [69]:

$$\omega_i = \frac{2(N - i + 1)}{N(N + 1)}, \quad i = \overline{1, N} \quad (2.11)$$

З (2.11) видно, що вагові коефіцієнти визначені таким чином, є різними для всіх  $N$  параметрів, причому  $\omega_i$  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 [69] автори, ґрунтуючись на експериментальному дослідженні зображень з різною семантикою та різною суб'єктивною якістю, пропонують розставити параметри в наступному порядку:  $L, \sigma, K, H, E$ .

З врахуванням викладеного, інтегральний показник інформативності має вигляд:

$$I_{ISI} = \omega_1 L_n + \omega_2 \sigma_n + \omega_3 K_n + \omega_4 H_n + \omega_5 E_n, \quad (2.12)$$

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

Ще один метод оцінювання інформативності зображень запропонований в [72], назовемо його NMI (від англ. *No-reference Metric of image Informativeness estimation*). Він полягає в оцінці відносного рівня корисного сигналу  $I_U$  зображення шляхом розрахунку різниці між максимумом та мінімумом середнього значення модуля градієнта яскравості зображення в рухомому вікні розміром  $5 \times 5$  пікселів. Наступним кроком є розрахунок суми модулів градієнтів яскравості зображень  $I_S$  зі значеннями вище адаптивного порогу, який розділяє



шуми та перепади яскравості між пікселями, які відносяться до сигналу. А інформативність зображення визначається як добуток відносного рівня корисного сигналу  $I_U$  на інтегральний показник  $I_S$ , який характеризує міру наповнення зображення деталями, що несуть інформацію [72]:

$$I_{NMI} = I_U \times I_S, \quad (2.13)$$

На основі експериментального дослідження запропонованих в [68, 69] та в [72], різних метрик оцінювання інформативності зображень було встановлено, що вони дають неоднозначні результати, зокрема дають завищену оцінку при низькій інформативності зображення, що погано корелює з експертною оцінкою. Тому пропонується внести зміни до описаної в [69] метрики для її вдосконалення та покращення її адекватності в оцінці інформативності зображень невідомого сюжетного змісту.

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

$$G_x = \frac{\partial A}{\partial x} i, \quad G_y = \frac{\partial A}{\partial y} j, \quad (2.14)$$

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2},$$

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

На відміну від відомого підходу [72], нормований коефіцієнт градієнта зображення  $G_n$  визначається відношенням кількості пікселів, усереднений градієнт яких перевищує адаптивних поріг, до загальної кількості пікселів у зображенні.

По-друге, в [69] під час оцінювання кількості градацій яскравості  $H$ , якими представлено зображення, враховуються абсолютно всі градації, незалежно від числа пікселів  $M(i)$ , що формують конкретну градацію з яскравістю  $i$ :

$$H = \begin{cases} H, & M(i) = 0 \\ H + 1, & M(i) > 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

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 кількість тільки значущих градацій, пропонується обмежити їх значення (кількість пікселів у зображенні, що належать конкретній градації) певним порогом  $k$ :

$$H = \begin{cases} H, & M(i) \leq k \\ H + 1, & M(i) > k \end{cases} \quad (2.16)$$

Таким чином враховуються тільки ті градації, значення яких перевищують заданий поріг  $k$ . Експериментальним шляхом визначено, що поріг доцільно вибирати на рівні 1-5% від значення найбільш значущої градації  $M_{max}$ .

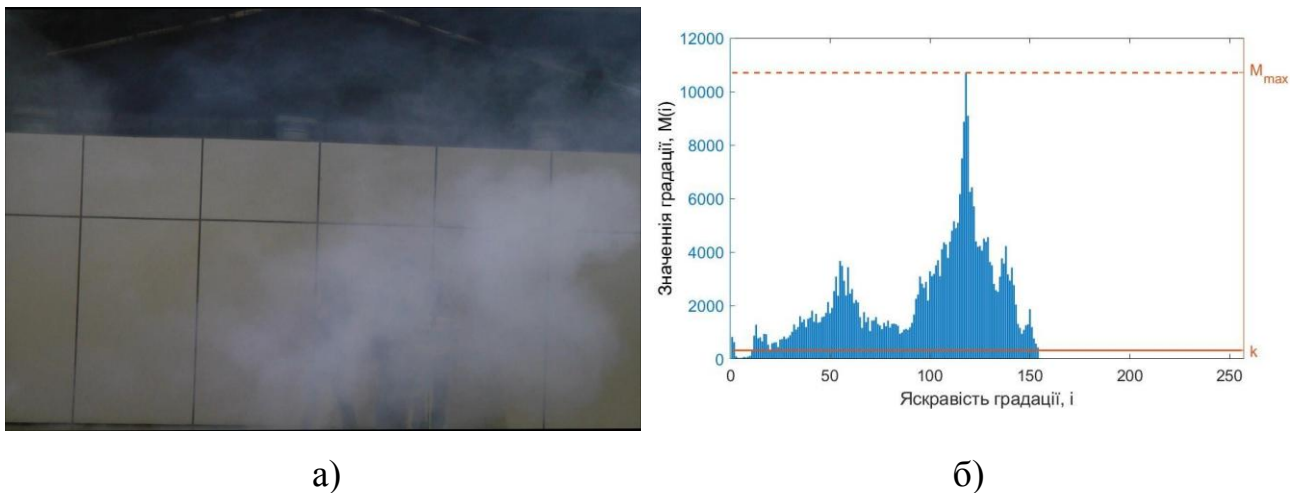


Рис. 2.6. Приклад визначення кількості значущих градацій яскравості: а) зображення отримане у видимому діапазоні; б) гістограма зображення а) з відміченим порогом  $k = 3\%M_{max}$ , який обмежує значення градацій яскравості

З рис. 2.6 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 при  $k = 3\%M_{max}$ , буде невраховано тільки 0,173% пікселів від їх загальної кількості у зображенні, а нормований коефіцієнт кількості градацій яскравості зміниться з  $H_n = 0,605$  до  $H_n = 0,570$ .

По-третє, під час оцінювання контрасту пропонується розбити зображення на 64 прямокутних області однакового розміру та оцінити їх контраст. Тоді



загальний адаптивний контраст зображення буде дорівнювати середньому значенню контрастів в локальних областях. Такий спосіб оцінювання дозволяє більш точно оцінити контраст зображення, оскільки тепер для отримання високого коефіцієнта контрасту практично все зображення повинно мати високий контраст, а не якась одна його область, як це було в оригінальному методі запропонованому в [69].

З врахуванням внесених змін та обчислених по (2.11) коефіцієнтів значущості, інтегральний показник інформативності приймає вигляд:

$$I_p = 0,33 \times G_n + 0,27 \times L_n + 0,20 \times \sigma_n + 0,13 \times H_n + 0,07 \times K_n. \quad (2.17)$$

Запропонований удосконалений підхід, блок-схема алгоритму якого зображена на рис. 2.7, дає змогу кількісно оцінити інформативність зображення невідомого сюжетного змісту. Причому дану метрику можна використовувати як для оцінювання інформативності вхідних зображень перед комплексуванням з метою вибору базового зображення, так і для оцінювання інформативності результуючого зображення після комплексування.

Для перевірки адекватності роботи запропонованого удосконаленого методу та об'єктивності отриманих з його допомогою оцінок інформативності, проведемо оцінювання групи тестових зображень відомими методами та запропонованим. Для цього вибрано зображення високої якості (рис. 2.8, F) на основі якого сформовано 10 тестових зображень з наступними типами спотворень:

- А – зі зниженою роздільною здатністю в 2 рази (рис. 2.8, А);
- В – з завадою (зниження контрастності), інтенсивність якої росте з центру до країв (рис. 2.8, В);
- С – з обмеженим діапазоном значень пікселів [0, 127] (рис. 2.8, С);
- D – з завадою (зниження контрастності), інтенсивність якої росте від країв до центру (рис. 2.8, D);
- Е – з обмеженим діапазоном значень пікселів [128, 255] (рис. 2.8, Е);
- F – оригінальне тестове зображення (рис. 2.8, F);

- G – розмите шляхом згортки оригінального зображення з Гаусовим ядром, параметри якого  $w = 15$ ,  $\sigma = 3$  (рис. 2.8, G);
- H – зашумлене імпульсним шумом (ВСШ = 20) і відновлене (рис. 2.8, H);
- I – зашумлене білим шумом (ВСШ = 15) і відновлене (рис. 2.8, I);
- J – зашумлене білим шумом (ВСШ = 15) та розмите згорткою з Гаусовим ядром ( $w = 15$ ,  $\sigma = 3$ ) (рис. 2.8, J).

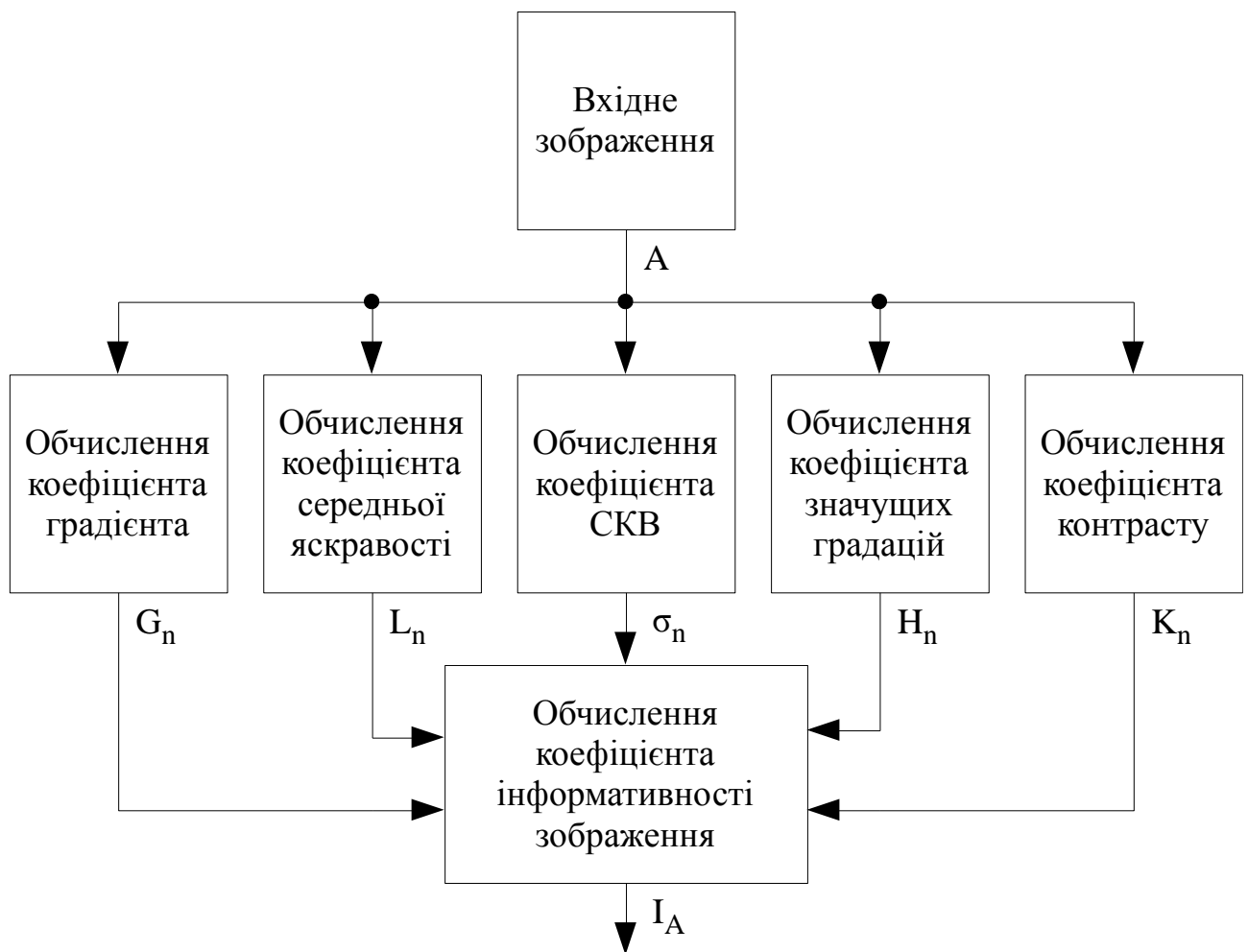


Рис. 2.7. Блок-схема запропонованого удосконаленого алгоритму кількісного оцінювання інформативності зображень



Рис. 2.8. Набір тестових зображень



В результаті експерименту проведено оцінювання інформативності десяти тестових зображень (рис. 2.8) наступними методами:

- $I_H$  – усереднена експертна оцінка групи з 30 респондентів;
- $I_P$  – запропонованим методом;
- $I_{NMI}$  – NMI метод [72];
- $I_{ISI}$  – ISI метод [69];
- $I_E$  – Entropy [68].

Результати оцінювання інформативності представлені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

### Інформативність тестових зображень

Зображення \ Метод	$I_H$	$I_P$	$I_{NMI}$	$I_{ISI}$	$I_E$
A	0,757	0,854	0,991	0,975	0,944
B	0,265	0,248	0,428	0,595	0,512
C	0,454	0,503	0,944	0,629	0,827
D	0,348	0,638	0,966	0,822	0,917
E	0,646	0,487	0,942	0,408	0,825
F	0,961	0,864	0,973	0,989	0,952
G	0,473	0,583	0,953	0,938	0,923
H	0,674	0,763	0,989	0,953	0,930
I	0,584	0,678	0,746	0,928	0,916
J	0,338	0,521	0,974	0,882	0,894

Для кращої наочності представимо отримані в ході експерименту результати у вигляді гістограм, що зображені на рис. 2.9.

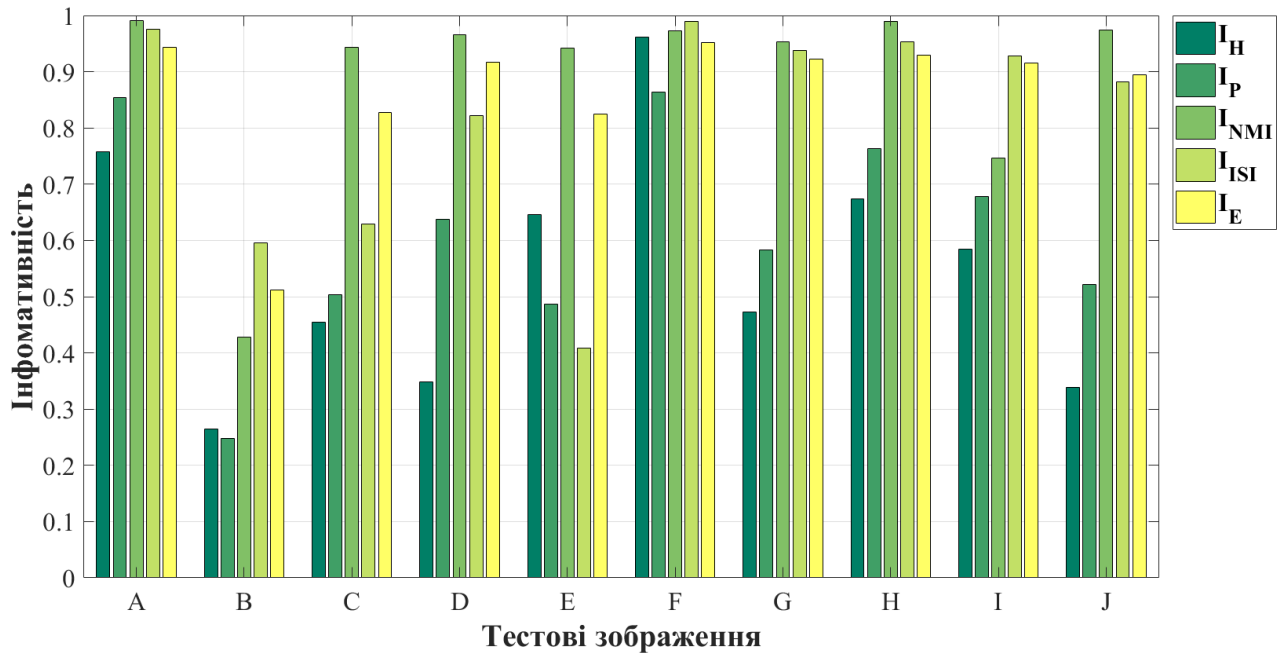


Рис. 2.9. Результати оцінювання інформативності десяти тестових зображень різними методами

Для порівняння отриманих різними методами оцінок інформативності розрахуємо коефіцієнт кореляції (CC) та середньоквадратичну похибку (RMSE) між результатами оцінювання інформативності вищезгаданими методами і експертною оцінкою (табл. 2.3).

Таблиця 2.3

#### Порівняння отриманих оцінок з експертною

Метод	CC	RMSE
Ентропія	0,552	1,249
ISI	0,367	1,209
NMI	0,452	1,365
Запропонований	0,801	0,883

Ґрунтуючись на отриманих результатах, наведених в табл. 2.2 та на рис. 2.9, та їх порівняння (табл. 2.3), можна зробити висновок, що запропонований вдосконалений метод оцінювання інформативності зображень на основі їх мультикритеріального аналізу, дозволяє одержати об'єктивну кількісну оцінку

інформативності. Причому з поміж розглянутих методів, запропонований дає найбільш узгоджену з експертною оцінку інформативності з коефіцієнт кореляції – 0,801, тоді як відомі методи менше корелюють з експертною оцінкою: Ентропія – 0,552; NMI – 0,452; ISI – 0,367. Це дає право судити про те, що запропонований метод дає найкращі результати і його доцільно використовувати для оцінювання інформативності зображень невідомого сюжетного змісту, та як складову частину методів комплексування зображень при виборі базового каналу (зображення).

### **2.3. Методи оцінювання ефективності комплексування зображень**

Підчас комплексування різноспектральних зображень відбувається синтез нового зображення, яке в певному сенсі є спотвореним відносно вхідних зображень, тому під час оцінювання ефективності комплексування використовувати такі широко вживані метрики оцінювання методів обробки зображень, як СКВ, ВСШ, UIQI [70] чи SSIM [71] неможна, оскільки вони потребують наявності еталонного (референтного) зображення, яке в даному випадку (при комплексуванні) є недоступним. Тому для оцінювання ефективності комплексування потрібно використовувати безеталонні метрики. В [73] автори провели детальний аналіз дванадцяти таких метрик і рекомендують використовувати при мультимодальному комплексуванні метрику запроповану Ксайдісом і Петровічем (*C. S. Xydeas, V. Petrović*) [74], яка ґрунтується на ефективності перенесення градієнта з вхідних зображень на комплексоване та метрику запроповану Цвеїчем, Лозою та іншими (*Nedeljko Cvejić, Artur Łoza, David Bull, Nishan Canagarajah*) [75], яка ґрунтується на блочному порівнянні вхідних зображень з комплексованим на основі UIQI для оцінювання на скільки добре інформація переноситься на комплексоване зображення.

### 2.3.1. Метрика оцінювання ефективності комплексування на основі градієнта

Метрика [74] реалізується по наступному алгоритму:

1. До вхідних зображень  $A(n, m)$  і  $B(n, m)$  застосовується оператор Собела [76] для знаходження градієнта  $g_A(n, m)$  та його напрямку  $d_A(n, m)$ :

$$g_A(n, m) = \sqrt{g_A^{(x)}(n, m)^2 + g_A^{(y)}(n, m)^2}, \quad (2.17)$$

$$d_A(n, m) = \tan^{-1} \left( \frac{g_A^{(x)}(n, m)}{g_A^{(y)}(n, m)} \right), \quad (2.18)$$

де  $g_A^{(x)}(n, m)$  і  $g_A^{(y)}(n, m)$  – результат згортки зображення  $A(n, m)$  з горизонтальним та вертикальним ядром оператора Собела [76].

2. Визначається відносний градієнт  $G^{AF}(n, m)$  та його напрямок  $D^{AF}(n, m)$  між вхідним зображенням  $A(n, m)$  і комплексованим  $F(n, m)$ :

$$G^{AF}(n, m) = \begin{cases} \frac{g_F(n, m)}{g_A(n, m)}, & g_A(n, m) > g_F(n, m) \\ \frac{g_A(n, m)}{g_F(n, m)}, & g_A(n, m) \leq g_F(n, m) \end{cases}. \quad (2.19)$$

$$D^{AF}(n, m) = 1 - \frac{|d_A(n, m) - d_F(n, m)|}{\pi/2}. \quad (2.20)$$

3. Визначається величина збереження градієнта та його напрямку:

$$Q_g^{AF}(n, m) = \frac{\Gamma_g}{1 + e^{\kappa_g(G^{AF}(n, m) - \sigma_g)}}, \quad (2.21)$$

$$Q_d^{AF}(n, m) = \frac{\Gamma_d}{1 + e^{\kappa_d(G^{AF}(n, m) - \sigma_d)}}, \quad (2.22)$$

де константи  $\Gamma_g$ ,  $\kappa_g$ ,  $\sigma_g$  та  $\Gamma_d$ ,  $\kappa_d$ ,  $\sigma_d$  визначають форму сигмоїдних функцій [77], що використовуються для визначення величини збереження градієнту та його напрямку.

Примітка. Сигмоїда – це неперервно диференційована монотонна нелінійна S-подібна функція, яка застосовується для «згладжування» значень деякої величини [77].

4. Визначається величина збереження інформації про градієнт:

$$Q^{AF}(n, m) = Q_g^{AF}(n, m) \times Q_d^{AF}(n, m). \quad (2.23)$$

5. Остаточна оцінка отримується з середньозваженої величини збереження інформації про градієнт

$$Q_G = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M [Q_g^{AF}(n, m) \omega^A(n, m) + Q_g^{AF}(n, m) \omega^B(n, m)]}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M [\omega^A(n, m) + \omega^B(n, m)]}, \quad (2.24)$$

де коефіцієнти зважування визначаються як:  $\omega^A(n, m) = [g_A(n, m)]^L$  та  $\omega^B(n, m) = [g_B(n, m)]^L$ , відповідно. Тут  $L$  є константою.

В [74] автори пропонують використовувати наступні значення використаних констант:  $L = 1,5$ ;  $\Gamma_g = 0,9994$ ;  $\kappa_g = 15$ ;  $\sigma_g = 0,5$ ;  $\Gamma_d = 0,9879$ ;  $\kappa_d = 22$ ;  $\sigma_d = 0,8$ .

Отримана оцінка  $Q_G$  може змінюватися в діапазоні  $[0; 1]$  і характеризує наскільки ефективно метод комплексування дозволяє перенести градієнт, тобто інформацію про границі об'єктів, з вхідних зображень на комплексоване, причому чим оцінка  $Q_G$  більша, тим ефективність методу вища.

### 2.3.2. Метрика оцінювання ефективності комплексування на основі блочного порівняння зображень

Метрика [75] реалізується по наступному алгоритму:

1. Зображення розбиваються на прямокутні блоки розміром  $w \times w$  пікселів.

2. Для всіх блоків зображення виконується розрахунок UIQI [70]:

$$Q_{AF}(n, m|w) = \frac{\sigma_{AF}}{\sigma_A \sigma_F} \times \frac{2\mu_A \mu_F}{\mu_A^2 + \mu_F^2} \times \frac{2\sigma_A \sigma_F}{\sigma_A^2 + \sigma_F^2} = \frac{4\sigma_{AF} \mu_A \mu_F}{(\mu_A^2 + \mu_F^2)(\sigma_A^2 + \sigma_F^2)}, \quad (2.25)$$

$$Q_{BF}(n, m|w) = \frac{\sigma_{BF}}{\sigma_B \sigma_F} \times \frac{2\mu_B \mu_F}{\mu_B^2 + \mu_F^2} \times \frac{2\sigma_B \sigma_F}{\sigma_B^2 + \sigma_F^2} = \frac{4\sigma_{BF} \mu_B \mu_F}{(\mu_B^2 + \mu_F^2)(\sigma_B^2 + \sigma_F^2)},$$

де  $\mu_A$ ,  $\mu_B$ ,  $\mu_F$  – середнє значення елементів в блоках з зображень  $A$ ,  $B$  та  $F$ , відповідно;  $\sigma_A$ ,  $\sigma_B$ ,  $\sigma_F$  – СКВ елементів в блоках з відповідних зображень;  $\sigma_{AF}$ ,  $\sigma_{BF}$  – коваріація між елементами блоків з зображень  $A$ ,  $F$  та  $B$ ,  $F$ , відповідно.

3. Виконується розрахунок вагових коефіцієнтів:



$$s(n, m|w) = \begin{cases} 0, & \frac{\sigma_{AF}}{\sigma_{AF} + \sigma_{BF}} < 0; \\ \frac{\sigma_{AF}}{\sigma_{AF} + \sigma_{BF}}, & 0 \leq \frac{\sigma_{AF}}{\sigma_{AF} + \sigma_{BF}} \leq 1; \\ 1, & \frac{\sigma_{AF}}{\sigma_{AF} + \sigma_{BF}} > 1. \end{cases} \quad (2.26)$$

Вагові коефіцієнти, визначені таким чином, будуть залежати від схожості в просторовій області між вхідними зображеннями та комплексованим. Чим вище подібність між вхідним та комплексованим зображенням, тим більший відповідний ваговий коефіцієнт.

4. Остаточна оцінка визначається як:

$$Q_C = \frac{1}{W} \sum_{w \in W} s(n, m|w) Q_{AF}(n, m|w) + (1 - s(n, m|w)) Q_{BF}(n, m|w), \quad (2.27)$$

де  $W$  – це множина всіх блоків на які розбити зображення.

Отримана оцінка  $Q_C$  може змінюватися в діапазоні  $[-1; 1]$  і характеризує наскільки ефективно ділянки з подібним характером розподілу значень перенесені з вхідних зображень на комплексоване, причому чим оцінка  $Q_C$  більша, тим ефективність методу вища.

#### 2.4. Моделювання процесу комплексування зображень

З метою визначення найбільш ефективного методу комплексування зображень видимого та інфрачервоного діапазонів, з поміж проаналізованих в п. 1.4.2 методів, було реалізовано їх математичні моделі в пакеті MATLAB R2015a. Дослідження проводилось на наборі тестових зображень, що складається з десяти пар просторово синхронізованих зображень, отриманих у видимому та тепловому діапазонах ЕМХ, які наведені у Додатку 1.

Комплексовані зображення отримуються шляхом почергового застосування до кожної тестової пари моделей п'ятнадцяти розглянутих раніше методів комплексування. В результаті отримується 150 комплексованих зображень, по 15 на кожну вхідну тестову пару.

Для визначення найбільш ефективного методу комплексування зображень видимого та інфрачервоного діапазонів, на базі отриманих результатів комплексування виконується оцінка ефективності методів за допомогою удосконаленого методу оцінювання інформативності зображень (див. п. 2.2) та розглянутих в п. 2.3.1 та п. 2.3.2 метрик. Результати оцінювання наведені в табл. 2.4, табл. 2.5 та табл. 2.6, відповідно.

Таблиця 2.4

### Оцінка інформативності $I_P$ комплексованих зображень

№ метода	№ тестової пари вхідних зображень										$I_P'$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0,48	0,61	0,60	0,60	0,59	0,34	0,55	0,59	0,58	0,54	0,548
2	0,37	0,60	0,41	0,61	0,49	0,32	0,50	0,54	0,58	0,54	0,496
3	0,51	0,66	0,58	0,60	0,57	0,52	0,63	0,54	0,55	0,66	<b>0,581</b>
4	0,64	0,46	0,57	0,18	0,25	0,43	0,15	0,44	0,43	0,47	0,402
5	0,49	0,62	0,65	0,61	0,60	0,35	0,52	0,60	0,59	0,56	0,559
6	0,59	0,56	0,55	0,61	0,58	0,39	0,59	0,52	0,48	0,59	0,546
7	0,58	0,57	0,57	0,57	0,56	0,48	0,65	0,68	0,59	0,57	<b>0,580</b>
8	0,48	0,61	0,55	0,54	0,48	0,33	0,60	0,53	0,60	0,52	0,525
9	0,55	0,68	0,57	0,67	0,59	0,52	0,59	0,59	0,58	0,55	<b>0,590</b>
10	0,48	0,68	0,62	0,57	0,58	0,34	0,59	0,60	0,61	0,51	0,557
11	0,45	0,61	0,53	0,62	0,50	0,43	0,50	0,52	0,58	0,54	0,528
12	0,39	0,61	0,42	0,56	0,59	0,38	0,53	0,61	0,56	0,53	0,520
13	0,38	0,69	0,45	0,69	0,50	0,30	0,52	0,54	0,58	0,55	0,520
14	0,58	0,67	0,65	0,59	0,52	0,39	0,54	0,62	0,58	0,50	<b>0,563</b>
15	0,58	0,65	0,64	0,57	0,54	0,39	0,54	0,66	0,58	0,52	<b>0,568</b>

З результатів табл. 2.4 видно, що найбільш інформативні комплексовані зображення дозволяють синтезувати методи: №9 – PCA, №3 – максимум

яскравості, №7 – підсилення відмінностей, №15 – комплексування на основі ДВП та №14 – комплексування на основі піраміди Лапласа.

Таблиця 2.5

Оцінка ефективності комплексування зображень  $Q_G$ 

№ метода	№ тестової пари вхідних зображень										$Q_G'$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0,78	0,83	0,93	0,75	0,92	0,67	0,89	0,70	0,80	0,78	0,803
2	0,52	0,82	0,83	0,62	0,62	0,66	0,55	0,49	0,77	0,77	0,666
3	0,70	0,84	0,66	0,68	0,67	0,77	0,70	0,75	0,83	0,79	0,738
4	0,75	0,46	0,60	0,18	0,09	0,67	0,08	0,36	0,57	0,50	0,427
5	0,59	0,72	0,81	0,66	0,85	0,50	0,68	0,54	0,52	0,62	0,649
6	0,70	0,68	0,44	0,54	0,92	0,67	0,89	0,82	0,92	0,77	0,735
7	0,79	0,63	0,52	0,37	0,89	0,60	0,87	0,84	0,94	0,65	0,709
8	0,40	0,64	0,67	0,44	0,51	0,41	0,49	0,41	0,44	0,50	0,492
9	0,69	0,72	0,43	0,82	0,92	0,59	0,90	0,82	0,82	0,55	0,726
10	0,82	0,87	0,86	0,70	0,92	0,67	0,90	0,78	0,92	0,80	<b>0,824</b>
11	0,73	0,56	0,94	0,43	0,24	0,58	0,28	0,39	0,17	0,76	0,507
12	0,73	0,64	0,53	0,57	0,76	0,53	0,62	0,67	0,78	0,61	0,644
13	0,54	0,65	0,86	0,75	0,78	0,47	0,59	0,50	0,44	0,63	0,622
14	0,89	0,88	0,93	0,83	0,91	0,88	0,92	0,83	0,95	0,84	<b>0,887</b>
15	0,80	0,85	0,88	0,78	0,88	0,81	0,88	0,82	0,94	0,81	<b>0,845</b>

З результатів табл. 2.5 видно, що найбільш ефективними методами комплексування, по метриці  $Q_G$ , є методи: №14 – комплексування на основі піраміди Лапласа, №15 – комплексування на основі ДВП та №10 – комплексування з пріоритетом.

Таблиця 2.6

Оцінка ефективності комплексування зображень  $Q_c$ 

№ метода	№ тестової пари вхідних зображень										$Q_c'$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0,56	0,68	0,73	0,71	0,73	0,62	0,82	0,66	0,76	0,71	0,698
2	0,47	0,67	0,65	0,68	0,68	0,58	0,67	0,62	0,76	0,74	0,651
3	0,86	0,91	0,80	0,77	0,69	0,92	0,78	0,90	0,77	0,87	<b>0,825</b>
4	0,12	-0,02	0,03	-0,13	-0,09	0,57	-0,04	-0,21	0,43	0,17	0,082
5	0,45	0,58	0,55	0,66	0,66	0,54	0,63	0,59	0,67	0,65	0,597
6	0,73	0,69	0,60	0,71	0,86	0,58	0,90	0,78	0,65	0,76	<b>0,725</b>
7	0,63	0,65	0,30	0,50	0,72	0,79	0,83	0,70	0,62	0,73	0,649
8	0,44	0,52	0,53	0,54	0,44	0,45	0,44	0,46	0,58	0,56	0,496
9	0,84	0,18	0,33	0,69	0,85	0,85	0,87	0,84	0,77	0,65	0,687
10	0,54	0,48	0,63	0,16	0,63	0,63	0,74	0,55	0,82	0,64	0,582
11	0,53	0,78	0,71	0,70	0,74	0,84	0,57	0,72	0,61	0,76	0,696
12	0,45	0,36	0,28	0,35	0,76	0,28	0,23	0,54	0,74	0,60	0,458
13	0,45	0,61	0,64	0,73	0,68	0,46	0,62	0,59	0,67	0,61	0,605
14	0,65	0,75	0,74	0,75	0,72	0,76	0,86	0,74	0,88	0,76	<b>0,761</b>
15	0,65	0,75	0,72	0,69	0,66	0,74	0,82	0,75	0,83	0,74	<b>0,734</b>

З результатів табл. 2.6 видно, що найбільш ефективними методами комплексування, по метриці  $Q_c$ , є методи: №3 – максимум яскравості, №14 – комплексування на основі піраміди Лапласа, №15 – комплексування на основі ДВП та №6 – метод маски.

Отже, з отриманих результатів комплексування різноспектральних зображень різними методами та оцінювання їх ефективності трьома метриками можна зробити висновок, що найбільш ефективними методами для комплексування зображень видимого та інфрачервоного діапазонів та такими, що стабільно дають хороші результати при комплексуванні зображень різного

сюжетного змісту є два методи, що відносяться до групи методів багатомасштабного розкладу, а саме: №14 – комплексування на основі піраміди Лапласа та №15 – комплексування на основі ДВП. Причому найбільший потенціал для вдосконалення має метод комплексування на основі ДВП, оскільки при його реалізації можна змінювати чотири вхідних параметри: 1) форму базового вейвлета; 2) кількість рівнів розкладу; 3) правило формування НЧ вейвлет-коефіцієнтів та 4) правило формування ВЧ вейвлет-коефіцієнтів результуючого вейвлет-спектру.

## Висновки до розділу 2

В результаті проведених у другому розділі досліджень:

1. Обґрунтовано, що для точної просторової синхронізації різноспектральних зображень доцільно використовувати критерій, який на основі визначених окремих ентропій парціальних зображень та спільної ентропії цих зображень ґрунтується на максимізації функції взаємної інформації, оскільки він є інваріантним до просторового розподілу яскравості по площі зображення. Результати моделювання просторової синхронізації зображень видимого та інфрачервоного діапазонів показують ефективність даного підходу навіть при погіршених погодних умовах;

2. Удосконалено багатокритеріальну метрику оцінювання інформативності зображень невідомого сюжетного змісту, шляхом заміни ентропії зображення, як одного з критеріїв метрики, на градієнт зображення; порогового обмеження кількості значущих градацій яскравості; проведення оцінювання коефіцієнта контрасту зображення на основі середніх значень контрастів в його локальних областях. В результаті внесені зміни дали змогу наблизити точність оцінювання інформативності зображень запропонованим методом до експертних оцінок порівняно з іншими методами, а саме: коефіцієнт кореляції складає 0,801 (в 1,45 рази більший), а середньоквадратична похибка дорівнює 0,883 (у 1,41 рази менша) у порівнянні

з широко вживаним методом ентропії, для якого коефіцієнт кореляції складає 0,552, а середньоквадратична похибка дорівнює 1,249 (див. табл. 2.3);

3. На основі аналізу оцінок ефективності відомих методів комплексування зображень сформованих в реальних умовах у видимому та інфрачервоному діапазонах, визначено, що доцільно розробити новий метод комплексування для підвищення ефективності мультиспектральної системи моніторингу в складних умовах спостереження на основі дискретного вейвлет перетворення, оскільки даний підхід дає можливість змінювати чотири параметри при виконанні вейвлет-перетворення, а саме: форму базового вейвлета; кількість рівнів розкладу; правило формування коефіцієнтів апроксимації (НЧ коефіцієнти) та правило формування коефіцієнтів деталізації (ВЧ коефіцієнти) результуючого вейвлет-спектру, що в свою чергу дає багато можливостей для розробки ефективного методу комплексування.

### РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МЕТОДУ КОМПЛЕКСУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ВИДИМОГО ТА ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНІВ НА ОСНОВІ ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ

З [41, 42, 48, 50-52] відомо кілька методів комплексування зображень побудованих на основі ДВП, які призначені для вирішення тої чи іншої окремої задачі. Всі вони являють собою модифікацію класичного методу, розглянутого в п. 1.4.2.15 і можуть відрізнятися один від одного наступним чином:

1. Вибраною базисною вейвлет-функцією: Haar, Daubechies, Symlets, Coiflets, BiorSplines, ReversBior, DMeyer чи ін.;
2. Кількістю рівнів розкладу;
3. Правилком формування НЧ частини результуючого вейвлет-спектра;
4. Правилком формування ВЧ частини результуючого вейвлет-спектра;

Найбільш суттєвий вплив на результат комплексування зображень має спосіб формування НЧ частини результуючого вейвлет-спектра [50].

Під час комплексування різноспектральних зображень, отриманих в складних умовах спостереження, а саме для таких умов потрібно розробити ефективний метод, проводити формування НЧ частини результуючого вейвлет-спектра на основі усереднення відповідних НЧ частин вхідних зображень, як це виконано в [42, 50] або на основі абсолютного максимуму [50, 51], недоцільно. Оскільки легко показати (див. рис. 3.1), що формування НЧ частини вейвлет-спектра результуючого зображення шляхом усереднення (рис. 3.1, С) призводить до зниження контрасту у випадку коли, хоча б одне з вхідних зображень має низький контраст, а вибір коефіцієнтів НЧ частини по правилу абсолютного максимуму (рис. 3.1, D), призводить до «маскування» об'єктів при наявності завади достатньо високої яскравості на одному з вхідних зображень.

На рис. 3.1 зображені вхідні зображення, сформовані в складних умовах спостереження (задимленість спостережуваної сцени), у видимому та інфрачервоному діапазонах з інформативністю, оціненою по (2.17),  $I_A = 0,508$  та  $I_B = 0,255$ , відповідно. Коефіцієнт контрасту для цих зображень  $K_A = 0,378$  та

$K_B = 0,236$ , відповідно. Застосувавши ДВП до вхідних зображень з одним рівнем розкладу формується їх вейвлет-спектр (рис. 3.2). В результаті комплексуювання інформативність синтезованих зображень:  $I_C = 0,474$  та  $I_D = 0,584$ ; а коефіцієнти їх контрасту:  $K_C = 0,307$  та  $K_D = 0,353$  (див. табл. 3.1).

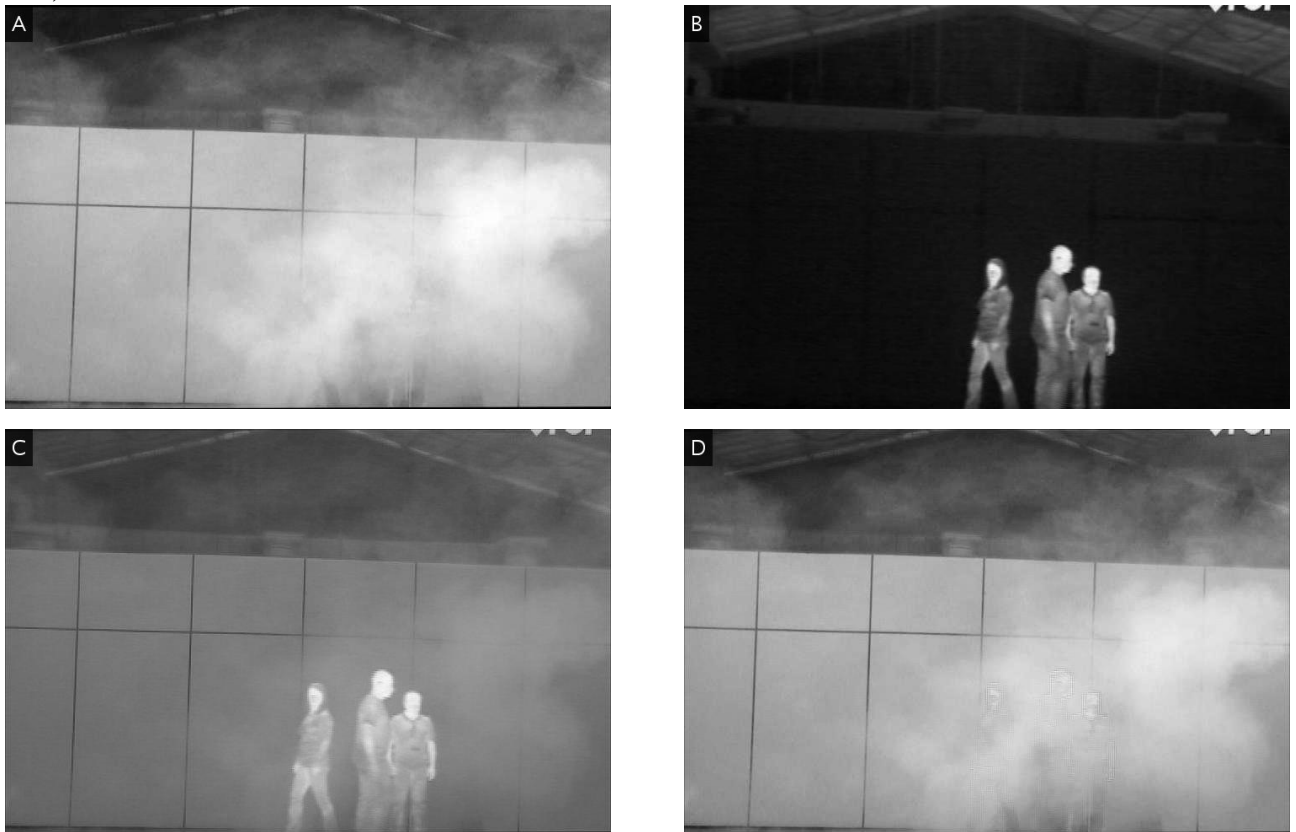


Рис. 3.1. Комплексуювання зображень на основі ДВП: А і В – вхідні зображення, відповідно; С і D – комплексовані зображення з формуванням НЧ частини по правилу усереднення та абсолютного максимуму, відповідно

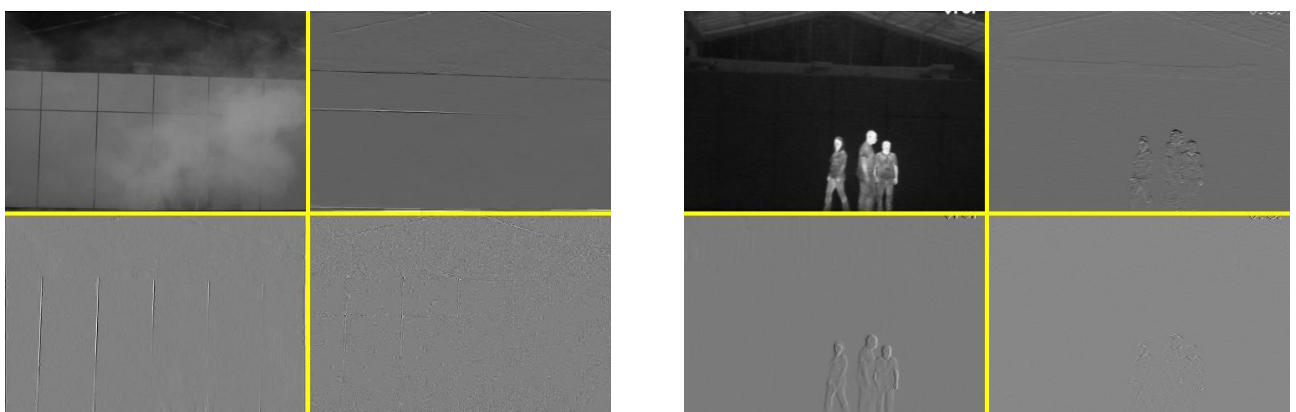


Рис. 3.2. Вейвлет-спектр вхідних зображень А та В при одному рівні розкладу



Слід відмітити, що інформативність зображення  $C$  є меншою від  $A$  у зв'язку з нижчою його контрастністю, попри добре виділені об'єкти. А інформативність зображення  $D$  попри маскуванню об'єктів є більшою від  $A$  за рахунок додавання в процесі комплексування ВЧ складової з зображення  $B$  і збереження попереднього рівня контрастності практично в повному обсязі.

Враховуючи особливості комплексування зображень на основі ДВП та з метою підвищення його ефективності, пропонується розробити такий принцип формування НЧ частини результуючого вейвлет-спектра, який би дозволив усунути зазначені вище недоліки.

### **3.1. Формування низькочастотних вейвлет-коефіцієнтів комплексованого зображення з використанням регресійного аналізу**

Формування НЧ частини результуючого вейвлет-спектру комплексованого зображення пропонується виконувати на основі статистичного аналізу НЧ частин вейвлет-спектра вхідних зображень за допомогою лінійної регресії [78] (*SLR – Simple Linear Regression*) [79]. На відміну від кореляційного аналізу, регресійний аналіз не з'ясовує чи істотний зв'язок, а займається пошуком моделі цього зв'язку, вираженої у функції регресії.

Припустимо, що є  $N$  точок  $(x_i, y_i)$ , де  $x_i \in X$ ,  $y_i \in Y$ , а  $i = \overline{1, N}$ . Функція, яка описує зв'язок  $X$  і  $Y$  записується виразом [79]:

$$y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i, \quad (3.1)$$

де  $\alpha$  і  $\beta$  – коефіцієнти регресійної моделі, а  $\varepsilon_i$  – відхилення  $X$  від  $Y$ .

Завдання визначення характеру зв'язку  $X$  і  $Y$  полягає в тому, щоб знайти такі коефіцієнти  $\alpha$  і  $\beta$  рівняння

$$\hat{y}_i = \alpha + \beta x_i, \quad (3.2)$$

які б забезпечували найменше квадратичне відхилення лінійної регресійної моделі (3.2) від емпіричних даних (3.1). Іншими словами, коефіцієнти  $\alpha$  і  $\beta$  є розв'язком наступної задачі мінімізації [79]:

$$Q(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - \alpha - \beta x_i)^2 \rightarrow \min. \quad (3.3)$$

Продиференціювавши  $Q$  по  $\alpha$  і  $\beta$  та прирівнявши часткові похідні до нуля, отримаємо точкові оцінки параметрів моделі  $\alpha$  і  $\beta$ , які мінімізують цільову функцію  $Q$ :

$$\alpha = \bar{y}_i - \beta \bar{x}_i \quad (3.4)$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_i)(y_i - \bar{y}_i)}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_i)^2} = \frac{\overline{x_i y_i} - \bar{x}_i \bar{y}_i}{\overline{x_i^2} - \bar{x}_i^2} = \frac{Cov(X, Y)}{Var(X)}. \quad (3.5)$$

де  $\bar{x}_i, \bar{y}_i$  – середнє арифметичне значення  $X$  та  $Y$  відповідно.

Зробивши заміну в (3.4) та (3.5) значень  $x_i$  та  $y_i$  на значення НЧ частин  $LL_A$  та  $LL_B$  (рис. 3.3) вейвлет-спектру вхідних зображень  $A$  та  $B$  (рис. 3.1), відповідно, де  $i = n \times m$ ; а  $n, m$  – координати коефіцієнтів у відповідній LL матриці, отримаємо параметри  $\alpha$  і  $\beta$  нашої регресійної моделі (рис. 3.4).

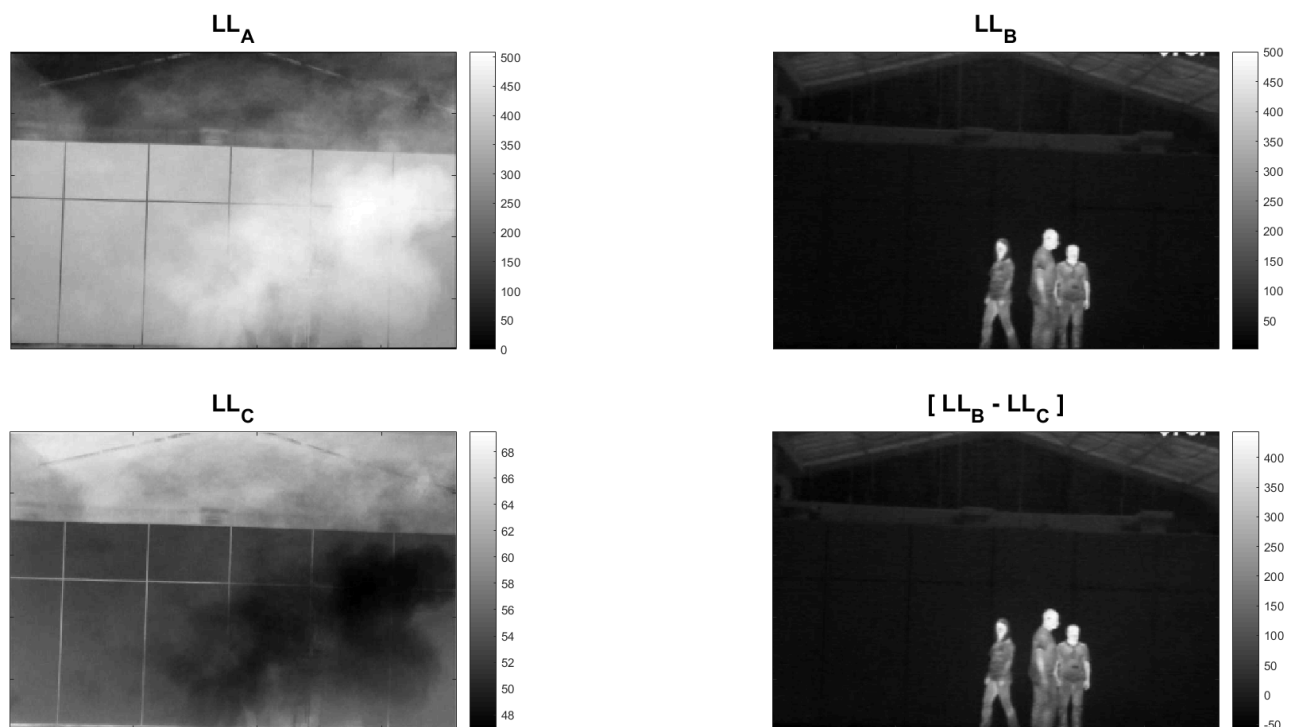


Рис. 3.3. Регресійний аналіз НЧ частин вхідних зображень

Підставивши  $\alpha$  і  $\beta$  в (3.2), отримаємо нову матрицю  $LL_C$  (рис. 3.3), елементи якої є коефіцієнтами, що описують зв'язок  $LL_A$  та  $LL_B$ , тобто  $LL_C$  описує характер зв'язку між НЧ частинами вхідних зображень.

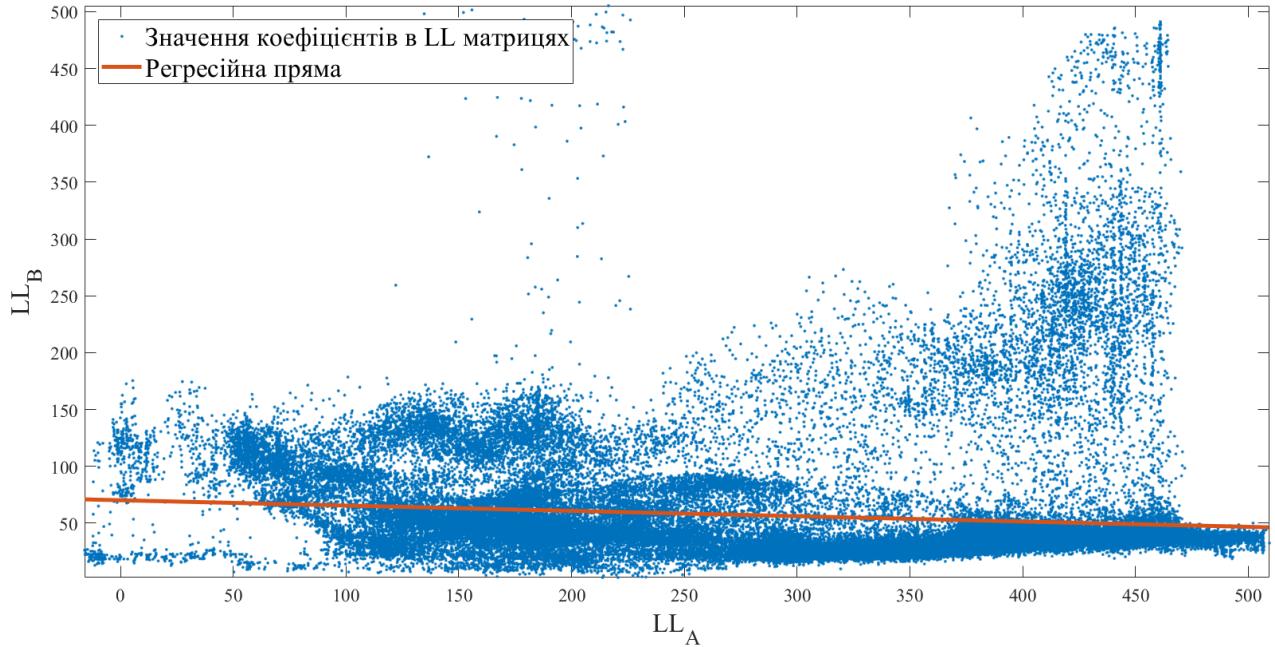


Рис. 3.4. Пряма, знайдена в процесі регресійного аналізу, що описує зв'язок  $LL_A$  та  $LL_B$ , коефіцієнти рівняння якої для даного випадку:  $\alpha = 70,215$  і  $\beta = -0,047$

НЧ частину результуючого вейвлет-спектру комплексованого зображення формуємо наступним чином [53]:

$$LL_F(n, m) = LL_A(n, m) + W(n, m) \times [LL_B(n, m) - LL_C(n, m)], \quad (3.6)$$

де  $W$  – матриця коригуючих коефіцієнтів, які визначається, як:

$$W(n, m) = LL_C(n, m) / \max(LL_C(n, m)). \quad (3.7)$$

В (3.6) різниця  $[LL_B(n, m) - LL_C(n, m)]$  (рис. 3.3), опосередковано описує деталі зображення  $B$ , які відсутні в зображенні  $A$ . Таким чином використання регресійного аналізу дає змогу об'єднати на одному зображенні максимальну кількість деталей з вхідних зображень (рис. 3.5).

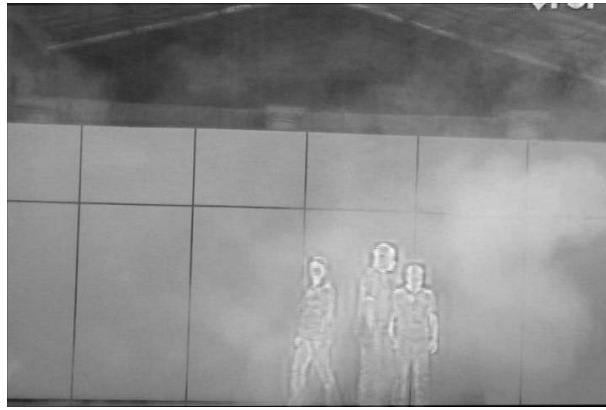


Рис. 3.5. Комплексоване зображень за допомогою ДВП з формуванням НЧ частини результуючого вейвлет спектру на основі регресійного аналізу: інформативність якого  $I_F = 0,567$ , а коефіцієнт контрасту  $K_F = 0,356$

Отже, послідовність дій при комплексуванні зображень  $A$  і  $B$ , запропонованим методом, буде виглядати наступним чином (рис. 3.6):

1. Обчислення інформативності вхідних зображень та вибір базового по критерію максимуму інформативності, тобто як  $A$  завжди вибирається зображення з більшою інформативністю, поміж вхідних зображень, визначеною по (2.17).
2. Синхронне розкладання  $A$  і  $B$  на кілька рівнів за допомогою ДВП.
3. Формування НЧ частини результуючого вейвлет-спектру з відповідних НЧ частин вхідних зображень на основі регресійного аналізу.
4. Формування ВЧ частини результуючого вейвлет-спектру з відповідних ВЧ частин вхідних зображень по правилу абсолютного максимуму.
5. Реконструкція з сформованого результуючого (комплексованого) вейвлет-спектру нового зображення за допомогою ІДВП, яке синтезує комплексоване зображення.
6. Нормалізація комплексованого зображення  $F$  (рис. 3.5) до стандартного діапазону значень  $[0, 255]$ .

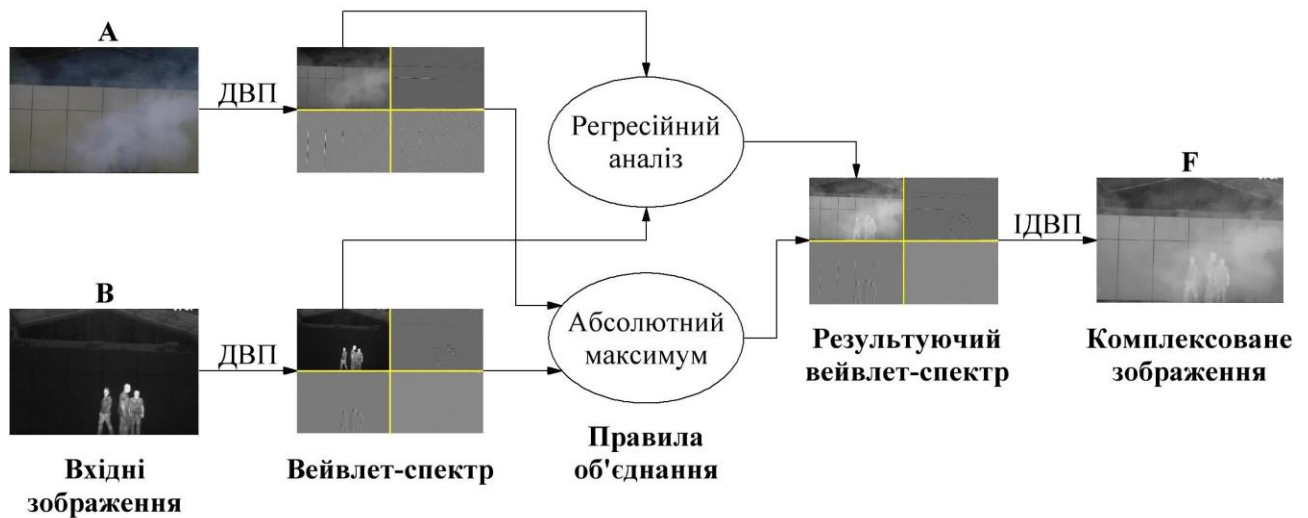


Рис. 3.6. Схема комплексування зображень запропонованим методом

Таблиця 3.1

### Порівняння параметрів вхідних та комплексованих зображень

Параметр	Зображення				
	Рис. 3.1, А	Рис. 3.1, В	Рис. 3.1, С	Рис. 3.1, D	Рис. 3.5
Інформативність, $I$	0,508	0,255	0,474	0,584	0,567
Коефіцієнт контрасту, $K$	0,378	0,236	0,307	0,353	0,356

Як видно з рис. 3.1 і рис. 3.5 та табл. 3.1 використання регресійного аналізу для формування НЧ частини результуючого вейвлет спектру комплексованого зображення дає змогу синтезувати більш інформативне зображення F ніж вхідні A і B з збереженням контрастності. Значення обчислених в табл. 3.1 параметрів зображень підтверджують, що комплексування за допомогою запропонованого підходу дає змогу під час синтезу комплексованого зображення забезпечити баланс між його інформативністю, контрастністю та виділенням об'єктів інтересу.

### 3.2. Вплив на інформативність комплексованого зображення базисної функції вейвлет-перетворення та кількості рівнів розкладу

Розробивши нове правило формування НЧ частини результуючого вейвлет спектру необхідно дослідити який вплив на ефективність комплексування і інформативність комплексованого зображення буде мати вибраний вейвлет та кількість рівнів розкладу. Для цього проведено комплексування зображень з тестового набору (Додаток 1) запропонованим в п. 3.1 алгоритмом з почерговою зміною базисної вейвлет-функції та кількості рівнів розкладу, оцінено інформативність комплексованих зображень по (2.17) та ефективність комплексування по (2.24) та (2.27), а нормовані усереднені результати представлено у табл. 3.2, табл. 3.3 і табл. 3.4, відповідно.

Таблиця 3.2

#### Інформативність комплексованого зображення при зміні базисної функції вейвлет перетворення та кількості рівнів розкладу

Вейвлет		Кількість рівнів розкладу				
		$L = 1$	$L = 2$	$L = 3$	$L = 4$	$L = 5$
Haar	db1	0,941	0,906	0,893	0,872	0,868
Daubechies	db2	<b>0,948</b>	0,932	0,920	0,904	0,889
	db6	<b>0,947</b>	0,937	0,926	0,921	0,901
	db10	<b>0,950</b>	0,934	0,925	0,906	0,899
Symlets	sym2	<b>0,948</b>	0,932	0,920	0,904	0,889
	sym4	0,938	0,934	0,917	0,910	0,880
	sym6	0,942	0,936	0,921	0,913	0,887
	sym8	0,944	0,934	0,927	0,913	0,891
Coiflets	coif1	0,932	0,930	0,912	0,908	0,892
	coif3	0,941	0,930	0,919	0,908	0,881
	coif5	0,943	0,933	0,926	0,927	0,892

Продовження табл. 3.2

Вейвлет		Кількість рівнів розкладу				
		$L = 1$	$L = 2$	$L = 3$	$L = 4$	$L = 5$
BiorSplines	bior1.1	0,941	0,906	0,893	0,872	0,868
	bior3.1	<b>0,955</b>	0,922	0,899	0,821	0,774
	bior6.8	0,942	0,941	0,921	0,907	0,886
ReversBior	rbio1.1	0,941	0,906	0,893	0,872	0,868
	rbio3.1	0,914	0,767	0,668	0,649	0,629
	rbio6.8	0,941	0,940	0,924	0,909	0,888
DMeyer	dmey	0,945	0,935	0,928	0,927	0,888

З результатів табл. 3.2 та їх графічного представлення на рис. 3.7 видно, що найбільш інформативні комплексовані зображення отримуються при одному рівні розбиття ( $L = 1$ ) з використанням вейвлетів: db2, db6, db10 (Добеші) та bior3.1 (від англ. *biorthogonal* – біортогональний).

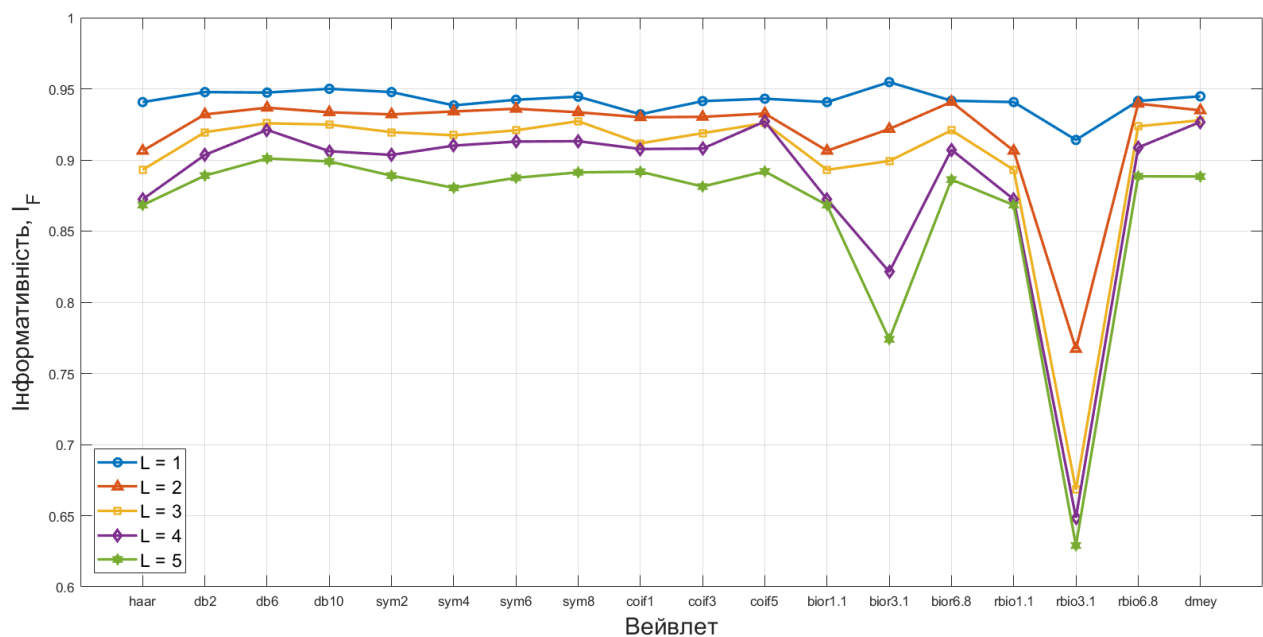


Рис. 3.7. Інформативність комплексованого зображення при зміні вейвлету та рівня розкладу



Таблиця 3.3

Ефективність комплексування  $Q_G$  при зміні вейвлета та рівня розкладу

Вейвлет		Кількість рівнів розкладу				
		$L = 1$	$L = 2$	$L = 3$	$L = 4$	$L = 5$
Haar	db1	0,896	0,956	<b>0,982</b>	<b>0,982</b>	0,955
Daubechies	db2	0,886	0,943	0,964	0,977	0,973
	db6	0,891	0,918	0,959	0,959	0,972
	db10	0,888	0,925	0,955	0,962	0,963
Symlets	sym2	0,886	0,943	0,964	0,977	0,973
	sym4	0,889	0,926	0,973	<b>0,985</b>	0,980
	sym6	0,888	0,933	0,970	<b>0,982</b>	0,976
	sym8	0,888	0,923	0,961	0,980	0,975
Coiflets	coif1	0,888	0,937	0,969	0,975	0,966
	coif3	0,886	0,925	0,966	0,976	0,966
	coif5	0,885	0,924	0,962	0,975	0,968
BiorSplines	bior1.1	0,896	0,956	<b>0,982</b>	<b>0,982</b>	0,955
	bior3.1	0,904	0,918	0,937	0,886	0,672
	bior6.8	0,886	0,937	0,965	0,980	0,977
ReversBior	rbio1.1	0,896	0,956	<b>0,982</b>	<b>0,982</b>	0,955
	rbio3.1	0,856	0,530	0,174	0,096	0,058
	rbio6.8	0,884	0,935	0,962	0,972	0,972
DMeyer	dmey	0,885	0,922	0,959	0,971	0,963

З результатів табл. 3.3 та їх графічного представлення на рис. 3.8 видно, що найбільш ефективно, по метриці  $Q_G$ , комплексування виконується при трьох рівнях розбиття ( $L = 3$ ) з використанням вейвлетів: haar (db1), bior1.1, rbio1.1 та при чотирьох рівнях розкладу ( $L = 4$ ) з використанням вейвлетів: haar (db1), sym4, sym6, bior1.1, rbio1.1.



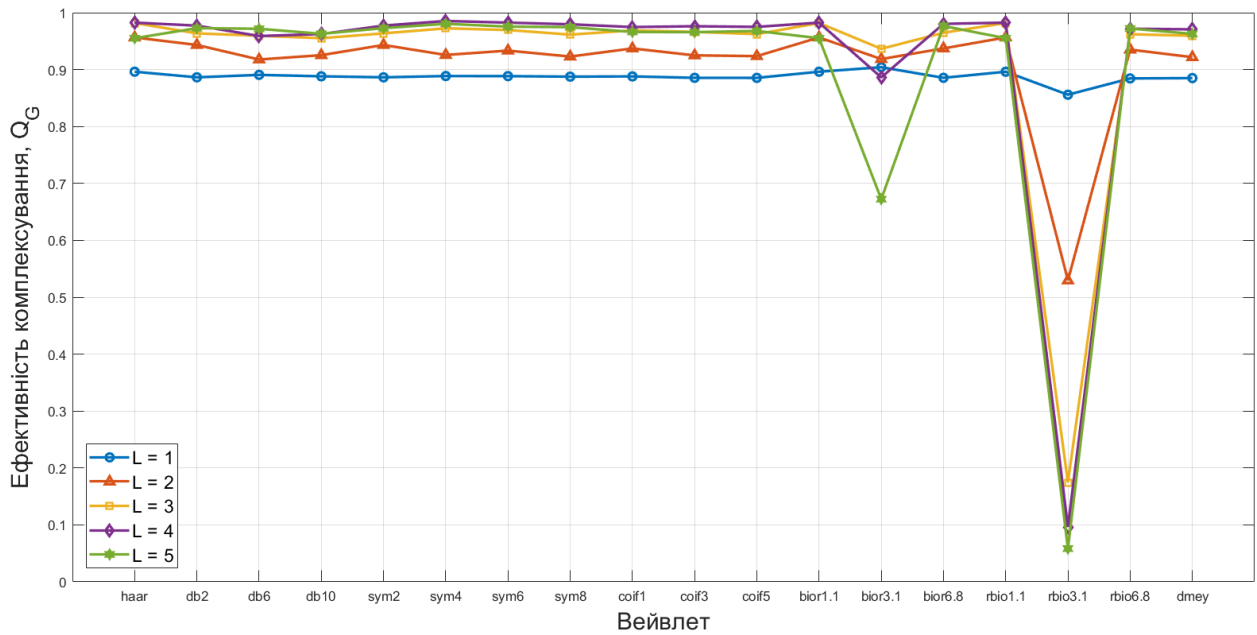


Рис. 3.8. Ефективність комплексування  $Q_G$  при зміні вейвлета та рівня розкладу

Таблиця 3.4

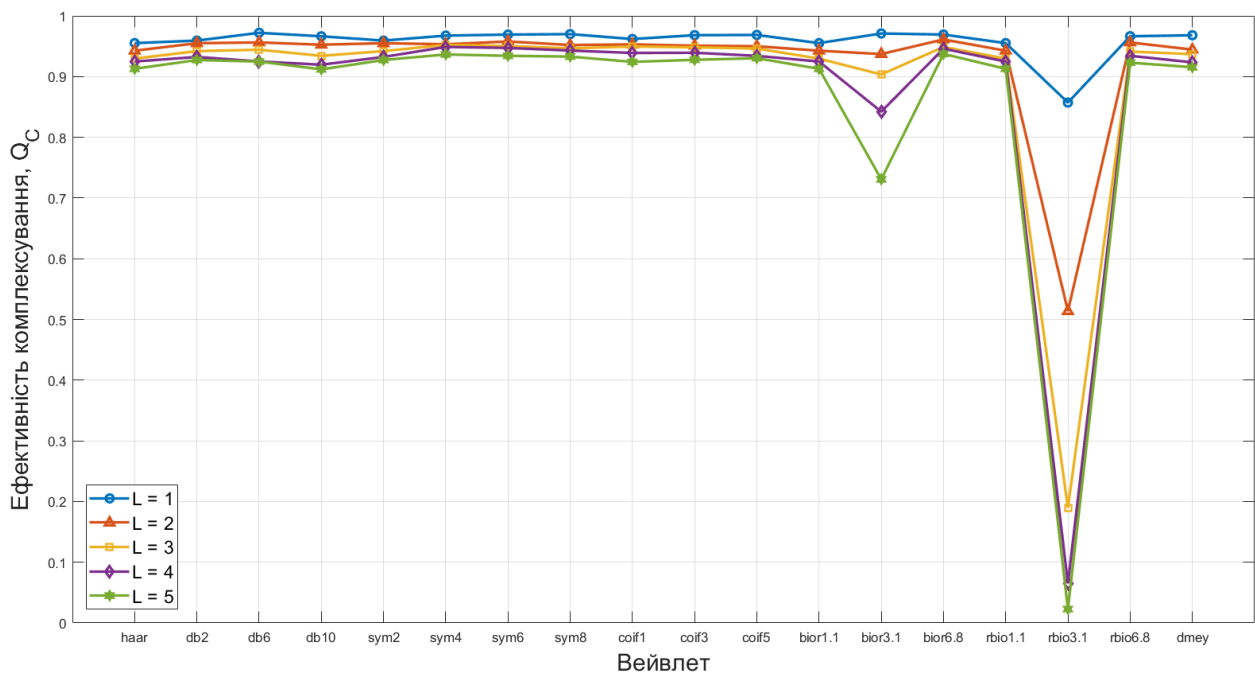
**Ефективність комплексування  $Q_C$  при зміні вейвлета та рівня розкладу**

Вейвлет		Кількість рівнів розкладу				
		$L = 1$	$L = 2$	$L = 3$	$L = 4$	$L = 5$
Haar	db1	0,955	0,943	0,930	0,925	0,913
Daubechies	db2	0,959	0,955	0,942	0,932	0,927
	db6	<b>0,972</b>	0,956	0,944	0,925	0,925
	db10	0,966	0,953	0,934	0,920	0,912
Symlets	sym2	0,959	0,955	0,942	0,932	0,927
	sym4	<b>0,968</b>	0,953	0,952	0,949	0,936
	sym6	<b>0,969</b>	0,958	0,950	0,947	0,934
	sym8	<b>0,970</b>	0,952	0,946	0,943	0,933
Coiflets	coif1	0,962	0,953	0,950	0,939	0,924
	coif3	0,968	0,951	0,948	0,939	0,928
	coif5	0,969	0,950	0,946	0,934	0,930

Продовження табл. 3.4

Вейвлет		Кількість рівнів розкладу				
		$L = 1$	$L = 2$	$L = 3$	$L = 4$	$L = 5$
BiorSplines	bior1.1	0,955	0,943	0,930	0,925	0,913
	bior3.1	<b>0,971</b>	0,937	0,903	0,842	0,731
	bior6.8	<b>0,969</b>	0,961	0,949	0,946	0,937
ReversBior	rbio1.1	0,955	0,943	0,930	0,925	0,913
	rbio3.1	0,857	0,514	0,190	0,065	0,023
	rbio6.8	0,966	0,956	0,941	0,934	0,923
DMeyer	dmey	<b>0,968</b>	0,944	0,937	0,923	0,915

З результатів табл. 3.4 та їх графічного представлення на рис. 3.9 видно, що найбільш ефективно, по метриці  $Q_C$ , комплексування виконується при одному рівні розбиття ( $L = 1$ ) з використанням вейвлетів: db6, sym4, sym6, sym8, bior3.1, bio6.8 та dmey.

Рис. 3.9. Ефективність комплексування  $Q_C$  при зміні вейвлета та рівня розкладу

Виходячи з результатів оцінювання ефективності комплексування зображень видимого та інфрачервоного діапазонів запропонованим в п. 3.1 алгоритмом по двох метриках  $Q_G$  та  $Q_C$  і результатів оцінювання інформативності  $I$  комплексованого зображення, можна зробити висновок, що на перший погляд отримані результати є суперечливими. Оскільки, для отримання найбільш інформативного зображення доцільно використовувати один рівень розкладу в ДВП, тоді як метрика  $Q_G$  «говорить», що найбільш ефективно зображення комплексуються при чотирьох рівнях розкладу, а  $Q_C$  – при одному. Однак, це не зовсім так, оскільки використані метрики оцінюють різні параметри зображень. Метрика  $Q_G$  оцінює як переноситься градієнт, тобто інформація про границі об'єктів, з вхідних зображень на комплексоване і не враховує інші параметри зображення, такі як, наприклад, його контраст і середня яскравість, на відміну від показника інформативності  $I$ . Подібно до  $Q_G$ , метрика  $Q_C$  блочно (локальними областями) оцінює наскільки комплексоване зображення є подібним до вхідних зображень і не передбачає, що характер просторового розподілу яскравості по площі зображень з видимого і інфрачервоного діапазонів є різним. Тому, оскільки отримані показники  $I$ ,  $Q_G$  та  $Q_C$  є нормованими, пропонується їх перемножити (табл. 3.5 та рис. 3.10) для формування інтегрального показника, який буде мати сенс певного компромісу між інформативністю (контрастністю, середньою яскравістю, кількістю значущих градацій яскравості та ін. параметрами), ефективністю перенесення градієнту на комплексоване зображення та його подібністю з вхідними зображеннями.

Таблиця 3.5

**Інтегральна оцінка комплексування  $Q_F$  при зміні вейвлета та рівня розкладу**

Вейвлет		Кількість рівнів розкладу				
		$L = 1$	$L = 2$	$L = 3$	$L = 4$	$L = 5$
Haar	db1	0,805	0,817	0,815	0,793	0,757
Daubechies	db2	0,806	0,840	0,835	0,823	0,802
	db6	0,820	0,822	0,839	0,817	0,810
	db10	0,815	0,823	0,825	0,802	0,789
Symlets	sym2	0,806	0,840	0,835	0,823	0,802
	sym4	0,807	0,824	<b>0,851</b>	<b>0,851</b>	0,808
	sym6	0,811	0,837	<b>0,848</b>	<b>0,850</b>	0,809
	sym8	0,813	0,820	0,844	0,843	0,810
Coiflets	coif1	0,796	0,831	0,839	0,831	0,796
	coif3	0,807	0,818	0,842	0,833	0,790
	coif5	0,809	0,818	0,843	0,844	0,803
BiorSplines	bior1.1	0,805	0,817	0,815	0,793	0,757
	bior3.1	0,838	0,793	0,761	0,613	0,380
	bior6.8	0,808	<b>0,847</b>	0,843	0,841	0,811
ReversBior	rbio1.1	0,805	0,817	0,815	0,793	0,757
	rbio3.1	0,671	0,209	0,022	0,004	0,001
	rbio6.8	0,805	0,840	0,836	0,825	0,797
DMeyer	dmey	0,809	0,814	0,834	0,831	0,783

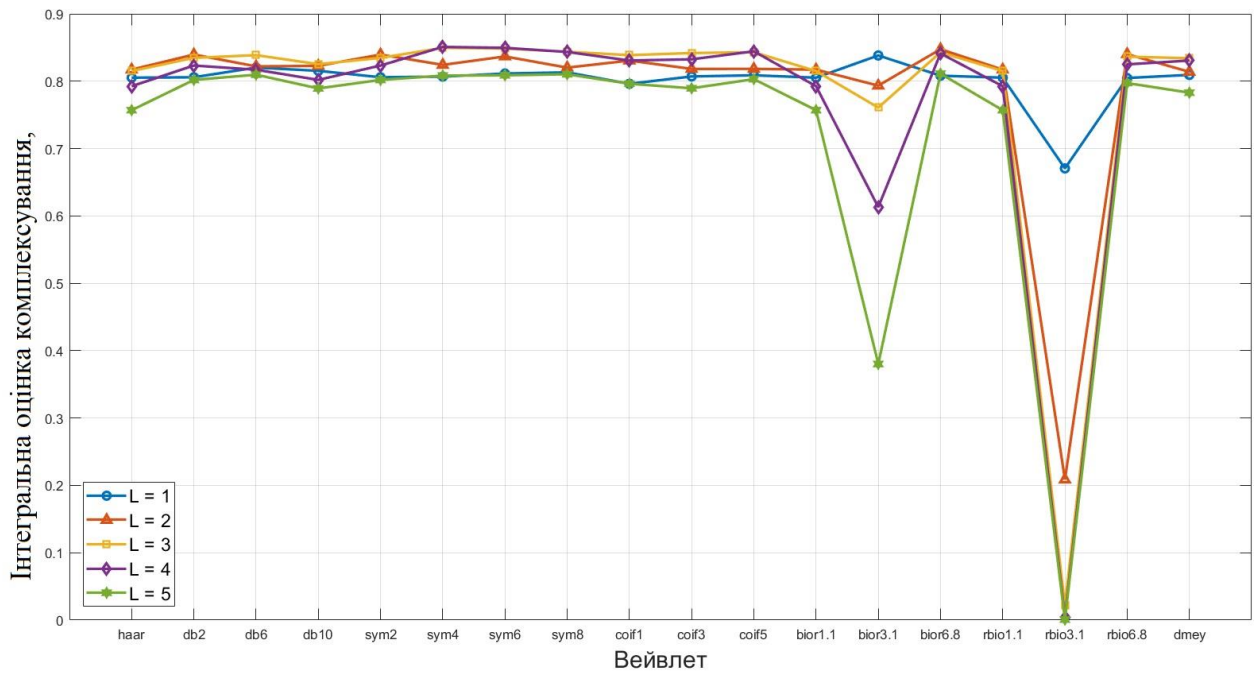
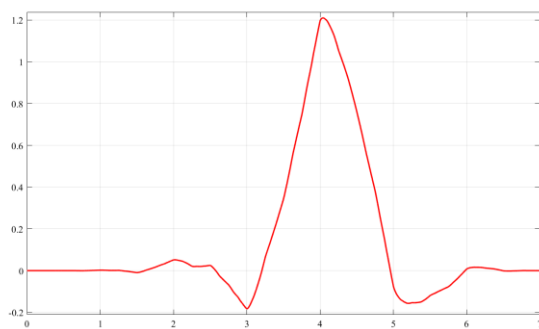
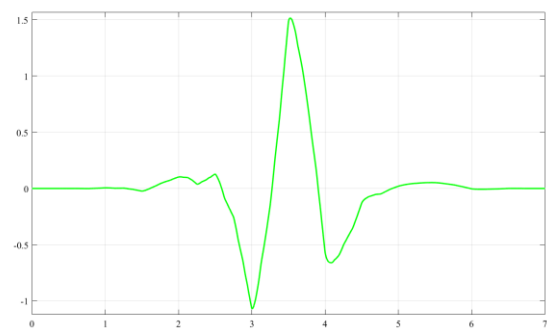


Рис. 3.10. Інтегральна оцінка комплексування  $Q_F$  при зміні вейвлета та рівня розкладу

Отже, з результатів наведених в табл. 3.5 та їх графічного представлення на рис. 3.10 видно, що на основі зведеного показника  $E$  найбільш доцільно, проводити комплексування зображень запропонованим методом при чотирьох рівнях розкладу ( $L = 4$ ) з використанням вейвлета *sym4* (рис. 3.11 та рис. 3.12).

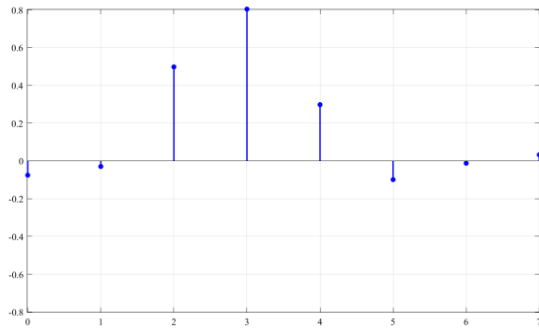
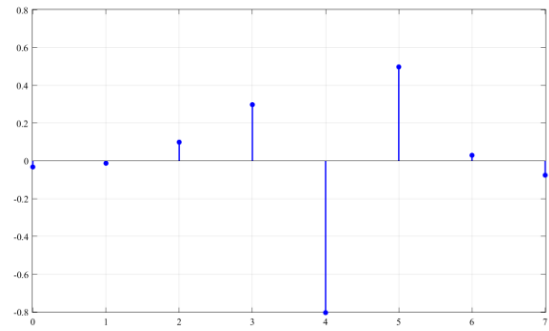
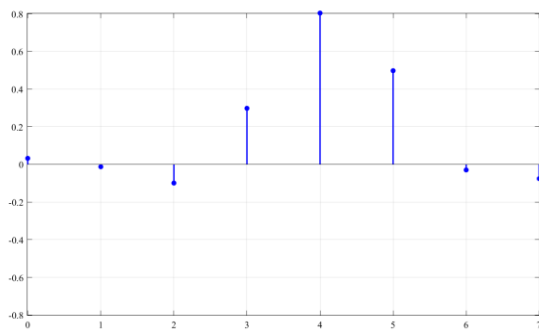
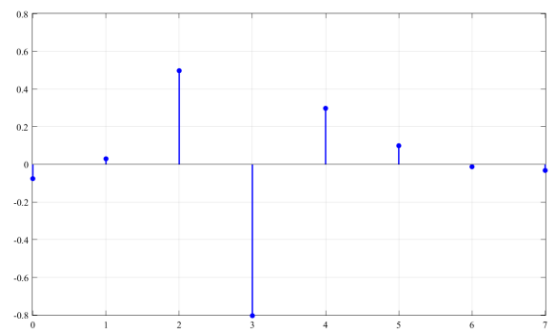


Масштабуюча функція,  $\phi$



Вейвлет функція,  $\psi$

Рис. 3.11. Вейвлет *sym4* (Symlets)

Коефіцієнти НЧ фільтра,  $g_R(i)$ Коефіцієнти ВЧ фільтра,  $h_R(i)$ Коефіцієнти відновлюючого НЧ  
фільтра,  $g_D(i)$ Коефіцієнти відновлюючого ВЧ  
фільтра,  $h_D(i)$ Рис. 3.12. Фільтри вейвлета  $\text{sum4}$  з якими виконується згортка зображень під

### 3.3. Мультимодальне комплексування зображень в кольорі

Сучасні сенсори видимого діапазону ЕМХ в переважній більшості формують кольорові зображення (рис. 3.13), тому є можливість використання інформації про кольоровий розподіл на зображенні спостережуваної сцени під час комплексування. Нехай, мультиспектральне кольорове зображення  $A$  сформоване сенсором видимого діапазону, а зображення у градаціях сірого  $B$  сенсором інфрачервоного діапазону (рис. 3.13).

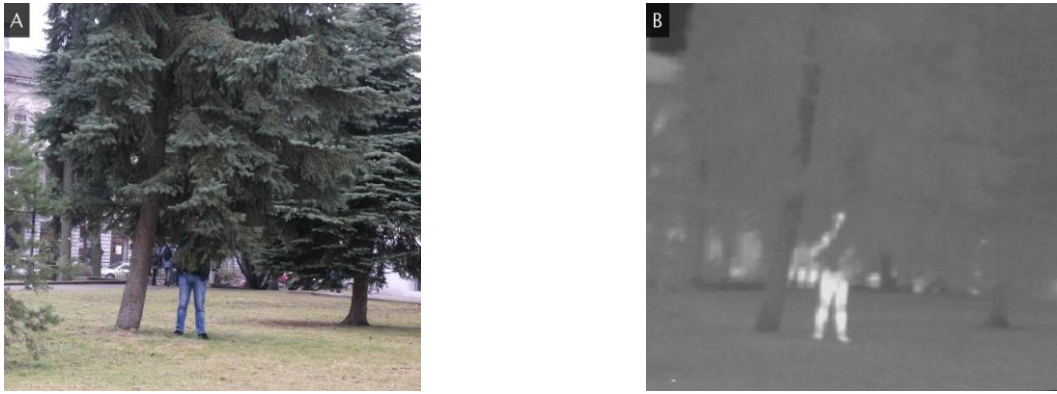


Рис. 3.13. Вхідні зображення алгоритму комплексування: А) кольорове зображення видимого діапазону; В) зображення у градаціях сірого ІЧ діапазону

Використовуючи колірний простір  $CIE L^*a^*b^*$  (далі просто  $Lab$ ) можна проводити комплексування зображення з збереженням інформації про їх кольоровий розподіл. Колірна модель  $Lab$  була розроблена в 1976 році з врахуванням сприйняття кольору людським оком та є міжнародним стандартом [80]. Вона розроблялась як апаратно-незалежна і призначена для аналізу та обробки зображень, тобто вона задає кольори без врахування особливостей відтворення кольорів і має три параметри для опису кольору: світлосила  $L$  (від англ. *Lightness*) – рівень освітлення сцени та два хроматичні параметри. Перший (умовно позначений латинською літерою  $a$ ) вказує на співвідношення зеленої і червоної складової кольору, другий (позначений літерою  $b$ ) – співвідношення синьої та жовтої складової.

Перейдемо з кольорового простору  $RGB$ , в якому «приходить» кольорове зображення з сенсора видимого діапазону, в простір  $Lab$ . Для цього необхідно спочатку перейти з  $RGB$  в колірний простір  $XYZ$ :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,4124 & 0,3576 & 0,1805 \\ 0,2126 & 0,7152 & 0,0722 \\ 0,0193 & 0,1192 & 0,9505 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (3.8)$$

де  $R$ ,  $G$  і  $B$  – відповідно червоний, зелений і синій канали кольорового зображення в  $RGB$  просторі (рис. 3.14).





Рис. 3.14. Канали вхідного кольорового зображення в  $RGB$  просторі

Далі виконується перехід з  $XYZ$  в  $Lab$  (рис. 3.15):

$$\begin{cases} L = 116 \times f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16, \\ a = 500 \times \left(f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right), \\ b = 200 \times \left(f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right), \end{cases} \quad (3.9)$$

де  $X_n = 0,9505$ ,  $Y_n = 1,0000$  і  $Z_n = 1,0888$  – нормовані координати білої точки в просторі  $XYZ$  для стандартного джерела світла D65, що імітує денне світло в полудень з корельованою колірною температурою  $6504^\circ\text{K}$ , а

$$f(x) = \begin{cases} \sqrt[3]{x}, & x > \left(\frac{6}{29}\right)^3, \\ \frac{1}{3} \times \left(\frac{29}{6}\right)^2 x + \frac{4}{29}, & x \leq \left(\frac{6}{29}\right)^3. \end{cases} \quad (3.10)$$



Рис. 3.15. Канали вхідного кольорового зображення (попередньо пронормовані) в  $Lab$  просторі



Отримане значення світлосили  $L$  (яскравісної складової), що змінюється в діапазоні від 0 до 100, відокремлене від значень хроматичних складових кольору  $a$  і  $b$ , що дає змогу проводити їх обробку роздільно.

Після переходу в колірний простір  $Lab$ , компонента  $L$  використовується, як вхідне зображення для комплексування з зображенням ІЧ діапазону. Причому  $L$  попередньо множиться на коефіцієнт  $255/100 = 2,55$  для узгодження з діапазоном значень ІЧ зображення. Синтезоване в результаті комплексування зображення  $F$  (рис. 3.16, А) нормується до діапазону  $[0, 100]$  та використовується як нова  $L^* = F$  компонента колірного простору  $Lab$ .

Зворотна трансформація з  $Lab$  в  $RGB$  виконується за наступними виразами:

$$\begin{cases} X = X_n \times f^{-1}\left(\frac{L^* + 16}{116} + \frac{a}{500}\right), \\ Y = Y_n \times f^{-1}\left(\frac{L^* + 16}{116}\right), \\ Z = Z_n \times f^{-1}\left(\frac{L^* + 16}{116} - \frac{b}{200}\right); \end{cases} \quad (3.11)$$

$$f^{-1}(x) = \begin{cases} x^3, & x > \frac{6}{29}, \\ 3 \times \left(\frac{29}{6}\right)^2 \times \left(x - \frac{4}{29}\right), & x \leq \frac{6}{29}; \end{cases} \quad (3.12)$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,2410 & -1,5374 & -0,4986 \\ -0,9692 & 1,8760 & 0,0416 \\ 0,0556 & -0,2040 & 1,0570 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

Після зворотного переходу з  $Lab$  в  $RGB$  по (3.11) – (3.13) отримується комплексоване кольорове зображення (рис. 3.16, В).

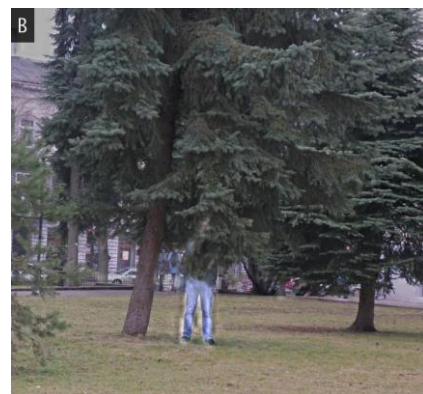


Рис. 3.16. Комплексовані зображення: А) в градаціях сірого; В) в кольорі

Отримане зображення (рис. 3.16, В) містить в собі інформацію як про яскравість спостережуваної сцени з обох спектральних діапазонів, так і про її колір.

### 3.4. Структурна схема мультимодального комплексування зображень запропонованим методом

Виходячи з вище сказаного, схема обробки вхідних зображень в МСМ з комплексуванням зображень буде виглядати так, як зображено на рис. 3.17 і складається з трьох етапів: 1) попередньої обробки вхідних зображень, зокрема, просторової їх синхронізації; 2) оцінювання інформативності і вибору ведучого каналу в конкретний момент часу; 3) власне комплексування.

Розглянемо запропоновану схему (рис. 3.17) більш детально:

1) На вхід надходить два зображення:  $VI$  – видиме (сформоване сенсором видимого діапазону) і  $IR$  – ІЧ (сформоване сенсором ІЧ діапазону), які подаються на вхід блоку просторової синхронізації, де одне з зображень трансформується по відношенню до іншого на основі обчислених параметрів розузгодженості (див. п. 3.1) і на виході отримуються просторово синхронізовані зображення  $VI^*$  та  $IR^*$ .

Видиме зображення  $VI^*$  конвертується з  $RGB$  в  $Lab$  для виділення яскравісної складової  $L$ .

2) Отримані зображення  $L$  та  $IR^*$  надходять в блок вибору базового зображення, де виконується оцінка їх інформативності (див. п. 2.2). Як базове зображення  $A$  завжди вибирається зображення з більшою інформативністю. Нехай це буде зображення  $L$ , тоді  $A = L$ , а  $B = IR^*$ .

3) Далі зображення  $A$  і  $B$  надходять в блок комплексування. За допомогою ДВП вони розкладаються на визначену кількість рівнів з використанням визначеної вейвлет-функції (див. п. 3.3). НЧ вейвлет-коефіцієнти (коефіцієнти апроксимації) комплексуються на основі регресійного аналізу зв'язку між ними (див. п. 3.1), а ВЧ вейвлет-коефіцієнти (коефіцієнти деталізації)

комплексуються по правилу абсолютного максимуму. За допомогою ІДВП з отриманого результуючого вейвлет-спектра синтезується (реконструюється) комплексоване зображення  $F$  представлене градаціями сірого.

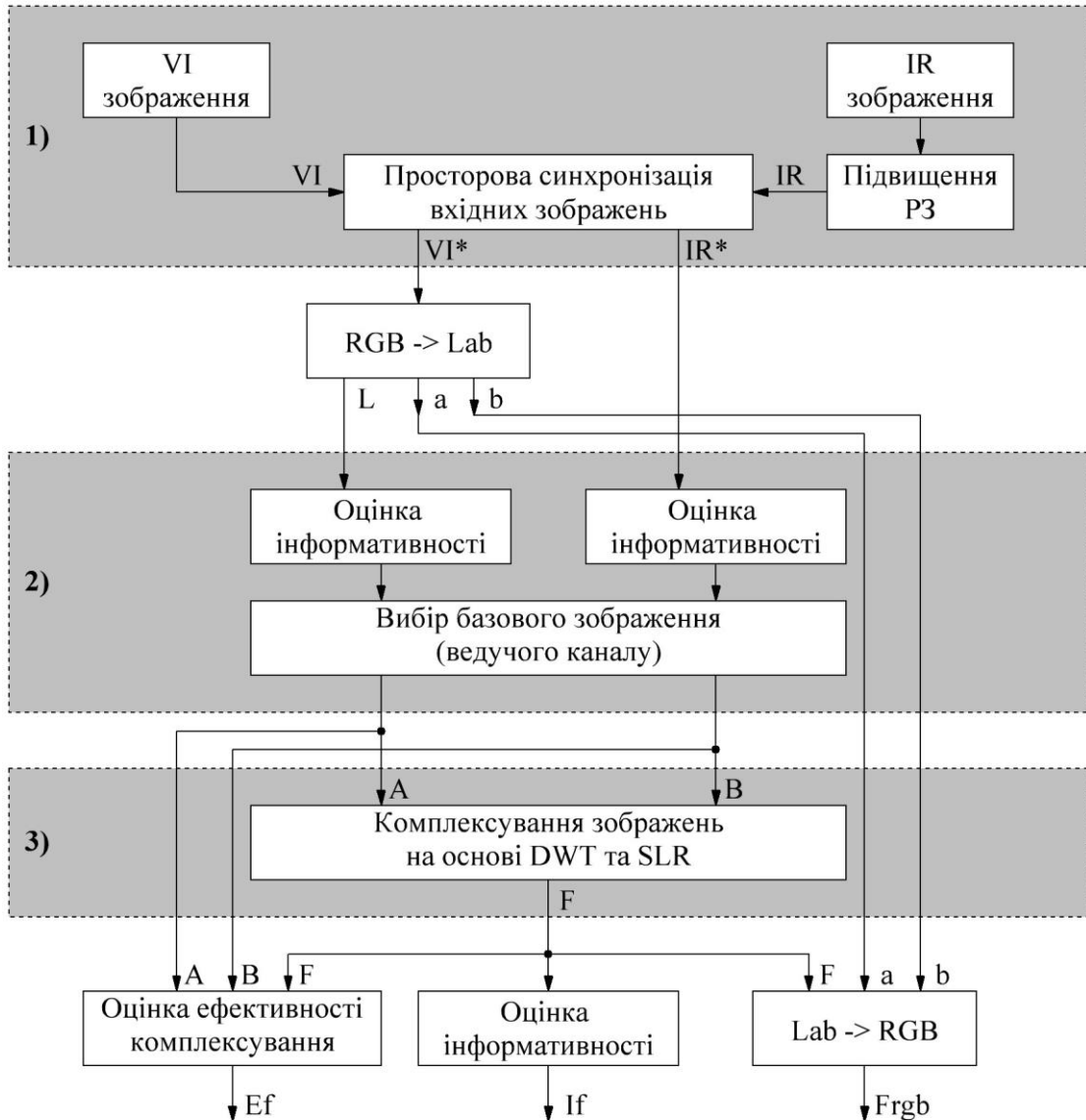


Рис. 3.17. Схема системи комплексування зображень з обробкою зображень запропонованими алгоритмами

На завершальному етапі проводиться оцінка інформативності комплексованого зображення  $F$ , оцінка ефективності комплексування (див. п. 2.3) та формування кольорового комплексованого зображення  $F_{RGB}$  з використання колірних складових  $a$  і  $b$  під час зворотного переходу з  $Lab$  в  $RGB$ .

### Висновки до розділу 3

Таким чином у третьому розділі:

1. Запропоновано метод та розроблено алгоритм комплексування зображень на основі дискретного вейвлет-перетворення з формуванням низькочастотних вейвлет-коефіцієнтів результуючого вейвлет-спектру з застосуванням регресійного аналізу відповідних частин вейвлет-спектрів вхідних зображень. Використання регресійного аналізу дає змогу об'єднати на комплексованому зображенні максимальну кількість деталей з вхідних зображень. Результати обчислень параметрів зображень сформованих за допомогою запропонованого методу комплексування, підтверджують його ефективність, оскільки він дає змогу забезпечити баланс між приростом інформативності, контрастністю зображення та виділенням об'єктів інтересу на комплексованому зображенні. Наприклад, для тестової пари зображень №1 (див. Додаток 1) інформативність комплексованого зображення зросла з 0,59 до 0,95, ефективність комплексування по метриці  $Q_G$  з 0,89 до 0,98, по метриці  $Q_C$  з 0,86 до 0,97.

2. Проведено дослідження впливу кількості рівнів розкладу та форми базисної функції вейвлет-перетворення на інформативність комплексованого зображення та ефективність комплексування запропонованим методом. З отриманих експериментальних результатів встановлено, що при мультимодальному комплексуванні зображень, найбільш доцільно використовувати чотири рівні розкладу та вейвлет  $\text{sym4}$ , оскільки з такими параметрами вейвлет-перетворення досягається найвища інтегральна оцінка ефективності комплексування (0,851), яка формується на основі оцінювання інформативності комплексованого зображення та двох метрик ефективності ( $Q_G$  та  $Q_C$ ), які оцінюють різні параметри комплексованого зображення.

3. Розвинено модель комплексування зображень яка в результаті удосконалення дає змогу формувати кольорові комплексовані

мультиспектральні зображення, тобто дає змогу переносити на комплексоване зображення не тільки розподіл яскравості спостережуваної сцени з вхідних зображень, а також розподіл кольорів (у випадку коли хоча б одне з вхідних зображень є кольоровим). Одержане кольорове комплексоване зображення є більш адаптивним для психофізичного сприйняття людиною-оператором, ніж при комплексуванні у градаціях сірого, що спрощую роботу оператора та пришвидшує аналіз ним результатів моніторингу.

4. Запропоновано структурну схему блоку цифрової обробки для комплексування зображень видимого та інфрачервоного діапазонів в мультиспектральній системі моніторингу.

## РОЗДІЛ 4. МОНІТОРИНГ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЮ СИСТЕМОЮ З КОМПЛЕКСУВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ ВИДИМОГО ТА ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНІВ

### 4.1. Моделювання процесу виявлення рухомих об'єктів мультиспектральною системою моніторингу з комплексуванням

#### 4.1.1. Алгоритм виявлення рухомих об'єктів по даних відеомоніторингу

Сигнал на виході сучасних цифрових відеокамер (відеосигнал) являє собою послідовність цифрових растрових зображень  $I_1, I_2, \dots, I_t$ , що називаються кадрами, де  $t$  – момент часу в який отриманий конкретний кадр (або його порядковий номер). Аналіз сцени, відображеної в кадрі, є складним процесом. Першим етапом аналізу відеосигналу спостережуваної сцени є виявлення руху [85], який проявляється у зміні зображення сцени в процесі спостереження. Такі зміни обумовлені наступними чинниками [86]:

- a) власний шум цифрової відеокамери;
- b) динамічні налаштування системи візуалізації;
- c) зміна освітлення сцени;
- d) рух рослинності, що зумовлений рухом потоків повітря;
- e) рухомі об'єкти (РО);
- f) тіні РО.

Причини a) і b) представляють собою помилкові фіксації зміни спостережуваної сцени; c) і d) виникають за реальних умов, але для більшості завдань моніторингу не представляють інтересу. Лише випадки e) і f) представляють собою інтерес та потребують точного детектування.

Сучасний відеодетектор рухомих об'єктів повинен задовольняти двом основним вимогам:

- 1) стійкість до змін зображення спостережуваної сцени, що обумовлені чинниками a) – d);

- 2) обчислювальна ефективність, тобто здатність обробляти необхідну кількість кадрів за одиницю часу, для роботи в реальному масштабі часу.

На даний момент в літературі [85-92], запропоновано широкий спектр підходів для виявлення РО, кожен з яких представляє собою компроміс у тій чи іншій мірі між вимогами 1 і 2. Проте, найбільш ефективні методи передбачають, що кожен кадр  $I_t$  порівнюється з так званим, опорним кадром або по іншому моделлю фону  $B$  (від англ. *Background*). Такий підхід вимагає, щоб модель фону  $B$  генерувалася, навіть при інтенсивному русі об'єктів, та постійно оновлювалася. Очевидно, що ефективність виявлення рухомих об'єктів буде суттєво залежати від того, правильно чи ні сформована модель фону  $B$ .

У більшості випадків при відсутності руху на спостережуваній сцені, відеокамера системи відеомоніторингу спостерігає нерухому сцену, тобто фону  $B$ . Якщо знехтувати впливом на сформоване зображення кадру шумів активних елементів системи формування зображення (шуми матриці фотоелектронного перетворювача, підсилювачів, аналого-цифрового перетворювача та ін.), а також вважати, що за час формування певної послідовності кадрів, освітлення та інші умови зйомки є незмінними, то при відсутності руху в зоні спостереження, яка відповідає пікселю з координатами  $(n, m)$ , можна вважати значення цього пікселя постійним, тобто  $I_t(n, m) = I_{t+1}(n, m)$  для  $t = 1, 2, \dots$  Таким чином, постійне значення яскравості пікселя  $I(n, m)$  в межах певної послідовності кадрів розглядається, як критерій відсутності руху в відповідній зоні спостережуваної сцени. На практиці при формуванні кадрів наявність випадкових завад (шумової складової) є неминучою. Основним джерелом таких завад є шум апаратури, похибка квантування при перетворенні аналогового сигналу в цифрову форму, а також похибки корекції зображення (наприклад, похибка заокруглення при виконанні математичних операцій під час обробки зображення).

В загальному випадку кадр  $I_t$  можна розглядати, як адитивну суміш істинного значення сигналу  $I_t^*$  та деякого випадкового шуму  $\varepsilon_t$ :

$$I_t(n, m) = I_t^*(n, m) + \varepsilon_t(n, m), \quad (4.1)$$

де  $\varepsilon_t(n, m)$  – реалізація випадкового шумового процесу в пікселі з координатами  $(n, m)$  кадру  $I_t$ .

У випадку, коли відеокамера спостерігає нерухому сцену, істинне значення сигналу  $I_t^*$  буде відповідати фону  $B$ , а відповідно вираз (4.1) прийме наступний вигляд:

$$I_t(n, m) = B(n, m) + \varepsilon_t(n, m), \quad (4.2)$$

Враховуючи наявність множини незалежних випадкових факторів, які визначають флуктуації вихідного сигналу відеокамери, можна з достатньою точністю розглядати значення шуму  $\varepsilon$ , як випадкової величини, що описується нормальним законом розподілу і характеризується функцією густини розподілу імовірностей:

$$f(\varepsilon; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\varepsilon - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (4.3)$$

з математичним очікуванням  $\mu = 0$  та з СКВ  $\sigma = const$ .

Рух у відеосигналі проявляється в різкій зміні значення яскравості окремих пікселів, по координатам яких відбувається переміщення об'єкта. Інші коливання яскравості проходять плавно, наприклад, зміна природнього освітлення на протязі дня. Припустимо, що в період настройки (режим навчання) системи моніторингу руху, який триває перші  $K$  кадрів, відеокамера спостерігає нерухому сцену, яка містить лише статичні об'єкти фону. Це дає змогу достатньо точно виконати оцінку істинного значення яскравості фону шляхом усереднення  $K$  послідовних кадрів відеосигналу:

$$B(n, m) \cong \mu(n, m) = \frac{1}{K} \sum_{t=1}^K I_t(n, m), \quad (4.4)$$

та величину дисперсії шуму  $\sigma^2(n, m)$  відеокамери:



$$\sigma^2(n, m) = \frac{1}{K-1} \sum_{t=1}^K (I_t(n, m) - B(n, m))^2. \quad (4.5)$$

Зроблене вище припущення, що камера в процесі формування фону спостерігає статичну сцену, в реальних умовах досить часто не може бути виконаною і формування фону потрібно проводити при інтенсивному русі в полі зору камери. У таких умовах просте усереднення дасть некоректний результат, оскільки сформований фон буде містити в собі складові, внесені рухомими об'єктами. Для того, щоб коректно сформувати фон, пропонується проводити його обчислення лише в тих ділянках кадру, де рух в даний момент часу відсутній. Оскільки рухомий об'єкт в процесі руху по сцені буде змінювати своє розташування і на зображенні також, то на протязі певного часу модель фону буде сформована для усієї площі зображення сцени. В даному випадку час формування моделі фону буде залежати від частоти кадрів відеокамери та параметрів руху об'єктів.

Для грубого визначення наявності руху в тій чи іншій ділянці сцени використовується метод міжкадрової різниці [85, 90]:

$$M_t(n, m) = \begin{cases} 1, & \text{при } |I_t(n, m) - I_{t-1}(n, m)| \geq T \\ 0, & \text{при } |I_t(n, m) - I_{t-1}(n, m)| < T' \end{cases} \quad (4.6)$$

де  $M_t$  – бінарна маска руху (рис. 4.2, А) в якій «1» свідчить про наявність руху в ділянці сцени, за яку відповідає конкретний піксель бінарного зображення  $M_t$ , а «0» – відповідно про відсутність руху;  $I_t$  – поточний кадр (рис. 4.1, А);  $I_{t-1}$  – попередній кадр (рис. 4.1, В);  $T$  – деяке порогове значення. На вибір величини  $T$  впливають різні фактори: величина шуму, контраст рухомого об'єкта по відношенню до фону та ін.



Рис. 4.1. Два послідовних кадри відеосигналу: А) поточний кадр  $I_t$  (кадр з №500), В) попередній кадр  $I_{t-1}$  (кадр з №499)

Оскільки метод міжкадрової різниці дає змогу виділяти лише границі рухомих об'єктів [85, 95], то пропонується здійснювати розмиття сформованої маски  $M_t$  до повного заповнення всієї площі рухомого об'єкта (рис. 4.2, В). Ця процедура реалізується за допомогою морфологічних операцій [94].

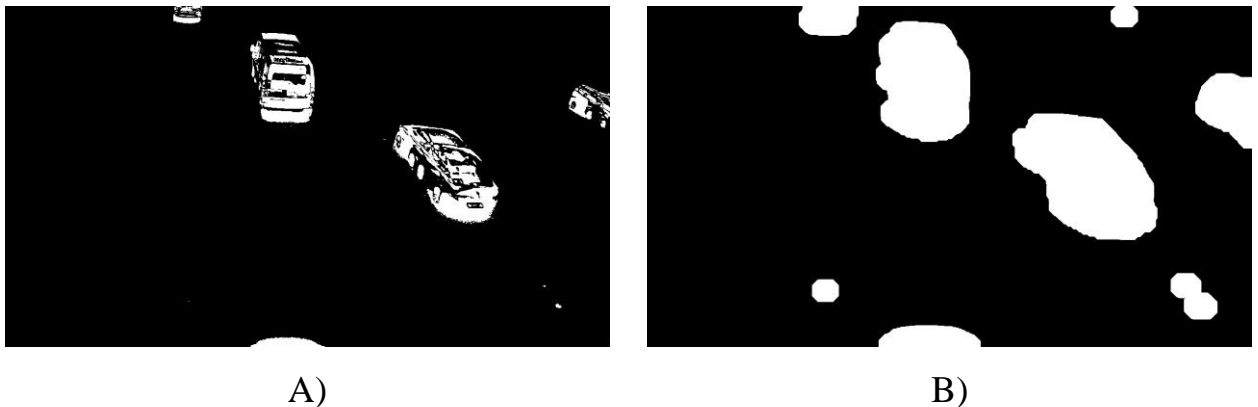


Рис. 4.2. Бінарна маска руху  $M_t$ : А) отримана по (4.6), В) після морфологічної фільтрації

Після морфологічної фільтрації бінарна маска рухомих об'єктів  $M_t$  використовується для коректного формування фону  $B_t$  (послідовного обчислення середнього значення [96]) (рис. 4.3, А)

$$B_t(n, m) = \begin{cases} \frac{k \times B_{t-1}(n, m) + I_t(n, m)}{k + 1}, & M_t(n, m) = 0, \\ B_{t-1}(n, m), & M_t(n, m) = 1 \end{cases} \quad (4.7)$$

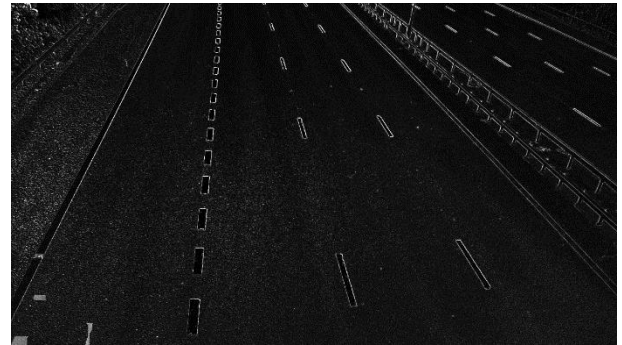
та для коректного оцінювання дисперсії шуму камери  $\sigma_t^2$  (послідовного обчислення дисперсії [96]) (рис. 4.3, В)

$$\sigma_t^2(n, m) = \begin{cases} \frac{(k+1)\sigma_{t-1}^2(n, m) + (I_t(n, m) - B_t(n, m))^2}{k}, & M_t(n, m) = 0, \\ \sigma_{t-1}^2(n, m), & M_t(n, m) = 1 \end{cases} \quad (4.8)$$

де  $k$  – кількість пікселів, що взяли участь при формуванні фону, яка для кожної ділянки сцени може бути різною, причому  $0 < k \leq K$  та  $k \leq t$ .



А)



В)

Рис. 4.3. Результат оцінки параметрів сцени на протязі  $K = 200$  кадрів: А) сформований по (4.7) фон  $B_t$ , В) обчислена по (4.8) дисперсія шуму  $\sigma_t^2$

Слід відмітити, що на початку процесу формування фону  $B_t$  та оцінювання дисперсії шуму  $\sigma_t^2$  (при  $t = 1$ ), значення  $B_{t-1}$  та  $\sigma_{t-1}^2$  приймаються рівними нулю.

Після завершення оцінювання параметрів сцени система переходить в режим точного пошуку рухомих об'єктів. В якості критерію виявлення рухомих об'єктів в межах пікселя з координатами  $(n, m)$  використовується порівняння поточного кадру  $I_t$  з фоном  $B_t$ :

$$|B_t(n, m) - I_t(n, m)| \geq T. \quad (4.9)$$

Виходячи з властивості нормального закону розподілу, яким описуються шуми камери нашої системи моніторингу, можна вважати, що всі значення пікселів фону з урахуванням шумів повинні потрапляти в інтервал від  $T1_t(n, m) = B_t(n, m) - 3\sigma_t(n, m)$  до  $T2_t(n, m) = B_t(n, m) + 3\sigma_t(n, m)$ . З урахуванням даної властивості критерій виявлення руху (4.9) можна записати наступним чином (рис. 4.4, А):

$$|B_t(n, m) - I_t(n, m)| > 3\sigma_t(n, m), \quad (4.10)$$

де  $\sigma_t(n, m) = \sqrt{\sigma_t^2(n, m)}$  – СКВ, що визначене в процесі настройки системи моніторингу руху для кожного пікселя з координатами  $(n, m)$ .

З врахуванням критерію (4.10) бінарна маска руху  $M_t^*$  для точного виявлення по аналогії з (4.6) буде визначатися як:

$$M_t^*(n, m) = \begin{cases} 1, & \text{при } |B_t(n, m) - I_t(n, m)| \geq 3\sigma_t(n, m) \\ 0, & \text{при } |B_t(n, m) - I_t(n, m)| < 3\sigma_t(n, m) \end{cases} \quad (4.11)$$

З метою видалення помилково відмічених пікселів у сформованій бінарній масці  $M_t^*$  (рис. 4.4, А), а також для об'єднання правильно виділених пікселів в об'єкти проводиться її фільтрація за допомогою морфологічних операцій [94] (рис. 4.4, В).

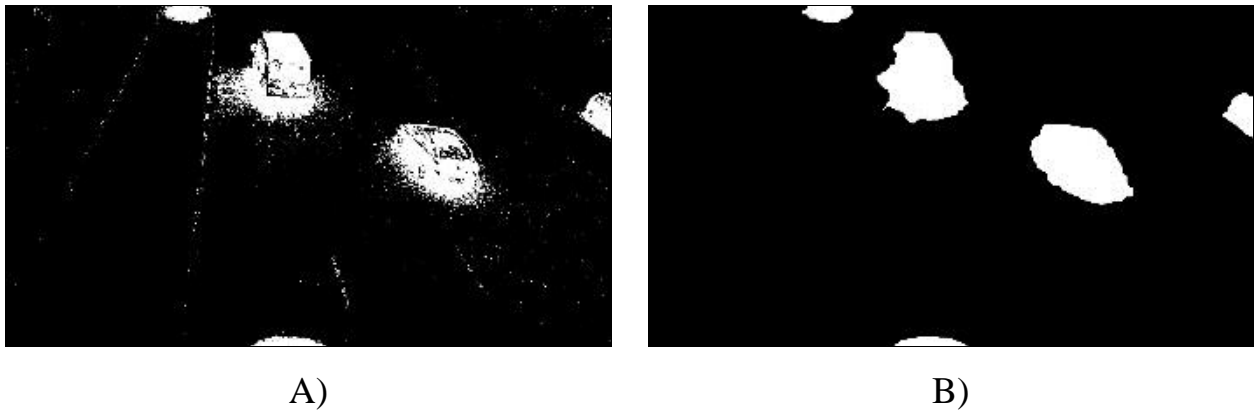


Рис. 4.4. Бінарна маска руху  $M_t^*$ : А) отримана по (4.11), В) після морфологічної фільтрації

Для того, щоб алгоритм на протязі часу спостереження був адаптивний до змін фону та рівня шуму, проводиться їх корекція в областях, де рух в даний момент часу відсутній для кожного наступного кадру та для кожного пікселя цього кадру по аналогії з (4,7) та (4,8) з заміною виразів при  $M_t(n, m) = 0$  на наступні [93]:

$$B_{t+1}(n, m) = \alpha \times B_t(n, m) + (1 - \alpha) \times I_t(n, m), \quad (4.12)$$

$$\sigma_{t+1}^2(n, m) = \alpha \times \left( \sigma_t^2(n, m) + (B_{t+1}(n, m) - B_t(n, m))^2 \right) + \quad (4.13)$$

$$+(1 - \alpha) \times (I_{t+1}(n, m) - B_{t+1}(n, m))^2,$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт швидкості оновлення, який підбирається емпірично в залежності від частоти кадрів відеосигналу та інтенсивності руху об'єктів в полі зору камери.

Отже, оцінка дисперсії шуму по (4.8) та її постійне оновлення по (4.12) дає змогу врахувати зміну впливу шуму, як в просторі так і в часі [87] на відміну від більшості існуючих методів виділення рухомих об'єктів, котрі враховують наявність шуму у відеосигналі, але не враховують його зміну в просторі і часі [86, 89, 95].

На рис. 4.5 наведено приклад визначення фону і дисперсії шуму та їх корекції для пікселя з координатами (400,190) в растрі відеосигналу на протязі 2000 кадрів. Як видно з даного рисунка, гострі піки значення інтенсивності пікселя які виходять за межі порогів  $T1_t$  та  $T2_t$  свідчать про наявність руху в момент часу  $t$  в області спостережуваної сцени за яку відповідає даний піксель.

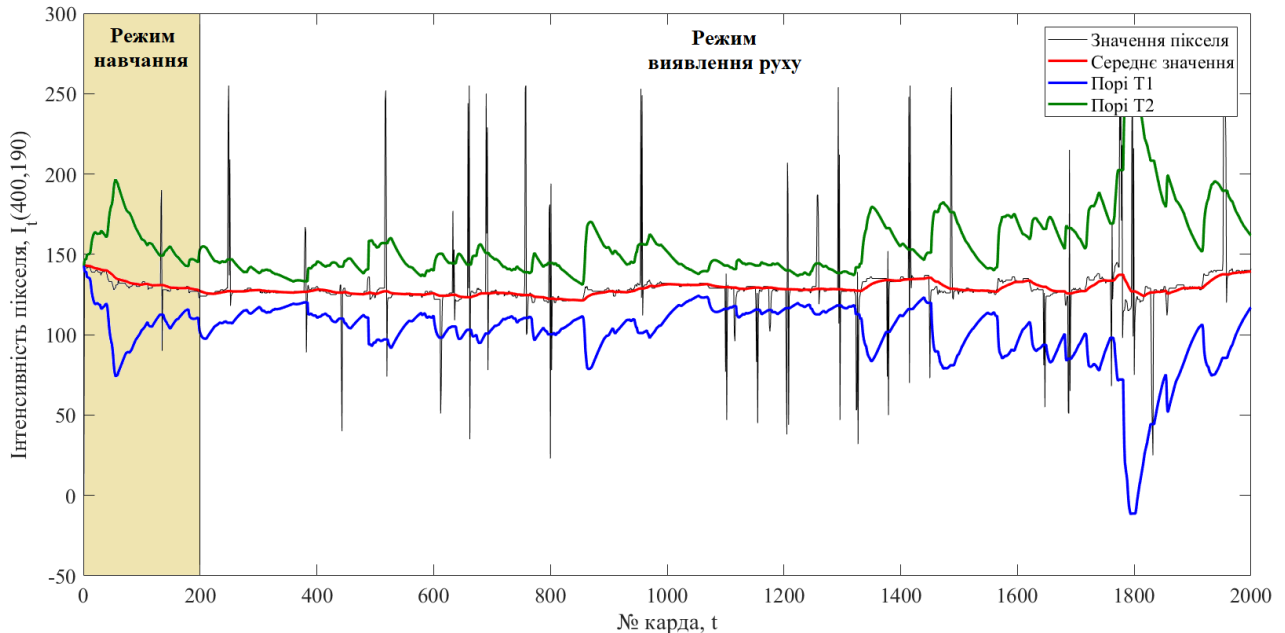


Рис. 4.5. Приклад визначення та корекції фону і дисперсії шуму для пікселя з координатами [400,190] на протязі 2000 кадрів тестового відеосигналу

Як видно з рис. 4.4 виділенні рухомі об'єкти мають дещо більшу площу, ніж це є насправді. В цьому можна переконатися, порівнявши маску руху, зображену

на рис. 4.1, А з відповідним їй кадром, що зображений на рис. 4.1, А. Це пов'язано з фіксацією тіней, які відкидають рухомі об'єкти.

Прийняття рухомих тіней за частини виділених об'єктів є однією з основних причин погіршення характеристик алгоритмів виявлення РО. Воно призводить до негативних наслідків, зокрема, перекручувань форми об'єктів, зростання ймовірності помилкового виявлення, помилок класифікації об'єктів, об'єднання декількох об'єктів в один, тощо [97]. Даний недолік ускладнює подальший аналіз і обробку результату виявлення РО, тому доцільно провести виявлення рухомих тіней з метою усунення їх впливу на точність виявлення РО.

Розглянемо деяку точку спостережуваної сцени і нехай вона має колір  $(R, G, B)$ , тоді, після падіння на цю точку тіні, вона матиме колір  $k \times (R, G, B)$ , де  $k$  визначає, наскільки змінилась освітленість даної точки сцени. Виявляється, що цього факту цілком достатньо для створення алгоритму виявлення та видалення тіней з достатньою для більшості задач точністю [97].

Нехай  $(R_B, G_B, B_B)$  – колір деякого пікселя в зображенні фону  $B_t$ , а  $(R_I, G_I, B_I)$  – колір цього пікселя в зображенні поточного кадру  $I_t$ . Спершу перейдемо в колірний простір HSV [98], тобто  $(R_B, G_B, B_B) \rightarrow (H_B, S_B, V_B)$ ,  $(R_I, G_I, B_I) \rightarrow (H_I, S_I, V_I)$ . HSV (або HSB) – колірна модель, заснована на трьох характеристиках кольору: колірному тоні  $H$  (від англ. *Hlue*), насиченості  $S$  (від англ. *Saturation*) і значенні інтенсивності  $V$  (від англ. *Value*), яку також називають яскравістю  $B$  (від англ. *Brightness*). Таким чином при наявності рухомої тіні в ділянці сцени, за яку відповідає даний піксель, значення  $V_I$  має відчутно зменшитися в порівнянні з  $V_B$ , а значення  $H_I, S_I$  – повинно практично не змінитися в порівнянні з  $H_B, S_B$ . Отже, піксель буде вважатися частиною тіні, якщо будуть виконуватися три умови [99, 100] (рис. 4.6 та рис. 4.7):

$$\tau_{V1} \leq (V_I/V_B) \leq \tau_{V2}, \quad (4.14)$$

$$|S_I - S_B| \leq \tau_S, \quad (4.15)$$

$$|H_I - H_B| \leq \tau_H. \quad (4.16)$$



де  $H_I, S_I, V_I$  та  $H_B, S_B, V_B$  – тон, насиченість і яскравість пікселя, відповідно, поточного кадру  $I_t$  та фону  $B_t$ ;  $\tau_{V1}, \tau_{V2}, \tau_S, \tau_H$  – порогові коефіцієнти, які оптимізуються емпіричним шляхом.

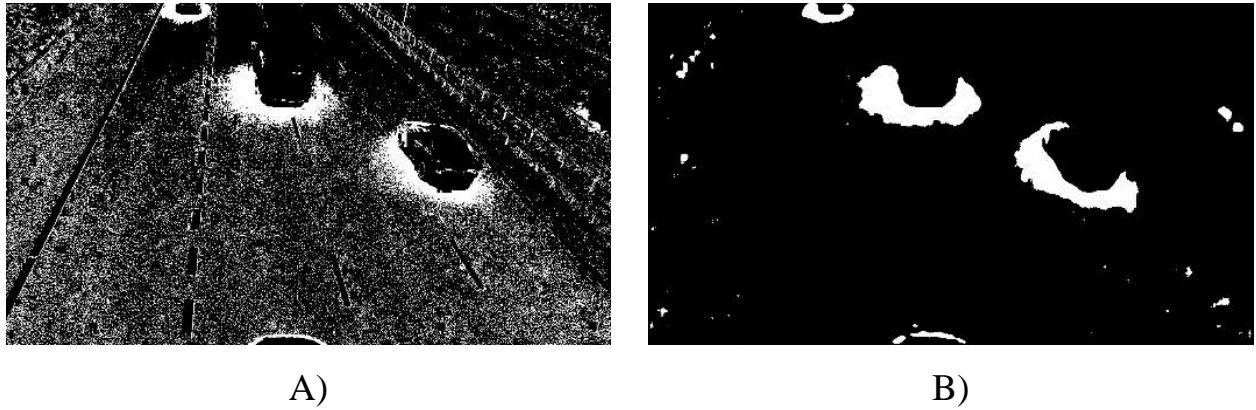


Рис. 4.6. Бінарна маска рухомих тіней  $D_t$ : А) визначена з врахуванням критеріїв (4.14) – (4.16), В) після морфологічної фільтрації

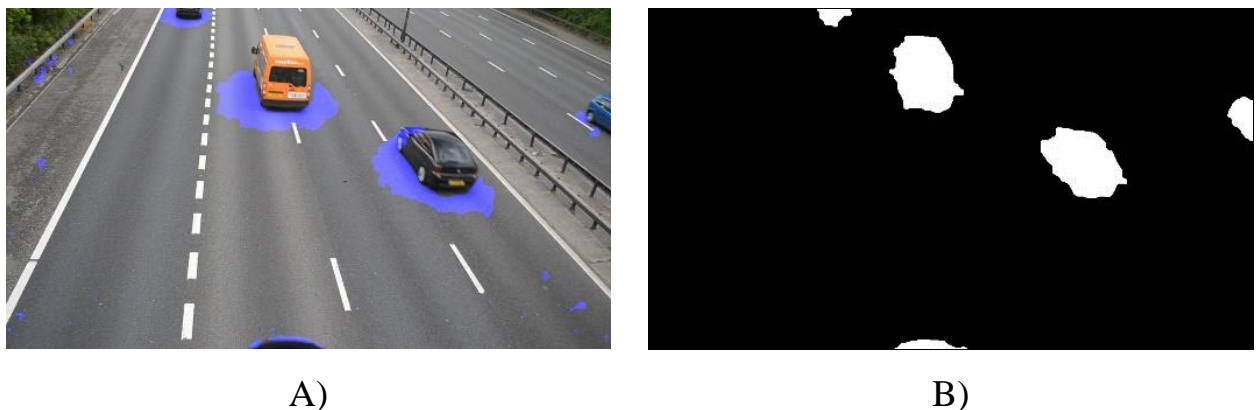


Рис. 4.7. Видалення рухомих тіней: А) розташування рухомих тіней на поточному кадрі  $I_t$ , В) виділені рухомі об'єкти з усуненням тіней

При порівнянні, зображення представленого на рис. 4.4, В та зображення представленого на рис. 4.7, В видно, що детекція рухомих тіней та їх усунення з результату виявлення рухомих об'єктів дає змогу більш точно виділяти площу рухомих об'єктів.

На рис. 4.8 представлена структура алгоритму виявлення рухомих об'єктів, який реалізує процес виявлення руху паралельно двома методами: методом міжкадрової різниці та методом віднімання фону, а також виконує детекцію

рухомих тіней з метою їх компенсації для покращення результату виявлення руху (рис. 4.9).

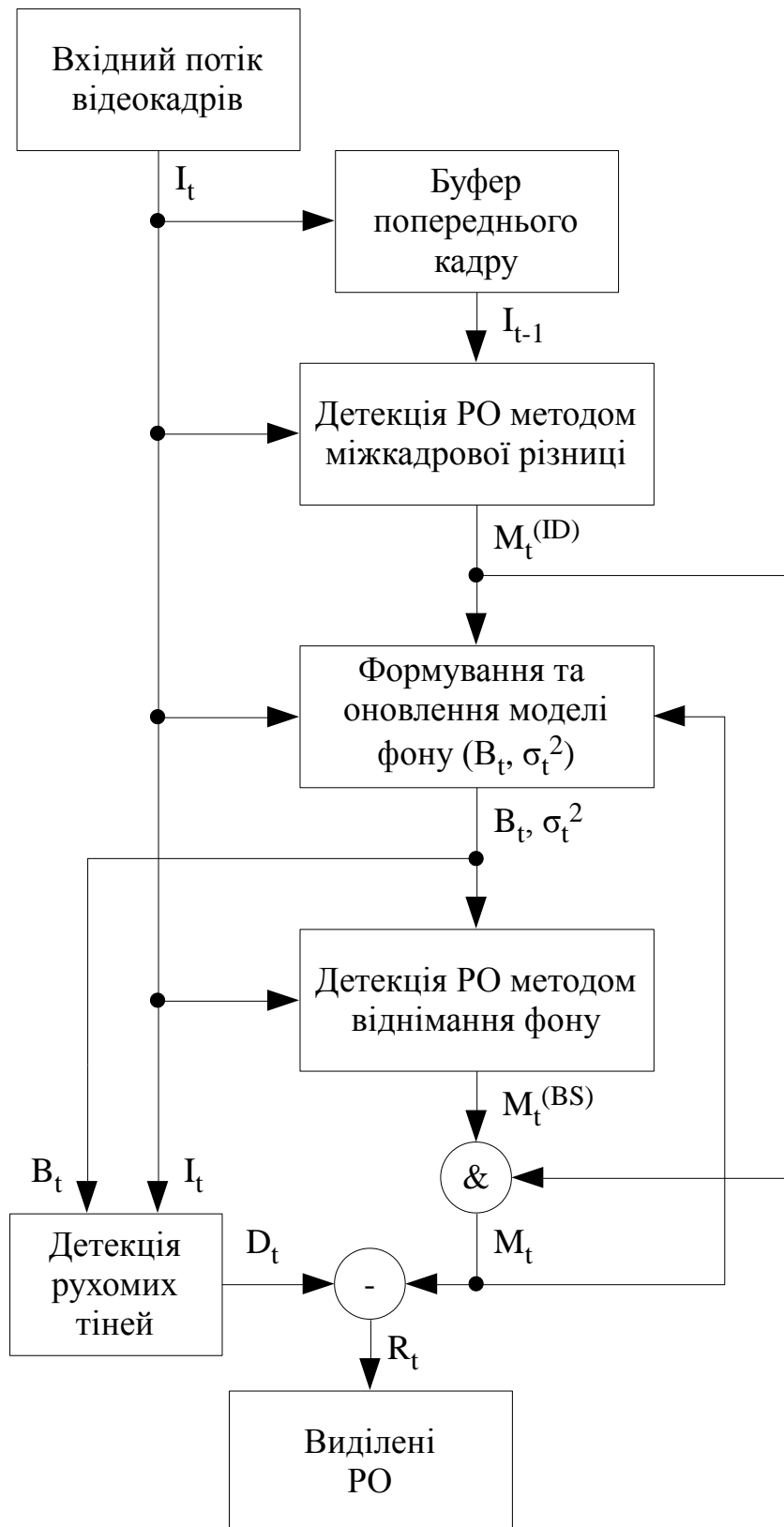


Рис. 4.8. Блок-схема запропонованого алгоритму виявлення рухомих об'єктів



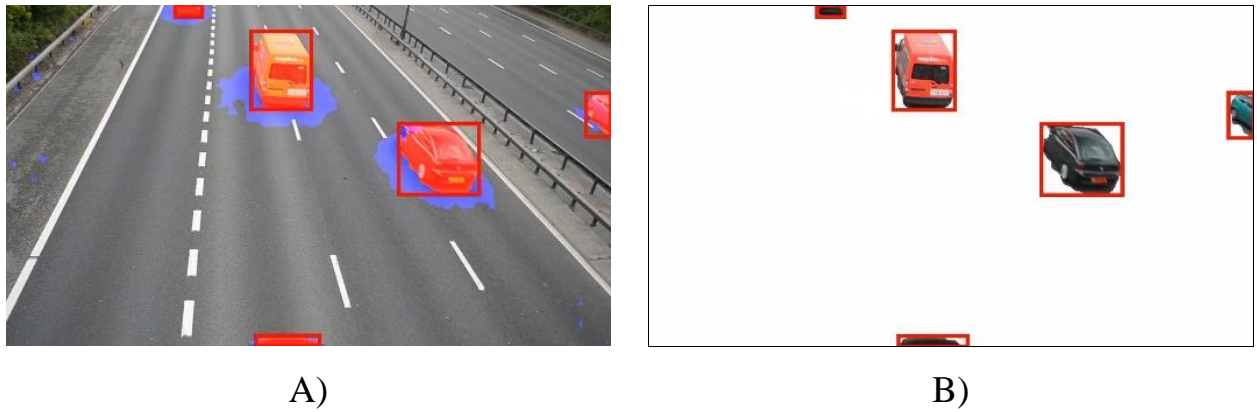


Рис. 4.9. Виявлені рухомі об'єкти: А) зображення виявлених рухомих об'єктів, де червоний колір відповідає об'єкту, а синій його тіні; В) зображення виявлених рухомих об'єктів в їх природніх кольорах, без фону

Отже, запропонований адаптивний алгоритм виявлення рухомих об'єктів дає змогу ефективно виявляти рухомі об'єкти при наявності дестабілізуючих факторів, зокрема:

- дає змогу виконувати коректне формування моделі фону навіть при наявності інтенсивного руху в полі зору камери;
- адаптується, як в просторі так і в часі, до зміни рівня шумів цифрової відеокамери та зміни фону;
- статистична оцінка порогу бінаризації, яка здійснюється під час роботи алгоритму, дає змогу використовувати даний алгоритм практично з будь-якою цифровою відеокамерою, незалежно від рівня її власних шумів, без емпіричного налаштування параметрів алгоритму;
- видалення рухомих тіней дає змогу усунути їх негативний вплив на якість виявлення рухомих об'єктів;
- візуалізація результатів виявлення шляхом виділення площі рухомих об'єктів в їх природніх кольорах без малоінформативного фону дає змогу значно зменшити об'єм даних, які надходять з відеокамери.

#### 4.1.2. Результати виявлення рухомих об'єктів по комплексованому відеосигналу

Для виявлення рухомих об'єктів по комплексованому відеосигналі проведемо комплексування двох відеосигналів, отриманих каналами МСМ у видимому та ІЧ діапазонах за допомогою запропонованого в розділі 2 методу. Вхідні відеосигнали попередньо синхронізовані в часі (при реєстрації) та просторі за допомогою методики наведеної в п. 2.1. Відеосигнали мають тривалість 4,32 с з частотою кадрів – 29,97 кадрів/с та складаються з 8312 кадрів розміром 1632×1000 пікселів. На рис. 4.10 наведено кадри під № вхідних відеосигналів, а на рис. 4.11 відповідний їм кадр комплексованого відеосигналу.



Рис. 4.10. Кадри №694 вхідних відеосигналів: А) з видимого каналу, основою якого є камера Panasonic HDC-TM700, В) з ІЧ каналу, основою якого є камера FLIR Prism DS

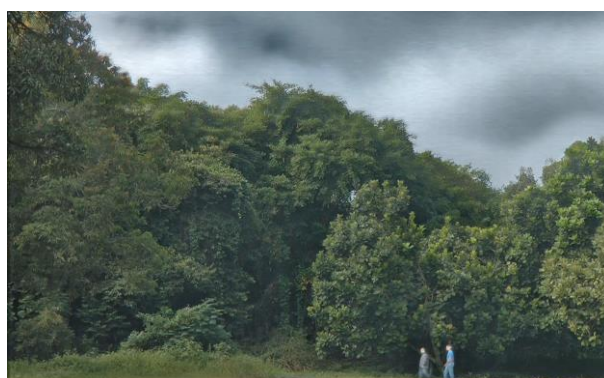


Рис. 4.11. Кадр №694 комплексованого відеосигналу

На рис. 4.12 приведено графік оцінювання інформативності кадрів комплексованого та вхідних відеосигналів. Як видно з графіка, інформативність кадрів комплексованого відеосигналу практично на усьому проміжку часу є більшою від інформативності кадрів вхідних відеосигналів.

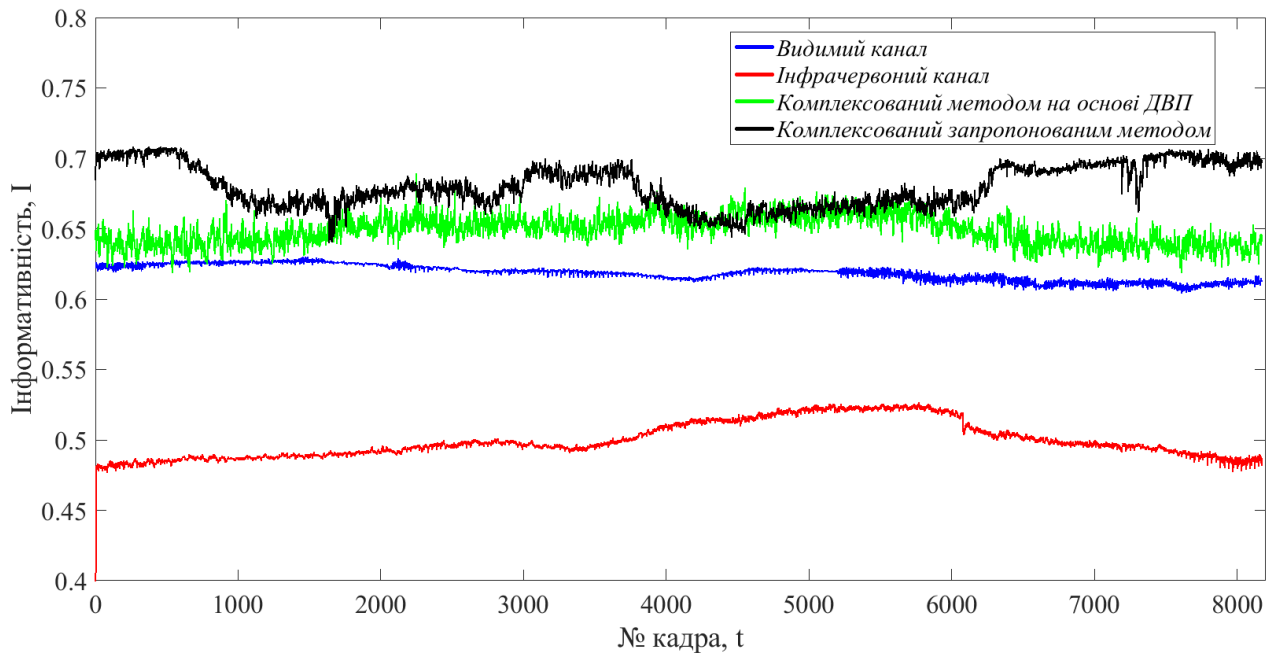


Рис. 4.12. Інформативність кадрів вхідних та комплексованих відеосигналів

Проведемо виявлення рухомих об'єктів по комплексованому відеосигналі. Для цього до комплексованого відеосигналу застосуємо запропонований в п. 4.1.1 алгоритм виявлення рухомих об'єктів.

На рис. 4.13 представлено криві отримані в результаті формування та оновлення: фону, оцінки дисперсії шуму та порогів бінаризації для одного з пікселів кадрів комплексованого відеосигналу. З рис. 4.13 видно, як система адаптується до зміни яскравості пікселя в часі, зокрема як збільшуються, а потім зменшуються, значення порогів бінаризації при зміні рівня шуму. На рис. 4.14 наведено зображення сформованого фон, а на рис. 4.15 – виявлені рухомі об'єкти.

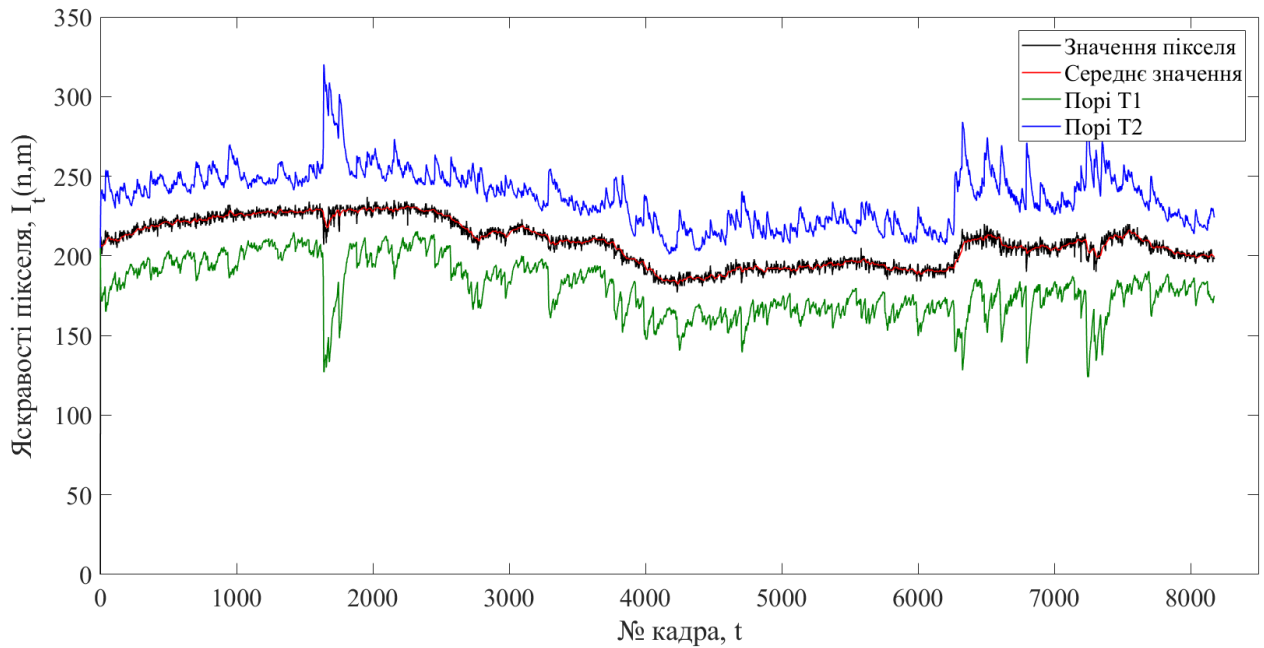


Рис. 4.13. Приклад визначення фону і дисперсії шуму та їх корекції для пікселя у комплексованому відеосигналі на протязі 8312 кадрів тестового відеосигналу



Рис. 4.14. Сформований фон для комплексованого відеосигналу



Рис. 4.15. Виділені рухомі об'єкти на кадрі №694 комплексованого відеосигналу

#### **4.2. Імовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єктів МСМ з комплексуванням зображень**

МСМ, що має у своєму складі видимий та інфрачервоний канали моніторингу є ОЕСМ і належить до іконічних систем, тобто споживачем кінцевої інформації є людина-оператор [103]. Сприйняття зображення оператором і ймовірність виявлення ним об'єктів інтересу на цьому зображенні є складною функцією, що залежить від характеристик [105]:

- об'єкта спостереження (контрасту, розмірів, форми, розміщення, орієнтації та швидкості руху);
- середовища (параметрів поширення ЕМХ, щільності та складності завад при їх наявності);
- характеристик СМ (передавальної функції та пов'язаних із нею показників просторового розділення, частоти кадрів, ВСШ);
- характеристик системи відображення інформації – дисплея (функції передачі сірої шкали градацій яскравості, динамічного діапазону яскравості, роздільної здатності, розмірів екрана);
- характеристик спостерігача (оператора) (особливостей зору, тренуваності, інтелекту).

Таким чином, ефективність моніторингу буде залежати від ефективності усіх ланок інформаційного комплексу: фоно-цільова обстановка – СМ – оператор.

При оцінці ефективності моніторингу за допомогою МСМ, можна використати традиційний підхід до оцінювання ефективності одноканальних СМ, а саме за допомогою такої “споживчої” характеристики, як імовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації. Причому в даному випадку необхідно врахувати як процеси формування зображень в окремих каналах, так і особливості їх комплексування та зорового сприйняття оператором комплексованого зображення. За основу показника, який враховує вище сказані особливості можна взяти один із найбільш адекватних на сьогодні – показник

успішності виконання завдання (*англ. Targeting Task Performance (TTP) Metric*) [104], що розроблений відділом моделювання та симуляції, управління нічного бачення та електронних сенсорів армії США (*англ. Modeling and Simulation Division Night Vision and Electronic Sensors Directorate U.S. Army*), який також використовується в [7, 103] для оцінювання ефективності мультиспектральних ОЕСМ.

Отже, імовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта СМ можна визначити за формулою [104]:

$$P_{\text{завд}}(R) = \frac{(V(R)/V_{50})^{E(R)}}{1 + (V(R)/V_{50})^{E(R)}} \quad (4.17)$$

де  $R$  – відстань до об'єкта;  $V(R)$  – число штрихів, що розміщуються на зображенні об'єкта;  $V_{50}$  – число штрихів, що розділяються, необхідних для забезпечення 50% імовірності правильного розв'язку залежно від змісту задачі;  $E(R) = 1,51 + 0,24(V(R)/V_{50})$  – емпірично визначена величина, що залежить від спектрального діапазону та відношення  $V(R)/V_{50}$ .

Число штрихів  $V(R)$  визначається на основі показника успішності виконання завдання системою  $TTP$  [104]:

$$V(R) = \frac{\sqrt{A} \times TTP}{R}, \quad (4.18)$$

де  $A_T$  – площа об'єкта (цілі).

В одномірному випадку  $TTP$  визначається як:

$$TTP = \int_{f_1}^{f_2} \sqrt{\frac{C_T}{CTF_{SYS}(f)}} df, \quad (4.19)$$

де  $C_T$  – контраст об'єкта (цілі);  $CTF_{SYS}(f)$  – функція порогового контрасту (ФПК) системи (*від англ. Contrast Threshold Function*);  $f_1, f_2$  – найнижча та найвища частоти, відповідно, в діапазоні яких контраст об'єкта перевищує значення ФПК системи.

Оскільки, вихідним сигналом системи є зображення, яке є двовимірним сигналом то (4.19) для двовимірного випадку прийме вигляд:



$$TTP = \left[ \int_{f_{y1}}^{f_{y2}} \int_{f_{x1}}^{f_{x2}} \frac{C_T}{\sqrt{CTF_{SYS}^H(f_x) \times CTF_{SYS}^V(f_y)}} df_x df_y \right]^{1/2}, \quad (4.20)$$

де  $CTF_{SYS}^H(f_x)$  – горизонтальна та  $CTF_{SYS}^V(f_y)$  – вертикальна складові ФПК системи.

Горизонтальну складову ФПК системи  $CTF_{SYS}^H(f_x)$  можна визначити за наступним виразом:

$$CTF_{SYS}^H(f_x) = \frac{CTF_{EYE}(f_x/k)}{MTF_D(f_x)MTF_O(f_x)MTF_S(f_x)} \times \left( 1 + \frac{\alpha^2 \sigma QH_h(f_x) QV_h}{L^2} \right)^{1/2}, \quad (4.21)$$

де  $CTF_{EYE}(f_x/k)$  – ФПК ока спостерігача при спостереженні з дисплея (екрана);  $k$  – збільшення системи;  $MTF_D(f_x)$ ,  $MTF_O(f_x)$  і  $MTF_S(f_x)$  – модуляційні передавальні функції (МПФ) дисплея, оптичної системи та сенсора (МПВ – матричного приймача випромінювання), відповідно;  $QH_h(f_x)$  – горизонтальна та  $QV_h$  – вертикальна шумові смуги для одновимірної синусоїдальної тестової міри;  $\alpha$  – коефіцієнт пропорційності;  $\sigma$  – СКВ шуму дисплея;  $L$  – середня яскравість дисплея.

Вертикальна складова ФПК системи  $CTF_{SYS}^V(f_y)$  визначається аналогічно до  $CTF_{SYS}^H(f_x)$ , з заміною горизонтальної шумові смуги  $QH_h(f_x)$  на  $QH_v$  та вертикальної  $QV_h$  на  $QV_v(f_y)$ , відповідно.

Показник успішності виконання завдання для МСМ з комплексуванням  $TTP_F$  визначається шляхом зваженого сумування показників успішності виконання завдання окремих каналів:

$$TTP_F = w \times [CC(A, F) \times TTP_A + CC(B, F) \times TTP_B], \quad (4.22)$$

де  $TTP_A$ ,  $TTP_B$  – показники успішності виконання завдання ведучого та допоміжного каналів, відповідно;  $CC(\cdot)$  – коефіцієнт кореляції між зображеннями;  $w$  – ваговий коефіцієнт який враховує інформативність вхідних зображень  $I_A$  і  $I_B$  та комплексованого зображення  $I_F$ :

$$w = \frac{2I_F}{I_A + I_B}. \quad (4.23)$$

Оцінимо ефективність мультиспектральної ОЕСМ яка має у своєму складі видимий та ІЧ канали.

Основою ІЧ каналу є камера FLIR Prism DS, а видимого каналу – камера Panasonic HDC-TM700. Параметри камер наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

### Параметри видимого та ІЧ каналів МСМ

Ланка ОЕСМ	Параметри	Видимий канал	ІЧ канал
Оптична система	Діаметр апертури об'єктива, мм	46	50
	Фокусна відстань об'єктива, мм	41,4	25
Сенсор	Розмір пікселя, мм	2,5×2,5	30×30
	Робочий спектральний діапазон, мкм	0,42 – 0,76	3,6 – 5
	Формат	1920×1080	320×244

Для моделювання об'єкта скористаємось стандартом NATO STANAG №4347 [106], згідно з яким тест-об'єктом є абсолютно чорне тіло (АЧТ), що має розмір  $2,3 \times 2,3$  м з температурним контрастом  $\Delta T = 2^\circ K$  на фоні з температурою  $T_B = 288^\circ K$ . В цьому ж стандарті визначено показник ослаблення атмосфери  $\tau = 0,2 \text{ км}^{-1}$  – за хороших погодних умов та  $\tau = 1 \text{ км}^{-1}$  – за поганих погодних умов. МПФ оптичної системи, вважаючи, що вона дифракційно обмежена, знаходимо за формулою, наведеною в [107], МПФ сенсора і дисплея – в [107], МПФ ока – в [104], ФПК ока – в [110], шумові смуги – в [109]. Вхідними даними для розрахунків будуть [103, 104, 108, 109]: коефіцієнт пропорційності для видимого каналу  $\alpha = 169,6 \sqrt{\text{Гц}}$ , коефіцієнт пропорційності для ІЧ каналу  $\alpha = 862 \sqrt{\text{Гц}}$ , СКВ шуму дисплея  $\sigma = 0,02 \text{ с} \times \text{мрад}^2 \times \text{кд/м}^2$ , середня яскравість дисплея –  $17 \text{ кд/м}^2$ .



Скориставшись формулами (4.20) і (4.21), знаходимо діапазон частот, який передається видимим каналом (від 0 до 6,5 мрад<sup>-1</sup>), діапазон частот, що передається ІЧ каналом (від 0 до 0,53 мрад<sup>-1</sup>). В результаті інтегрування згідно з формулою (4.20) визначаємо показник успішності виконання завдання в діапазоні частот, що передаються каналами та отримаємо: для ІЧ каналу в діапазоні частот від 0 до 0,53 мрад<sup>-1</sup> –  $TTP = 4,98$ ; для видимого каналу в діапазоні частот від 0 до 6,5 мрад<sup>-1</sup> –  $TTP = 36,5$ .

Для подальших розрахунків недостатньо тільки параметрів ОЕСМ і зорової системи спостерігача – необхідні реальні зображення. Для прикладу скористаємось ІЧ та видимим зображеннями (рис. 4. 10), отриманих, відповідно за допомогою камер FLIR Prism DS та Panasonic HDC-TM700 та комплексованим на їх основі зображенням (рис. 4.11). Знаходимо інформативність цих зображень та кореляцію між ними і підставивши отримані результати спочатку в (4.23), а потім в (4.22) отримаємо показник успішності виконання завдання для системи з комплексуванням –  $TTP_F = 40,79$ . Підставивши його в (4.18) отримаємо залежності імовірності виявлення (рис. 4.16), розпізнавання (рис. 4.17) та ідентифікації (рис. 4.18) при необхідній кількості штрихів, що розділяються для забезпечення 50% ймовірності правильного виявлення –  $V_{50} = 2,7$ , розпізнавання –  $V_{50} = 14,5$  та ідентифікації –  $V_{50} = 18,8$  [104].

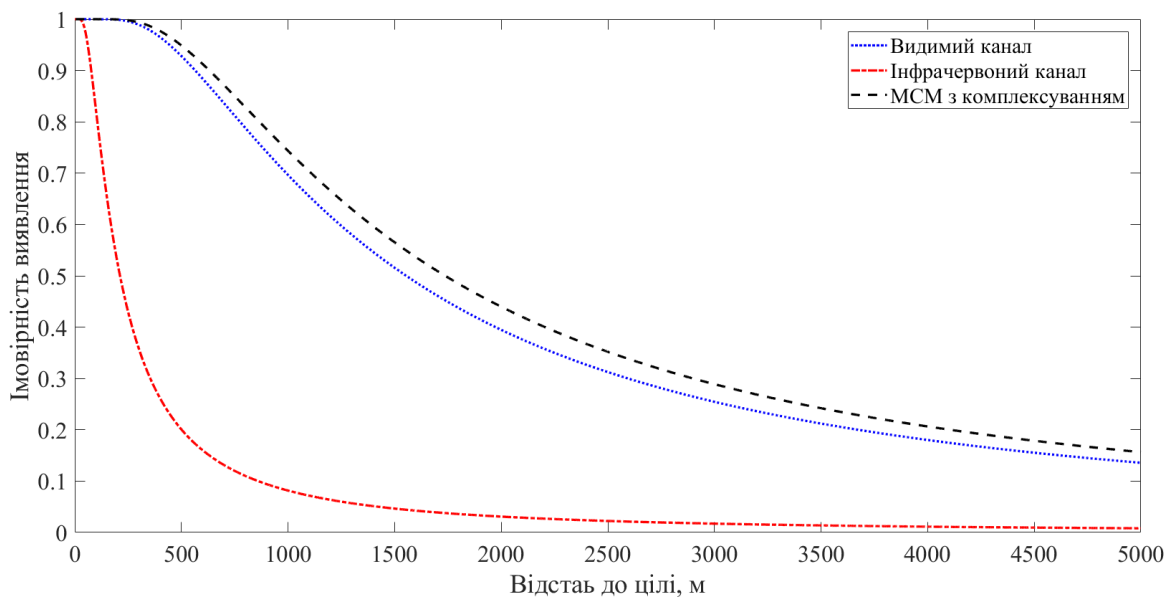


Рис. 4.16. Залежність імовірності виявлення від віддалі до цілі

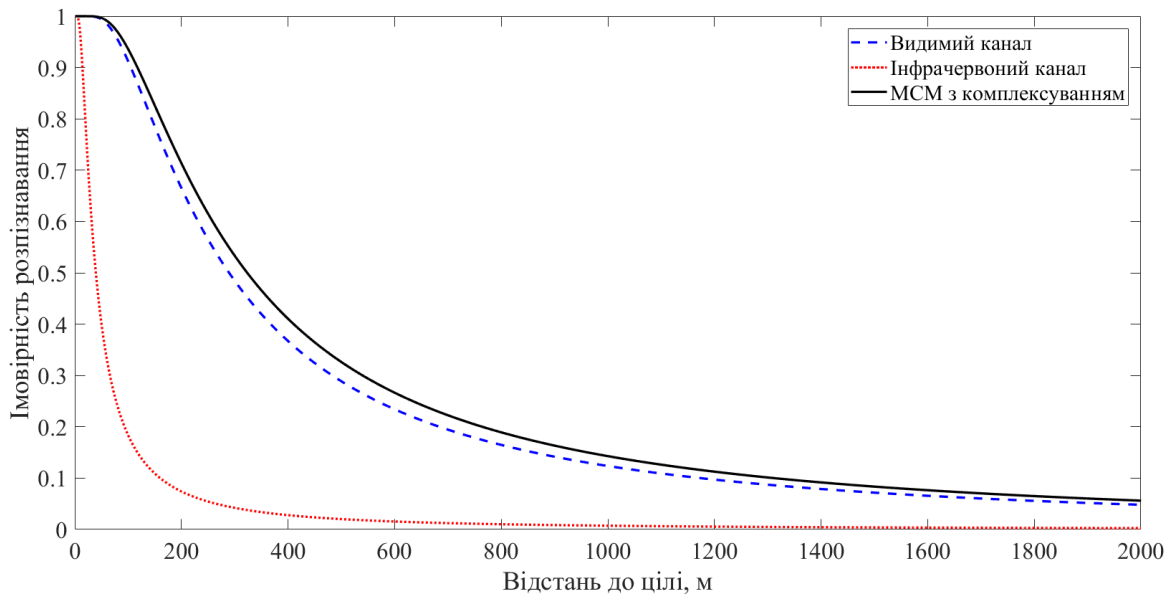


Рис. 4.17. Залежність ймовірності розпізнавання від віддалі до цілі

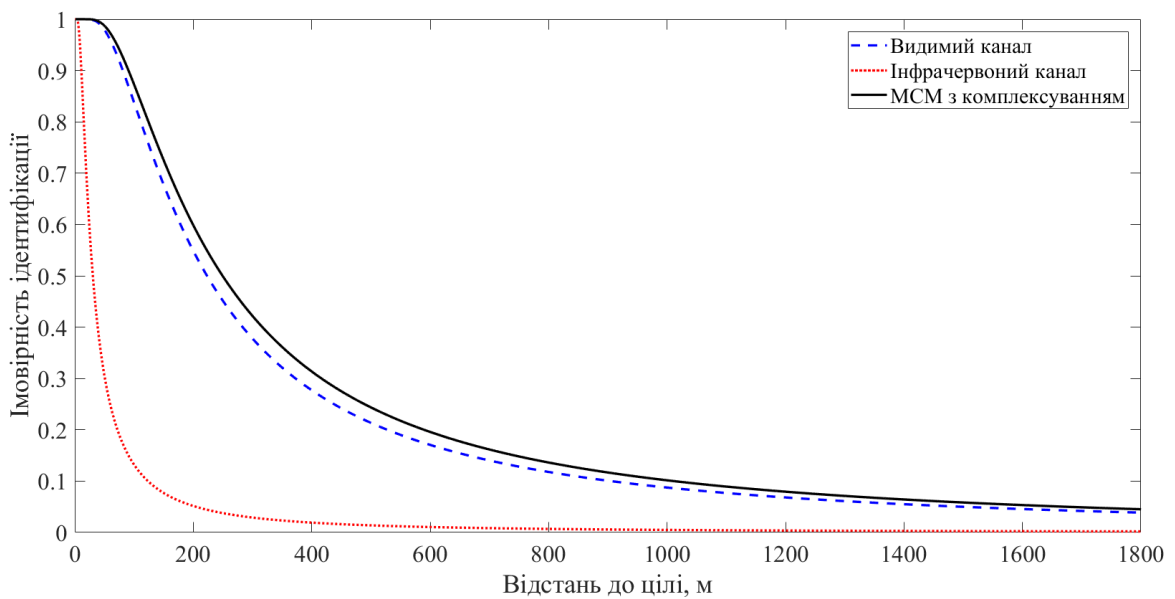


Рис. 4.18. Залежність ймовірності ідентифікації від віддалі до цілі

Значно менша дальність виконання поставленої задачі (див. табл. 4.2) для ІЧ каналу порівняно з видимим каналом пов'язана з значно меншою роздільною здатністю його сенсора (див. табл. 4.1).

Таблиця 4.2

**Максимальні дальності виконання завдання з імовірністю 0,5**

Задача	Максимальна дальність виконання задачі для каналу, м			Виграш від використання комплексування, %
	Видимого	Інфра-червоного	Комплексованого	
Виявлення з імовірністю 0,5	3110	425	3476	11,78%
Розпізнавання з імовірністю 0,5	580	80	648	11,72%
Ідентифікація з імовірністю 0,5	448	62	500	11,61%

Як видно з рис. 4.16 – рис. 4.18 та табл. 4.2 використання комплексування збільшує віддаль для реалізації поставленої задачі (при імовірності 0,5) порівняно з роздільним використанням каналів і дає виграш на рівні  $\approx 11\%$  у випадку використаної конфігурації каналів МСМ (табл. 4.1).

### **4.3. Рекомендації по створенню апаратних засобів комплексування зображень для мультиспектральних систем моніторингу**

На рис. 4.19 представлено рекомендований варіант організації сенсорної частини МСМ. На даному рисунку сенсори видимого та ІЧ каналу розміщуються під кутом  $90^\circ$ , а між ним в оптичній площині під кутом  $45^\circ$  до входної зіниці розміщується дзеркало LWIR діапазону, котре має малий коефіцієнт відбиття в видимому діапазоні ЕМХ, пропускаючи ЕМХ даного діапазону для реєстрації відповідною камерою, і має близький до 1 коефіцієнт відбиття в тепловому (LWIR) діапазоні, відбиваючи ЕМХ даного діапазону на відповідну камеру для їх реєстрації.

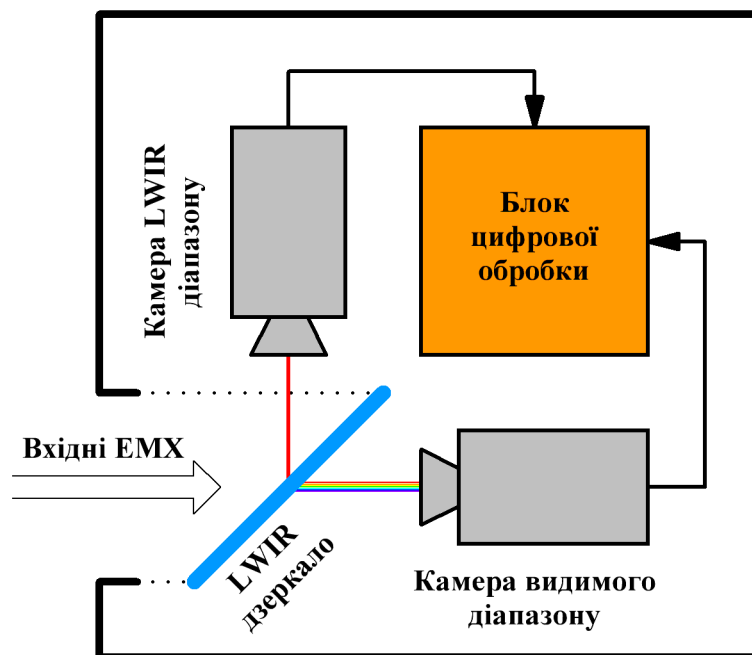


Рис. 4.19. Схематичне розташування сенсорів МСМ

Зареєстровані камерами сигнали надходять в блок цифрової обробки, котрий опціонально реалізує необхідну обробку цих сигналів, зокрема просторову синхронізацію зображень їх комплексування та виявлення руху.

Апаратно блок цифрової обробки може бути реалізований на цифрових медіапроцесорах від Texas Instruments сімейства DaVinci™ [111] (рис. 4.20). Системні функції програми обробки виконує процесор TMS320DM6446 [112], який характеризується високою інтегрованістю периферійних пристроїв. Процесор містить два ядра: ARM9 (300 МГц) і DSP C64x+ (600 МГц). Ядро ARM9 займається обслуговуванням периферійних пристроїв, комунікаційних інтерфейсів і операційної системи (ядро ARM9 дає змогу використовувати ОС Linux), в той час як DSP-ядро бере на себе складні математичні розрахунки при реалізації відеоаналізу. При необхідності, для збільшення продуктивності пристрою, а саме для побудови складних функцій аналізу відеосигналу, спільно з TMS320DM6446 можна використовувати процесор на основі DSP-ядра TMS320DM643 [113]. Дані процесори дозволяють реалізувати кодування в форматах H.264 / MPEG4 D1 до 30 кадрів/с, JPEG. Вони сумісні по виходах, що дає змогу оптимізувати систему по продуктивності і ціні.

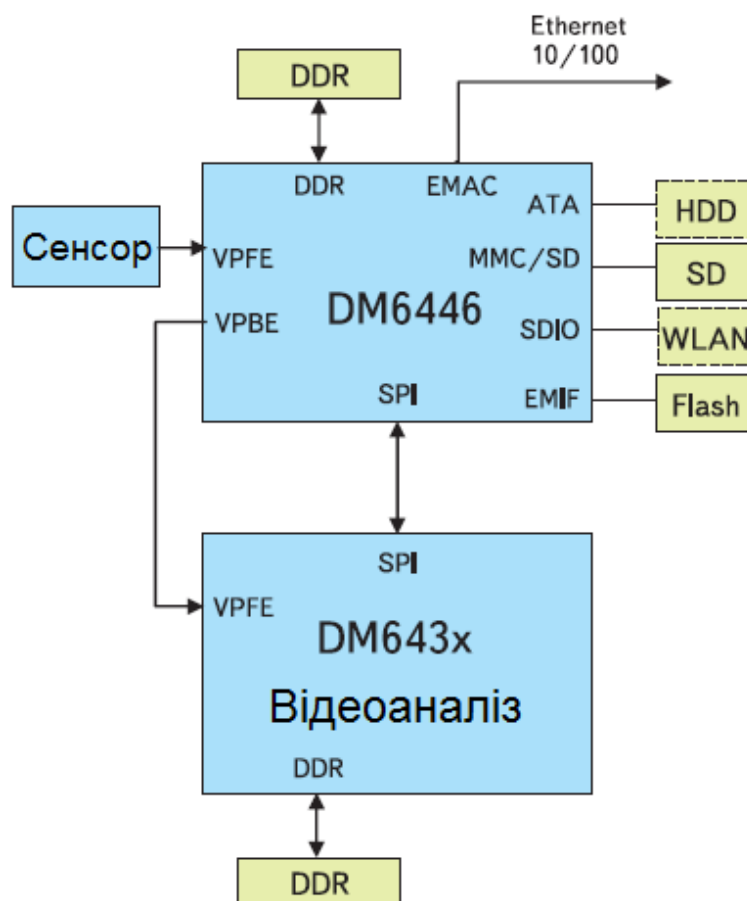


Рис. 4.20. Процесорний модуль інтелектуальної системи відеоаналізу на базі прикладних сигнальних процесорів TMS320DM6446 і TMS320DM643

Така реалізація блоку цифрової обробки характеризується підтримкою декількох потоків відео (що дуже зручно при реалізації СМ яка має в своєму складі декілька каналів спостереження) і можливістю реалізації складних функцій відеоаналізу.

#### Висновки до розділу 4

Таким чином в четвертому розділі:

1. Запропоновано адаптивний метод виявлення рухомих об'єктів у відеосигналі, котрий здатний адаптуватися до зміни фону на протязі часу спостереження та до зміни рівня шумів камери, як в часі так і в просторі. Складовою частиною методу виявлення руху є алгоритм детекції тіней,

використання якого дає змогу усунути їх негативний вплив на точність виявлення руху.

2. Проведено комплексування двох відеосигналів з видимого та ІЧ каналів в єдиний відеосигнал, кадри якого є більш інформативними порівняно з кадрами обох вхідних відеосигналів.

3. Проведене моделювання моніторингу об'єктів за допомогою МСМ з комплексуванням каналів видимого та інфрачервоного діапазонів по комплексованому відеосигналі та обчислення імовірностей виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єктів показує, що застосування комплексування зображень під час моніторингу в МСМ дає змогу збільшити віддаль виконання поставленої задачі в середньому на 11-12% (при конкретних параметрах камер каналів спостереження, що вказані при розрахунках в розділі).

4. Представлено рекомендації по організації структури сенсорної частини МСМ, що складається з двох каналів: видимого та інфрачервоного (LWIR). Виконано вибір процесорів для реалізації блоку цифрової обробки зображень, на якому можуть бути реалізовані запропоновані та використані алгоритми.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язано актуальне науково-технічне завдання підвищення інформативності мультиспектральних систем моніторингу, що мають у своєму складі канали спостереження видимого та інфрачервоного діапазонів, та зменшення кількості надлишкової інформації, яка надходить до людини-оператора системи за допомогою мультимодального комплексування зображень для підвищення ефективності виявлення об'єктів у складних умовах спостереження. При розв'язанні поставленого завдання отримані наступні наукові та практичні результати:

1. Проведено аналіз парціальних спектральних каналів які використовуються в мультиспектральних оптико-електронних системах моніторингу об'єктів та сцен, та методів комплексування зображень, одержаних цими каналами в різних спектральних діапазонах. Досліджено переваги та недоліки існуючих методів підвищення ефективності СМ. Обґрунтовано, що підвищити ефективність оптико-електронних СМ, а саме їх інформативність можливо при розробці нового методу комплексування зображень, одержаних парціальними каналами видимого та інфрачервоного (теплого) діапазонів, за рахунок об'єднання на одному мультиспектральному зображенні інформації з видимого зображення про текстуру об'єктів з високою просторовою роздільною здатністю та інформації з інфрачервоного зображення про теплові контрасти об'єктів.

2. Вперше розроблено метод та алгоритм мультимодального комплексування зображень видимого та ІЧ діапазонів на основі дискретного вейвлет перетворення в якому, на відміну від відомих методів, формування низькочастотних вейвлет-коефіцієнтів результуючого вейвлет-спектра комплексованого зображення базується на основі регресійного аналізу відповідних частин вейвлет-спектрів вхідних зображень, що дало змогу підвищити інформативність комплексованого зображення приблизно на 10% (значення справедливе для використаних в роботі сенсорів або їм

еквівалентних), а також зменшити обсяг даних без втрати корисної інформації в середньому на 26.72%, порівняно з сумарним обсягом даних, що отримуються каналами видимого та ІЧ діапазонів. Продовження отримала модель комплексування зображень, яка внаслідок удосконалення, передбачає одержання кольорового комплексного зображення, яке є більш адаптованим для психофізичного сприйняття людиною-оператором в порівнянні з комплексуванням у градаціях сірого.

3. На основі моделювання та аналізу методів просторової прив'язки зображень обґрунтовано, що для точної просторової синхронізації різноспектральних зображень доцільно використовувати критерій, який на основі визначених окремих ентропій парціальних зображень та спільної ентропії цих зображень, передбачає максимізацію функції взаємної інформації, оскільки він є інваріантним до просторового розподілу яскравості за площею зображення. Результати моделювання просторової синхронізації зображень видимого та інфрачервоного діапазонів показують ефективність цього підходу навіть при погіршених погодних умовах.

4. Удосконалено багатокритеріальну метрику оцінювання інформативності зображень невідомого сюжетного змісту шляхом заміни ентропії зображення, як одного з критеріїв метрики, на градієнт зображення; порогового обмеження кількості значущих градацій яскравості; проведення оцінювання коефіцієнта контрасту зображення на основі середніх значень контрастів в його локальних областях. В результаті, внесені зміни дали змогу наблизити точність оцінювання інформативності зображень запропонованим методом до експертних оцінок, порівняно з іншими методами, а саме: коефіцієнт кореляції складає 0.801 (в 1.45 рази більший), а середньоквадратична похибка дорівнює 0.883 (у 1.41 рази менша) у порівнянні з широко вживаним методом ентропії, для якого коефіцієнт кореляції складає 0.552, а середньоквадратична похибка дорівнює 1.249;

5. Розроблено адаптивний до дестабілізуючих факторів метод та алгоритм виявлення рухомих об'єктів під час відеомоніторингу. Усунено



негативний вплив рухомих тіней на виявлення об'єктів, шляхом їх детекції та компенсації.

6. Проведено комп'ютерне моделювання та дослідження функціонування мультиспектральної системи моніторингу з комплексуванням зображень видимого та інфрачервоного діапазонів при спостереженні за рухомими об'єктами. Визначено імовірності виявлення об'єктів мультиспектральною системою моніторингу поканально та при застосуванні розробленого методу комплексування зображень. Внаслідок комплексування зображень двох каналів збільшується імовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єктів, що, в свою чергу, зумовлює збільшення потенційної віддалі спостереження на 11%.

7. Розроблено структурну схему та елементи архітектури блоку цифрової обробки і комплексування різноспектральних зображень та рекомендації щодо апаратної реалізації мультиспектральної оптико-електронної системи моніторингу з комплексуванням різноспектральних зображень, що має у своєму складі парціальні канали видимого та інфрачервоного діапазонів спектру електромагнітних хвиль на базі прикладних сигнальних процесорів TMS320DM6446 і TMS320DM643.

Всі положення, подані в дисертаційній роботі, обґрунтовані на основі відомих положень теорії інформації, математичної статистики, оптики, апробованих методів цифрової обробки сигналів і зображень, а також підтверджені числовими експериментами та комп'ютерним моделюванням.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Pohl, Christine and John Van Genderen. Remote sensing image fusion: A practical guide. Crc Press, 2016.
2. Lillesand, Thomas, Ralph W. Kiefer, and Jonathan Chipman. Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons, 2014.
3. Левшин В. Л. Биокрибернетические оптико-электронные устройства автоматического распознавания изображений. – М.: Машиностроение, 1987.
4. Великий тлумачний словник сучасної української мови / Уклад. і гол. ред. В. Т. Бусел. – К.; Ірпінь: ВТФ «Перун», 2005. – 1728 с.
5. Schowengerdt R. A. Remote sensing: models and methods for image processing. Elsevier, 2006.
6. Coffey, Valerie C. Multispectral imaging moves into the mainstream: Optics and Photonics News, 23.4 (2012): 18-24.
7. Колобродов В. Г., Микитенко В. І. Комплексування інформації в багатоканальних оптико-електронних системах спостереження: монографія. – Київ: «Аверс», 2013.
8. Дистанционное зондирование: количественный подход / Ш. М. Дейвис, Д. А. Ландгребе, Т. Л. Филипс и др. Под ред. Ф. Свейна и Ш. Дейвиса. // Пер. с англ. – М.: Недра, 1983.
9. Systematic Observation Requirements for Satellite-based Products for Climate, September 2006 / [http://gosc.org/ios/GCOS\\_main\\_page.htm](http://gosc.org/ios/GCOS_main_page.htm)
10. Пат. 70868 UA Україна, МПК G 01 J 11/00, G 01 S 13/00. Спосіб дистанційного моніторингу земної поверхні та інтегрована система для його реалізації / А.М. Зубков, І.Н. Прудіус, Л.М. Смеркло; заявник і власник патенту Національний університет «Львівська політехніка». – № 20031213144; заявл. 30.12.03; опубл. 15.10.2004, Бюл. № 10.
11. Gross Herbert, Blechinger Fritz, Aichtner Bertram. [Handbook of optical systems, volume 4: Survey of Optical Instruments](#). Wiley-VCH, 2008.

12. Фонд перспективных исследований: [конкурс на лучшую интеллектуальную технологию дешифрования аэрокосмической информации.](#)
13. [Limits of Resolution: The Rayleigh Criterion](#)
14. Kondratov P. Detection and allotment of the objects based on multispectral monitoring / P. Kondratov, A. Ohanesyan, V. Tkachenko, I. Prudyus, L. Lazko, A. Hryvachevskiy // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science TCSET'2016: intern. conf., February 23 – 26, 2016: proceed. of the conf. – Lviv-Slavske, Ukraine, 2016. – P. 259-262.
15. Sergiyenko Oleg and Julio C. Rodríguez-Quiñonez. Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision. Series: Advances in Computational Intelligence and Robotics. IGI Global, 2016.
16. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. – М.: Университетская книга; Логос, 2007. – 192 с.
17. Prudyus I. Sub-pixel Based Forming of High-resolution Images / I. Prudyus, V. Tkachenko, L. Lazko, S. Fabirovskyy, A. Gryvachevskyy // Computation Problems of Electrical Engineering (CPEE-2014): XV International Workshop, 9-12 September 2014.: proceedings of Workshop. – Zilina, Slovak Republic. – 2014. – p. 24.
18. Фабіровський С. Є. Формування зображень з підвищеною роздільною здатністю при субпіксельній обробці / С. Є. Фабіровський, А. П. Гривачевський // Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті: 19-й міжн. молодіж. форум, 20-22 квіт. 2015 р.: тези доп., том 3 – Х., 2015. – с. 104-105.
19. Wang Hu. The progress of sub-pixel imaging methods / Hu Wang, Wen Desheng // Proceedings of the SPIE, Volume 9142, Selected Papers from Conferences of the Photoelectronic Technology Committee of the Chinese Society of Astronautics: Optical Imaging, Remote Sensing, and Laser-Matter Interaction 2013, 91420K (21 February 2014).
20. Tidhar G., Schlisselberg R. Evolution path of MWS technologies: RF, IR and UV // SPIE Proc. 2005. Vol. 5783. P. 662-673.

21. Image Visual Quality Metrics Verification by TID2013: Exploring of Mean Square Error Drawbacks / N. Ponomarenko, V. Lukin, O. Ieremeiev, B. Vozel, K. Chehdi, K. Egiazarian, J. Astola // 5th European Workshop on Visual Information Processing. EUVIP'2014 : proceedings, 10–12 Dec. 2014, Paris, France / [IEEE et al.]. – [S. l.], 2014. – P. 29-34.

22. Капшій О. В., Коваль О. І., Русин Б. П. Вейвлет-перетворення у компресії та попередній обробці зображень. – Львів: Сполом, 2008. – 206 с.

23. Микитенко В. І. Комплексування зображень у цілодобових двоканальних системах спостереження / В. І. Микитенко, М. М. Балтабаєв, О. А. Пономаренко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2014. – №48. – с. 43-49.

24. Prudyus I. Factors affecting the quality of formation and resolution of images in remote sensing systems / I. Prudyus, V. Tkachenko, P. Kondratov, S. Fabirovskyy, L. Lazko, A. Hryvachevskiy // Computational Problems of Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 5, No. 1. – p. 41-46.

25. Hryvachevskiy A. The influence of destabilizing factors in the high resolution multispectral imaging systems / A. Hryvachevskiy, S. Fabirovskyy, L. Lazko, V. Tkachenko // 2017 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Odessa, 2017, pp. 1-4. [DOI: 10.1109/UkrMiCo.2017.8095371](https://doi.org/10.1109/UkrMiCo.2017.8095371)

26. Виноградов А. Н. Совместное использование сенсоров различных спектральных диапазонов для повышения распознаваемости зондируемых объектов / А. Н. Виноградов, В. В. Егоров, А. П. Калинин, А. И. Родионов, И. Д. Родионов, И. П. Родионова // ИКИ РАН – М., 2016. – 24 с.

27. Кисляков А. Н. Повышение эффективности алгоритмов комплексирования цифровых многоспектральных изображений земной поверхности: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.12.04 "Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения" / Кисляков Алексей Николаевич; Владимир. гос. ун-т им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. – Владимир, 2013. – 19 с.

28. Бондаренко А. В. Аппаратно-программная реализация мультиспектральной системы улучшенного видения / А. В. Бондаренко, М. А. Бондаренко // Современная электроника. – 2017. – № 1. – С. 32-37.
29. AbouRayan Mohamed. Real-time image fusion processing for astronomical images / Mohamed AbouRayan // Theses and Dissertations. – The University of Toledo, 2016. – P. 158.
30. Верба В. С. Интегрированные многодатчиковые комплексы мониторинга окружающего пространства / В. С. Верба, В. И. Меркулов, Д. А. Миляков, В. С. Чернов // Журнал радиоэлектроники, №4, 2015 – 51 с.
31. Du Jiao. An Overview of Multi-Modal Medical Image Fusion / Jiao Du, Weisheng Li, Ke Lu and Bin Xiao // Neurocomputing, 2015. – 35 P.
32. Sicong Zheng. Pixel-level Image Fusion Algorithms for Multicamera Imaging System. "Master's Thesis, University of Tennessee". Knoxville, – 2010. – P. 97.
33. Гривачевський А. П. Аналіз методів комплексування сигналів парціальних спектральних каналів в системах моніторингу об'єктів та сцен / А.П. Гривачевський // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2015. – № 818: Радіоелектроніка та телекомунікації. – с. 55-61.
34. Zyczkowski M. Multispectral solutions in surveillance systems: the need for data fusion. / M. Zyczkowski, M. Szustakowski, W. Ciurapinski, M. Kastek, R. Dulski, M. Karol, P. Markowski // Safety and Security Engineering, Vol. 134, – 2014. – P. 285-293.
35. Гривачевський А. П. Комплексування зображень в мультиспектральних системах моніторингу з сенсорами різної фізичної природи / А. П. Гривачевський, А. М. Зубков, Л. В. Лазько, Д. О. Мимріков, І. Н. Прудіус, С. Є. Фабіровський // Міжнародний радіоелектронний форум «Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку» (МРФ-2017), 10-13 жовтня, 2017 р., Харків. – С. 269–272.
36. Сагдуллаев Т. Ю. Информативность телевизионных изображений в системах видеонаблюдения объектов / Т. Ю. Сагдуллаев, Ю. С. Сагдуллаев //

Вопросы радиоэлектроники. Сер. «Техника телевидения». – 2009. – Вып. 2. – с. 41-51.

37. Москвитин А. Э. Технологии и алгоритмы повышения качества изображений земной поверхности на основе комплексирования спектрозональной видеоинформации: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.13.01 "Системный анализ, управление и обработка информации (Технические системы)" / Алексей Эдуардович Москвитин; Ряз. гос. радиотехн. акад. – Рязань, 2003. – 16 с.

38. Hryvachevskiy A. Methods of multispectral image fusion at the pixel level / A. Hryvachevskiy, I. Prudyus, L. Lazko and S. Fabirovskyy // 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske. – 2018. – pp. 102-107.

39. Танцюра О. Б. Аналіз методів комплексування різноспектральних зображень з використанням універсального показника якості // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2016. – № 4. – с. 152-156.

40. Васильев А. С. Методы комплексирования изображений в многоспектральных оптико-электронных системах / А. С. Васильев, А. В. Трушкина // ГрафиКон'2016: 26-я Международная конференция (Нижний Новгород, 19-23 сентября 2016 г.): труды конференции – 2016. – с. 314-318.

41. Pandit V. R. Image fusion in remote sensing applications: A review / V. R. Pandit, R. J. Bhiwani // International journal of computer applications. Vol. 120, No. 10. – 2015. – pp. 22-32.

42. 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.

43. Патент РФ №2451338. Способ комплексирования цифровых полутоновых телевизионных и тепловизионных изображений // А.П. Богданов, Л.Н. Костяшкин, А.В. Морозов, О.В. Павлов, Ю.Н. Романов, А.В. Рязанов.

44. Инсаров В. В. Проблемы построения систем технического зрения, использующих комплексирование информационных каналов различных спектральных диапазонов / В. В. Инсаров, С. В. Тихонова, И. И. Михайлов // Приложение к журналу "Информационные технологии" – 2014. – № 3. – М.: Новые технологии, 2014. – 32 с.

45. Михеев С. М. Комплексирование изображений разных диапазонов спектра в многоканальных системах наблюдения: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец.: 05.13.01 "Системный анализ, управление и обработка информации (Информатика, управление и вычислительная техника)", 05.11.16 "Информационно-измерительные и управляющие системы (авиационная и ракетно-космическая техника)" / Михеев Сергей Михайлович; Московский авиационный институт, Московский научно-исследовательский телевизионный институт. – М., 2011. – 24 с.

46. Дрынкин В. Н. Эффективность двухзональной бортовой авиационно-космической системы формирования комбинированного изображения / В. Н. Дрынкин, Э. Я. Фальков, Т. И. Царёва // Техническое зрение. – 2013. – Вып. 1(1). – с. 60-66.

47. Дрынкин В. Н. Формирование комбинированного изображения в двухзональной бортовой авиационно-космической системе / В. Н. Дрынкин, Э. Я. Фальков, Т. И. Царёва // Сборник трудов научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления – 2012» / Под ред. Р. Р. Назирова. М.: Механика, управление и информатика. – 2012. с. 33-39.

48. Kaur Harmandeep. Image fusion on digital images using Laplacian pyramid with DWT / Harmandeep Kaur, Jyoti Rani // Image Information Processing (ICIIP), 2015 Third International Conference on. IEEE, – 2015. – pp. 393-398.

49. Pradeep M. Implementation of image fusion algorithm using MATLAB (Laplacian pyramid) / M. Pradeep // Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing (imacs), 2013 International Multi-conference on. IEEE, – 2013. – pp. 165-168.

50. Zheng Y. Image Fusion and Its Applications / Y. Zheng // InTech. – 2011. – 252 p.
51. Mitchell H. B. Image Fusion: Theories, Techniques and Applications / H. B. Mitchell // Springer Science & Business Media. – 2010. – 247 p.
52. 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.
53. Гривачевський А. П., Підвищення інформативності мультиспектральних зображень шляхом мультимодального комплексування / А. П. Гривачевський, І. Н. Прудіус // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2018. – № 73. – с. 40-49.
54. Liu Z. Context enhancement through infrared vision: a modified fusion scheme / Z. Liu, R. Laganiere // Signal, Image and Video Processing, Vol. 1, No. 4. – 2007. pp. 293-301.
55. Signum-функція [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Signum-функція> – Заголовок з екрану.
56. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс // Техносфера. – М., 2005. – 1072 с.
57. Котельников В. А. О пропускной способности эфира и проволоки в электросвязи. – Всесоюзный энергетический комитет. // Материалы к I Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности, 1933.
58. Government & Defense [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.flir.eu/browse/government--defense/land-systems/fixed-surveillance/> – Заголовок з екрану.
59. 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”. – 2017. – № 874: Радіоелектроніка та телекомунікації. – с. 73-80.



60. Иванов Е. Л. Слияние изображений в многоканальной системе наблюдения местности / Е. Л. Иванов, М. С. Смагин // Датчики и системы. – 2006. – №11. с. 6-9.
61. 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.
62. Грузман И. С. Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учебное пособие / И. С. Грузман, В. С. Киричук, В. П. Косых, Г. И. Перетягин, А. А. Спектор. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с.
63. 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. – pp. 62-68.
64. 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.
65. 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.
66. Кривошеев М. И. Международные стандарты по цифровому телевизионному вещанию / М. И. Кривошеев, В. Федунин // Связь и телекоммуникации. – 2007. – № 8. – с. 28-36.
67. Бондаренко М. А., Оценка информативности комбинированных изображений в мультиспектральных системах технического зрения / М. А. Бондаренко, В. Н. Дрынкин // Программные системы и вычислительные методы. – 2016. – № 1. – с. 64-79.
68. Vila M. Analysis of image informativeness measures / M. Vila, A. Bardera, M. Feixas, Ph. Bekaert, M. Sbert // IEEE International Conference on Image Processing. – Paris, France. – 2014. pp. 1086-1090.

69. Романов Ю. Н. Оценка качества цифровых изображений / А. П. Богданов, Ю. Н. Романов // Механика, управление и информатика. – 2012. – № 9. – с. 218-226.
70. Wang Zhou. A universal image quality index / Zhou Wang, A. C. Bovik // IEEE Signal Processing Letters. Vol. 9, No. 3. – 2002. – pp. 81-84.
71. 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.
72. Бондаренко М. А., Адаптивный алгоритм выбора информативных каналов в бортовых мультиспектральных видеосистемах / М. А. Бондаренко, В. Н. Дрынкин, С. А. Набоков, Ю. В. Павлов // Программные системы и вычислительные методы. – 2017. – № 1. – с. 46–52.
73. Liu Z. Objective assessment of multiresolution image fusion algorithms for context enhancement in night vision: a comparative study / Z. Liu, E. Blasch, Z. Xue, J. Zhao, R. Laganier, W. Wu // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. Vol. 34, No 1. – 2012. – pp. 94-109.
74. Xydeas C. S. Objective Image Fusion Performance Measure / C. S. Xydeas, V. Petrović // Electronics Letters, Vol. 36, No. 4. – 2000. – pp. 308-309.
75. Cvejic N. A Similarity Metric for Assessment of Image Fusion Algorithms / N. Cvejic, A. Loza, D. Bul, N. Canagarajah // Int'l J. Signal Processing, Vol. 2, No 3. – 2005. – pp. 178-182.
76. Оператор Собела [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Оператор\\_Собеля](https://uk.wikipedia.org/wiki/Оператор_Собеля) – Заголовок з екрану.
77. Сигмоїдна функція [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Сигмоїда> – Заголовок з екрану.
78. Hryvachevskyi A. Infrared and visible image fusion / Andrii Hryvachevskyi // XXXIV konferencja elektroniki telekomunikacji i energetyki studentów i młodych pracowników nauki SECON 2018, Warszawa 26-27 kwietnia 2018 r.: Materiały konferencyjne. Warszawa. – 2018. – p. 16.
79. Seltman H. J. Experimental Design and Analysis. – 2012. – p. 413.

80. Lab [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Lab> – Заголовок з екрану.

81. Prudyus I. Earth surface diagnostic based on cluster analysis of multispectral monitoring data / I. Prudyus, V. Tkachenko, P. Kondratov, L. Lazko, S. Fabirovskyy, A. Gryvachevskyy // IX Krajowa Konferencja “Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów” (Diag’2015). Ustroń. Polska. 22÷25 września 2015r. Referaty. S.79

82. Hryvachevskiy A. Image segmentation based on cluster analysis of multispectral monitoring data / A. Hryvachevskiy, I. Prudyus // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science TCSET'2016: intern. conf., February 23–26, 2016: proceed. of the conf. – Lviv-Slavske, Ukraine, 2016. – P. 226-229.

83. Гривачевський А. П. Кластерний аналіз даних мультиспектрального моніторингу / А.П. Гривачевський // Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті: 20-й ювіл. міжн. молодіж. форум, 19–21 квіт. 2016 р.: тези доп., том 3 – Х., 2016. – с. 34-35.

84. Hryvachevskiy A. Improvement of Segmentation Quality of Multispectral Images by Increasing Resolution / A. Hryvachevskiy, I. Prudyus, L. Lazko, S. Fabirovskyy // Computation Problems of Electrical Engineering (CPEE-2016): XVII International Workshop, 14th – 17th September 2016.: Proceedings of Workshop. – Sandomierz, Poland. – 2016.

85. Гривачевський А. П. Моделювання процесу детектування рухомих об'єктів по даних відеомоніторингу / А. П. Гривачевський, Л. В. Лазько, С. Є. Фабіровський // Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (УкрМіКо'2016/UkrMiCo'2016), 11–16 вер., 2016 р.: тези доп., – Київ, 2016. – с. 468-471.

86. Prudyus I. Monitoring of dynamic objects by observation systems of visible range of waves / I. Prudyus, V. Tkachenko, L. Lazko, P. Kondratov, S. Fabirovskyy, A. Hryvachevskiy // Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej (WAT). – 2018. – Volume 67, № 2. – P. 15–26.

87. Гривачевський А. П. Адаптивний алгоритм виявлення рухомих об'єктів при відеомоніторингу / А. П. Гривачевський, І. Н. Прудіус // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2016. – № 849: Радіоелектроніка та телекомунікації. – с. 168-172.
88. Hryvachevskiy A. An adaptive algorithm of moving objects detection / A. Hryvachevskiy, V. Nichoha, I. Prudyus, S. Fabirovskyy // XI Konferencja Naukowo-Techniczna, 21 – 23 listopada 2016. – Ołtarzew, Polska. – 2016. – S. 24.
89. Xu Yong. Background modeling methods in video analysis: A review and comparative evaluation / Yong Xu, Jixiang Dong, Bob Zhang, Daoyun Xu // CAAI Transactions on Intelligence Technology. – 2016. – P. 43-60.
90. Piccardi M., Background Subtraction Techniques: A Review / M. Piccardi // Systems, man and cybernetics, 2004 IEEE international conference on, Vol. 4. – 2004. – P. 3099-3104.
91. Ogale N. A. A survey of Techniques for Human Detection from Video / N. A. Ogale // Survey, University of Maryland. – 2006.
92. Обухова Н. А. Обнаружение и сопровождение движущихся объектов методом сопоставления блоков / Н. А. Обухова // Информационно-управляющие системы, №1. – 2004. – с. 30-37.
93. Основы видеообработки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://courses.graphicon.ru/files/courses/vision/2012/lectures/cv2012\\_11\\_basicvideo.pdf](http://courses.graphicon.ru/files/courses/vision/2012/lectures/cv2012_11_basicvideo.pdf) – Заголовок з екрану.
94. Шестов Р. В. Краткая характеристика современных методов морфологической обработки полутоновых изображений в среде Matlab / Р. В. Шестов, А. В. Тамьяров // Вестник ВУиТ. – 2013. – №2. – с. 91-98.
95. Prudyus I. Monitoring of the dynamic objects by the observation systems of the visible range of waves / I. Prudyus, V. Tkachenko, L. Lazko, P. Kondratov, S. Fabirovskyy, A. Hryvachevskiy // XI Szola-Konferencja MWK‘2017, 23–26 maja, 2017, Waplewo, Poland. – 2017. – P. 65.
96. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. Том 1. Основные принципы и классические методы. / Ж. Макс, Жан-Клод Карре,

Филипп Пельтье // Перевод с французского канд. физ.-мат. наук А. Ф. Горюнова и канд. физ.-мат. наук А. В. Крянева. Под редакцией Д-ра физ.-мат. наук Н. Г. Волкова. Москва: Издательство «Мир», 1983.

97. Гривачевський А. П. Виявлення рухомих тіней та усунення їх впливу на точність виявлення рухомих об'єктів під час відеомоніторингу / А. П. Гривачевський, Л. В. Лазько, С. Є. Фабіровський, Ю. О. Демчина // Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах: V-а Міжнародна науково-практична конференція, 3–5 лист. 2016 р.: тези доп., – Чернівці, 2016. – с. 177-178.

98. HSV [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/HSV> – Заголовок з екрану.

99. Huang Wenbo. Automatic Shadow Removal by Illuminance in HSV Color Space / Wenbo Huang, Kyoung Yeon Kim, Yong Yang, Yoo-Sung Kim // Computer Science and Information Technology (CSIT). – 2015. – P. 70-75.

100. Kar A. Moving cast shadow detection and removal from Video based on HSV color space / A. Kar, K. Deb // Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT), 2015 International Conference on, Dhaka. – 2015. – P. 1-6.

101. Prudyus I. Improving the quality and informativeness of moving objects detecting / I. Prudyus, L. Lazko, A. Hryvachevskyi, S. Fabirovskyu // Advanced Rail Technologies (ART<sup>2017</sup>): 6th International Scientific Conference, 15 – 16 November, 2017: Conference Proceedings. – Warszawa, Poland. – 2017. – S. 93.

102. Гривачевський А. П. Пристрій моніторингу динамічних об'єктів у видимому діапазоні хвиль / А. П. Гривачевський, С. Є. Фабіровський // Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті: 21-й міжн. молодіж. форум, 25–27 квіт. 2017 р.: тези доп., том 3 – Х., 2017. – с. 57-58.

103. Колобродов В. Г. Оцінка ефективності багатоканальних оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням інформації / В. Г. Колобродов, В. І. Микитенко, М. С. Мамута // Наукові вісті Національного

технічного університету України "Київський політехнічний інститут". – 2012. – №6. – с. 127-131.

104. Vollmerhausen R. H. The targeting task performance (TTP) metric. A new model for predicting target acquisition performance / Richard H. Vollmerhausen, Eddie Jacobs // Technical report AMSEL-NV-TR-230. – 2004. – 126 P.

105. Bareła J. Determining the range parameters of observation thermal cameras on the basis of laboratory measurements / J. Bareła, M. Kastek, K. Firmanty, P. Trzaskawka // Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications X, Vol. 8896, International Society for Optics and Photonics. – 2013. – P. 12.

106. [NATO STANAG №4347](#).

107. Holst G. C. Electro-optical imaging system performance / G. C. Holst // 2nd ed. Winter Park, Florida: JCD Publishing, 2000, 438 P.

108. Vollmerhausen R. H. Analysis and evaluation of sampled imaging systems / R. H. Vollmerhausen, D. Reago, R. G. Driggers // Bellingham, Washington, USA: SPIE Press, 2010, 304 P.

109. Vollmerhausen R. H. New metric for predicting target acquisition performance / R. H. Vollmerhausen, E. L. Jacobs, R. G. Driggers // Optical Engineering, Vol. 43, No. 11. – 2004. – P. 2806-2819.

110. Barten P. G. Formula for the contrast sensitivity of the human eye / P. G. Barten // Image Quality and System Performance, Vol. 5294, International Society for Optics and Photonics. – 2004. – P. 231-239.

111. Применение технологии DAVINCI™ для систем видеонаблюдения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.compel.ru/lib/ne/2008/14/5-primeneniye-tehnologii-davinci-dlya-sistem-videonablyudeniya> – Заголовок з екрану.

112. TMS320DM6446 – DaVinci Digital Media System-on-Chip [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ti.com/product/TMS320DM6446> – Заголовок з екрану.

113. TMS320DM643 – Video/Imaging Fixed-Point Digital Signal Processor – Режим доступа: <http://www.ti.com/product/TMS320DM643> – Заголовок з екрану.

**ДОДАТОК 1. НАБІР 3 ДЕСЯТИ ПАР ТЕСТОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ  
ОТРИМАНИХ У ВИДИМОМУ ТА ТЕПЛОВОМУ ДІАПАЗОНАХ ЕМХ ТА  
ПОПЕРЕДНЬО ПРОСТОРОВО СИНХРОНІЗОВАНИХ**

*Видиме*

*Теплове*

Пара № 1, 720×480 пікселів



Пара № 2, 917×678 пікселів



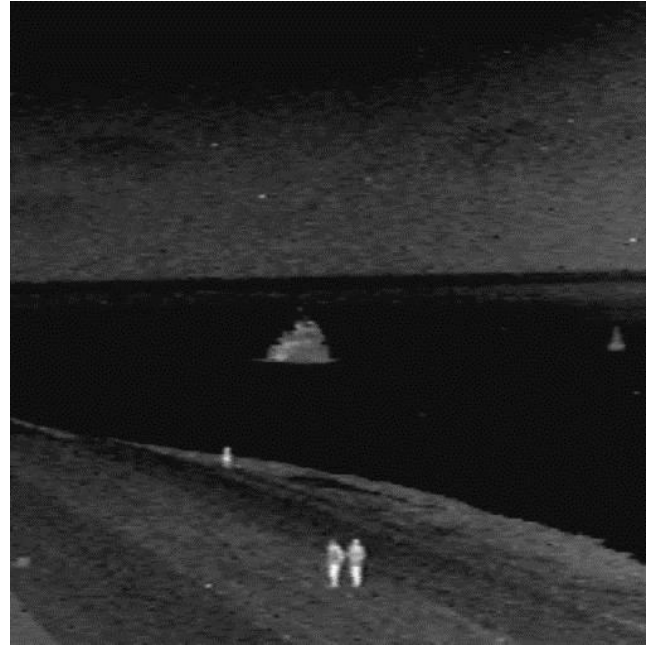
Пара № 3, 768×576 пікселів





*Видиме**Теплове*

Пара № 4, 505×510 пікселів



Пара № 5, 640×480 пікселів



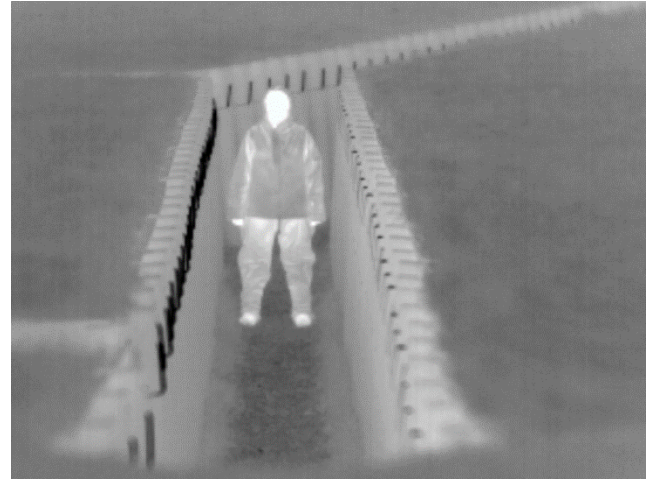
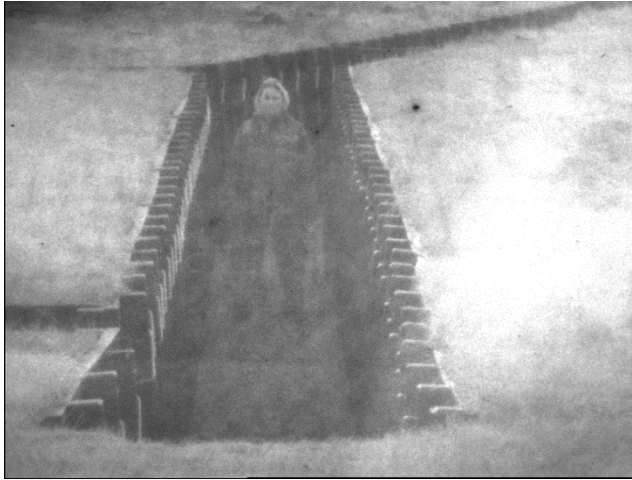
Пара № 6, 632×496 пікселів





*Видиме**Теплове*

Пара № 7, 768×576 пікселів



Пара № 8, 768×576 пікселів



Пара № 9, 1678×1080 пікселів



*Видиме*

*Теплове*

Пара № 10, 505×510 пікселів



## ДОДАТОК 2. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор

науково-педагогічної роботи  
Національного університету  
«Львівська політехніка»

доц. О.Р. Давидчак  
06 2018 р.



АКТ

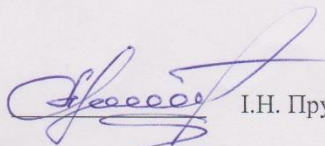
про впровадження у навчальний процес Національного університету «Львівська політехніка» результатів дисертаційної роботи Гривачевського Андрія Петровича на тему «Підвищення інформативності мультиспектральних систем моніторингу шляхом комплексування зображень видимого та інфрачервоного діапазонів»

Даний акт складено про те, що у Національному університеті «Львівська політехніка» на кафедрі «Радіоелектронні пристрої та системи» в лекційних курсах, практичних та лабораторних роботах для студентів базового напрямку 172 «Телекомунікації та радіотехніка» використані наступні результати дисертаційної роботи:

- Розроблений метод та алгоритм мультимодального комплексування зображень (дисципліна «Системи та пристрої запису та відтворення звуку та зображення»).
- Удосконалений метод та алгоритм оцінювання інформативності зображень (дисципліна «Системи та пристрої запису та відтворення звуку та зображення»).
- Рекомендацій щодо апаратної реалізації мультиспектральної системи моніторингу з комплексуванням зображень (дисципліна «Цифрові методи реалізації радіотехнічних систем»).

Використання вказаних результатів у навчальному процесі дало змогу студентам краще засвоїти особливості підвищення інформативності зображень в системах та пристроях їх формування.


Директор інституту телекомунікацій,  
радіоелектроніка та електронної техніки  
д.т.н., професор

 І.Н. Прудіус

Голова науково-методичної комісії ІТРЕ  
д.т.н., доцент

 Б.М. Стрихалок

Завідувач каф. РЕПС,  
д.т.н., доцент

 В.І. Оборжицький





### АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи  
Гривачевського Андрія Петровича на тему «Підвищення інформативності  
мультиспектральних систем моніторингу шляхом комплексування зображень видимого та  
інфрачервоного діапазонів» на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук при  
виконанні НДР на кафедрі радіоелектронних пристроїв та систем Національного  
університету «Львівська політехніка»

Комісія у складі начальника науково-дослідної частини Національного університету «Львівська політехніка», к.т.н., доцента Жук Л.В., завідувача кафедрою радіоелектронних пристроїв та систем д.т.н., доцента Оборжицького В.І., завідувача відділом науково-організаційного супроводу наукових досліджень к.т.н. Лазько Г.В., заступник начальника планово-фінансового відділу Чулой Т.М. склали даний акт про те, що при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт «Розробка засад застосування та обробки сигналів перспективних сенсорів для космічних апаратів і для наземних камер» (№ держреєстрації 0113U001355), «Розроблення засобів і методів формування та обробки багатоспектральних зображень для систем спеціального призначення» (№ держреєстрації 0115U000435) та «Розроблення портативних засобів вимірювання магнітних та електричних полів кораблів і засад оптико-радіолокаційного моніторингу надводної обстановки в місцях базування кораблів ВМС» (№ держреєстрації 0117U004454) в яких Гривачевський А.П. був виконавцем, використано результати його досліджень, а саме:

- дослідження методів та алгоритмів підвищення ефективності оптико-електронних систем мультиспектрального моніторингу шляхом застосування комплексування зображень видимого та інфрачервоного каналів;
- дослідження методів кластерного аналізу даних мультиспектрального моніторингу;
- дослідження методів виявлення рухомих об'єктів за результатами мультиспектрального моніторингу;
- розроблення методу мультимодального комплексування зображень;
- удосконалення методу виявлення рухомих об'єктів;
- розроблення рекомендацій щодо апаратної реалізації мультиспектральної системи моніторингу з комплексуванням зображень.

**Голова комісії**  
Начальник НДЧ, доцент

Л.В. Жук

**Члени комісії**  
Завідувач каф. РЕПС, доцент

В.І. Оборжицький

Зав. відділу НОСНД, к.т.н.

Г.В. Лазько

/Заст. начальника ПФВ

Т.М. Чулой

## ДОДАТОК 3. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації:*

1. Гривачевський А. П. Аналіз методів комплексування сигналів парціальних спектральних каналів в системах моніторингу об'єктів та сцен / А. П. Гривачевський // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2015. – № 818: Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 55–61.
2. Prudyus I. Factors affecting the quality of formation and resolution of images in remote sensing systems / I. Prudyus, V. Tkachenko, P. Kondratov, S. Fabirovskyu, L. Lazko, A. Hryvachevskyi // Computational Problems of Electrical Engineering. – 2015. – Volume 5, № 1. – P. 41–46.
3. Гривачевський А. П. Адаптивний алгоритм виявлення рухомих об'єктів при відеомоніторингу / А. П. Гривачевський, І. Н. Прудіус // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2016. – № 849: Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 168–172.
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". – 2017. – № 874: Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 73–80.
5. Гривачевський А. П. Підвищення інформативності мультиспектральних зображень шляхом мультимодального комплексування / А. П. Гривачевський, І. Н. Прудіус // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2018. – № 73. – с. 40–49.
6. Prudyus I. Monitoring of dynamic objects by observation systems of visible range of waves / I. Prudyus, V. Tkachenko, L. Lazko, P. Kondratov, S. Fabirovskyu, A. Hryvachevskyi // Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej (WAT). – 2018. – Volume 67, № 2. – P. 15–26.

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

7. Prudyus I. Sub-pixel Based Forming of High-resolution Images / I. Prudyus, V. Tkachenko, L. Lazko, S. Fabirovskyu, A. Gryvachevskyu // The 15<sup>th</sup> International Conference on Computation Problems of Electrical Engineering (CPEE-2014), 9<sup>th</sup> – 12<sup>th</sup> of september 2014.: Proceedings of abstracts. – Terchová, Slovak Republic. – 2014. – P. 24. (Заочна участь здобувача, співдоповідач)
8. Фабіровський С. Є. Формування зображень з підвищеною роздільною здатністю при субпіксельній обробці / С. Є. Фабіровський, А. П. Гривачевський // Радіоелектроніка і молодь в XXI столітті: 19-й міжн. молодіж. форум, 20 – 22 квіт. 2015 р.: тези доп., Том 3. – Харків, 2015. – С. 104–105. (Очна участь здобувача із доповіддю)
9. Prudyus I. Earth surface diagnostic based on cluster analysis of multispectral monitoring data / I. Prudyus, V. Tkachenko, P. Kondratov, L. Lazko, S. Fabirovskyu, A. Gryvachevskyu // IX Krajowa Konferencja "Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów" (DIAG'2015), 22 – 25 września 2015.: Streszczenia referatów. – Ustroń, Polska. – 2015. – S.79. (Заочна участь здобувача, співдоповідач)
10. Hryvachevskyi A. Image segmentation based on cluster analysis of multispectral monitoring data / A. Hryvachevskyi, I. Prudyus // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET'2016): Proceedings of the XIII<sup>th</sup> International Conference, February 23 – 26, 2016. – Lviv-Slavske, Ukraine. – 2016. – P. 226–229. (Очна участь здобувача із доповіддю)
11. Kondratov P. Detection and allotment of the objects based on multispectral monitoring / P. Kondratov, A. Ohanesyan, V. Tkachenko, I. Prudyus, L. Lazko, A. Hryvachevskyi // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET'2016): Proceedings of the XIII<sup>th</sup> International Conference, February 23 – 26, 2016. – Lviv-Slavske, Ukraine. – 2016. – P. 259–262. (Очна участь здобувача із доповіддю)

12. Гривачевський А. П. Кластерний аналіз даних мультиспектрального моніторингу / А. П. Гривачевський // *Радіоелектроніка і молодь в XXI столітті: 20-й ювіл. міжн. молодіж. форум*, 19 – 21 квіт. 2016 р.: тези доп., Том 3. – Харків, 2016. – С. 34–35. (Очна участь здобувача із доповіддю)
13. Гривачевський А. П. Моделювання процесу детектування рухомих об'єктів по даних відеомоніторингу / А. П. Гривачевський, Л. В. Лазько, С. Є. Фабіровський // *Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (UkrMiCo'2016/UkrMiCo'2016)*, 11 – 16 вер. 2016 р.: тези доп., – Київ, 2016. – С. 468–471. (Заочна участь здобувача, співдоповідач)
14. Hryvachevskiy A. Improvement of Segmentation Quality of Multispectral Images by Increasing Resolution / A. Hryvachevskiy, I. Prudyus, L. Lazko, S. Fabirovskyy // *Computation Problems of Electrical Engineering (CPEE-2016): XVII International Workshop*, 14<sup>th</sup> – 17<sup>th</sup> September 2016.: *Proceedings of Workshop*. – Sandomierz, Poland. – 2016. (Очна участь здобувача із доповіддю)
15. Hryvachevskiy A. An adaptive algorithm of moving objects detection / A. Hryvachevskiy, V. Nichoha, I. Prudyus, S. Fabirovskyy // *Systemy Rozpoznania i Walki Radioelektronicznej (KNTWERE-2016): XI Konferencja Naukowo-Techniczna*, 21 – 23 listopada 2016. – Oltarzew, Polska. – 2016. – S. 24. (Заочна участь здобувача, співдоповідач)
16. Гривачевський А. П. Виявлення рухомих тіней та усунення їх впливу на точність виявлення рухомих об'єктів під час відеомоніторингу / А. П. Гривачевський, Л. В. Лазько, С. Є. Фабіровський, Ю. О. Демчина // *Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах: V-а Міжнародна науково-практична конференція*, 3 – 5 лист. 2016 р.: тези доп., – Чернівці, 2016. – С. 177–178. (Очна участь здобувача із доповіддю)
17. Гривачевський А. П. Пристрій моніторингу динамічних об'єктів у видимому діапазоні хвиль / А. П. Гривачевський, С. Є. Фабіровський // *Радіоелектроніка і молодь в XXI столітті: 21-й міжн. молодіж. форум*, 25 – 27 квіт. 2017 р.: тези доп., Том 3. – Харків, 2017. – С. 57–58. (Очна участь здобувача із доповіддю)
18. Prudyus I. Monitoring of the static and dynamic objects by the visible range systems of waves / I. Prudyus, V. Tkachenko, L. Lazko, P. Kondratov, S. Fabirovskyy, A. Hryvachevskiy // *Metrologia Wspomagana Komputerowo (MWK'2017): XI Szkoła-Konferencja*, 23–26 maja, 2017. – Waplewo, Polska. – 2017. – S. 65. (Заочна участь здобувача, співдоповідач)
19. Hryvachevskiy A. The influence of destabilizing factors in the high resolution multispectral imaging systems / A. Hryvachevskiy, S. Fabirovskyy, L. Lazko, V. Tkachenko // *2017 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2017)*, 11 – 17 September, 2017. – Odessa, Ukraine. – 2017. (Очна участь здобувача із доповіддю)
20. Prudyus I. Improving the quality and informativeness of moving objects detecting / I. Prudyus, L. Lazko, A. Hryvachevskiy, S. Fabirovskyy // *Advanced Rail Technologies (ART'2017): 6th International Scientific Conference*, 15 – 16 November, 2017: *Conference Proceedings*. – Warszawa, Poland. – 2017. – S. 93. (Заочна участь здобувача, співдоповідач)
21. Гривачевський А. П. Комплексування зображень в мультиспектральних системах моніторингу з сенсорами різної фізичної природи / А. П. Гривачевський, А. М. Зубков, Л. В. Лазько, Д. О. Мимріков, І. Н. Прудіус, С. Є. Фабіровський // *Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку: VI-й Міжнародний радіоелектронний форум (МРФ-2017)*, 24 – 26 жовтня, 2017 р. – Харків. – С. 269–272. (Заочна участь здобувача, співдоповідач)
22. Hryvachevskiy A. Methods of multispectral image fusion at the pixel level / A. Hryvachevskiy, I. Prudyus, L. Lazko, S. Fabirovskyy // *14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET'2018)*, February 20 – 24, 2018: *Conference Proceedings* – Lviv-Slavske, Ukraine. – 2018. (Очна участь здобувача із доповіддю)
23. Hryvachevskiy A. Infrared and visible image fusion. XXXIV konferencja elektroniki telekomunikacji i energetyki studentów i młodych pracowników nauki (SECON-2018), 26 – 27 kwietnia 2018: *Materialy konferencyjne*. – Warszawa, Polska. – 2018. – S. 16. (Очна участь здобувача із доповіддю)