

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ГРИВАЧЕВСЬКИЙ АНДРІЙ ПЕТРОВИЧ



УДК 621.397

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

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: заслужений працівник освіти України,
доктор технічних наук, професор
Прудиус Іван Никифорович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
директор Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та
електронної техніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Русин Богдан Павлович,
Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка Національної
академії наук України, завідувач відділу методів та систем
дистанційного зондування;

кандидат технічних наук, доцент
Чесановський Іван Іванович,
Національна академія Державної прикордонної служби
України імені Богдана Хмельницького, завідувач кафедри
телекомунікацій та радіотехніки.

Захист відбудеться «25» січня 2018 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. №226 головного навчального корпусу.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий «20» грудня 2018 р.

*Учений секретар спеціалізованої
вченої ради, д.т.н., доцент*



І. В. Демидов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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. Vovic, 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 частиною систем моніторингу є сенсори зображень, а інформація про об'єкти і сцени, як показано в працях згаданих вище вчених, визначається результатами обробки сигналів (зображень) із 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). 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 роботи 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» при виконанні таких держбюджетних науково-дослідних робіт:

– «Розробка засад застосування та обробки сигналів перспективних сенсорів для космічних апаратів і для наземних камер», № держреєстрації 0113U001355, 2013-2014 рр.;

– «Розроблення засобів і методів формування та обробки багатоспектральних зображень для систем спеціального призначення», № 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», № держреєстрації 0117U004454, 2017-2018 рр.

Мета і завдання дослідження. 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 сформульованої мети в роботі розв'язано наступні завдання:

– 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;

– виконано класифікацію існуючих методів комплексування зображень та визначено найбільш ефективний метод з точки зору підвищення інформативності мультиспектральних зображень;

– досліджено існуючі методи просторової прив'язки різноспектральних зображень з метою вибору найбільш ефективного підходу для точної просторової синхронізації різноспектральних зображень;

– удосконалено метод оцінювання інформативності зображень, який ґрунтується на їх мультикритеріальному аналізі шляхом заміни ентропії, як одного з критеріїв метрики, на градієнт зображення;

– 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;

– 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;

– 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'єкт дослідження – процес формування та обробки зображень в мультиспектральній оптико-електронній системі моніторингу об'єктів та сцен.

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

Методи дослідження – положення теорії інформації, математичної статистики, комп'ютерного бачення, оптики, методи цифрової обробки сигналів та зображень, числового аналізу та комп'ютерного моделювання.

Наукова новизна одержаних 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 одержаних 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.

Особистий внесок здобувача. Всі результати, що становлять основу дисертаційної роботи, були сформульовані та одержані автором самостійно. Серед 6 статей, опублікованих у наукових фахових виданнях, 1 стаття написана здобувачем одноосібно [1]. В публікаціях, написаних у співавторстві, здобувачу належать такі результати: дослідження впливів дестабілізуючих факторів на якість та просторову роздільну здатність сенсорів різних діапазонів [2, 19]; моделювання субпіксельної технології підвищення просторової роздільної здатності сенсорів видимого діапазону [7, 8]; аналіз технології, моделей та методів комплексування сигналів та зображень в мультиспектральних системах моніторингу, їх комп'ютерне моделювання [21, 22]; дослідження методів просторової синхронізації різноспектральних зображень [4]; розроблення методу та на його основі алгоритму комплексування зображень видимого та інфрачервоного діапазонів та удосконалення методу оцінювання інформативності зображень [5]; кластеризація даних мультиспектрального моніторингу, виділення об'єктів на мультиспектральних зображеннях [9, 10, 11, 14]; аналіз існуючих методів виявлення рухомих об'єктів та тіней, розроблення нового методу виявлення, його моделювання та дослідження [3, 6, 13, 15-18, 20].

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень, представлені у дисертаційній роботі, були апробовані на наступних наукових заходах: XV Міжнародна конференція «Computational Problems of Electrical Engineering» (CPPE'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., Київ, 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» (MPФ–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 [1, 2, 3, 4, 5] та 1 – у науковому періодичному виданні іншої держави [6], зокрема 4 статті опубліковано у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз даних Index Copernicus [1, 3, 4, 6] та Web of Science [5]. 17 публікацій є матеріалами і тезами, що були представлені на міжнародних науково-технічних конференціях, симпозиумах та форумах [7–23], з них 5 опубліковані у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних Scopus [9–11, 19, 22].

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 113 найменувань та 2 додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 170 сторінок, із них 162 сторінок – основний текст, в тексті наведено 62 рисунків та 16 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету та завдання дисертаційної роботи, визначено об'єкт і предмет дослідження, відображено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, а також наведено відомості про особистий внесок здобувача і апробацію результатів дисертаційних досліджень, показано структуру та обсяг 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 (СМ). Встановлено, що найбільш перспективним підходом до підвищення ефективності, зокрема для підвищення інформативності СМ, є комплексування зображень, отриманих в різних діапазонах електромагнітних хвиль при мультиспектральному моніторингу (ММ) об'єктів та сцен. Для підтвердження вищесказаного проведено порівняння роздільних здатностей R_P – панхроматичної (моноспектральної) СМ та R_M – мультиспектральної СМ (МСМ) за критерієм Релея при дослідженні двох точок на спостережуваній сцені:

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

де $\alpha = x_1/x_2$, а x_1 і x_2 – проекції вектора, який з'єднує досліджувані точки у двовимірному спектральному просторі в якому розглядаються міри їх розділення. Залежність $\gamma(\alpha)$, що зображена на рис. 1, показує, що ММ потенційно завжди має кращу роздільну здатність ніж панхроматичний, що досягається за рахунок розбиття спектрального діапазону панхроматичного каналу на піддіапазони.

Розглянуто спектральні канали, які використовуються в різноманітних МСМ. Визначено переваги і недоліки каналів спостереження видимого та інфрачервоного (ІЧ) діапазонів, оскільки вони є найбільш вживаними при ММ, а зображення від цих каналів найбільш підходять для комплексування на піксельному рівні, оскільки інформаційно доповнюють один одного (дають різну інформацію про досліджувану сцену) і близькі за своїми характеристикам, на відміну від, наприклад, радіолокаційного зображення, сформованого радіолокатором із синтезованою апертурою, зображення з якого досить складно асоціюється з зображенням у видимому або ІЧ діапазоні.

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.

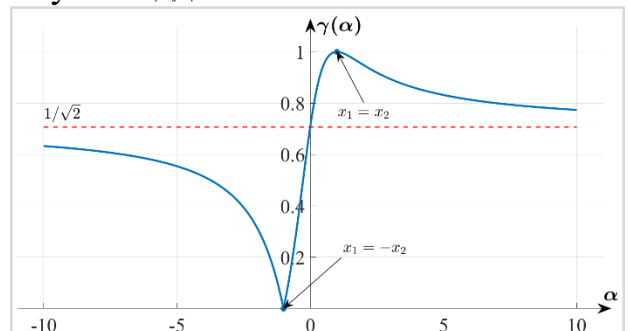


Рис. 1. Графік функції $\gamma(\alpha)$, що описує відношення роздільної здатності при панхроматичному моніторингу до роздільної здатності при мультиспектральному

Отже, на основі проведеного аналізу визначено, що підвищення інформативності МСМ можна досягти за рахунок комплексування зображень з різних спектральних діапазонів (мультимодального комплексування), для чого необхідно розв'язати ряд 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 ІЧ діапазонів, проведено моделювання теоретично розглянутих в розділі I методів комплексування та оцінено їх ефективність при комплексуванні зображень видимого та ІЧ діапазонів.

Під час дослідження існуючих критеріїв прив'язки зображень, зокрема: суми квадратів розбіжності образів, нормованої кореляційної функції та функції взаємної інформації (ВІ), експериментально визначено, що найбільш точно синхронізувати зображення видимого та ІЧ діапазонів дає змогу метод, заснований на максимізації функції ВІ. На рис. 2 зображено отриману в результаті моделювання функцію ВІ для тестових зображень рис. 3. Положення максимуму функції визначає оптимальне зміщення між еталоном (фіксованим фрагментом одного зображення – в даному випадку з видимого діапазону) і образом (фрагментом іншого зображення – в даному випадку ІЧ), що дає пару реперних точок. Подібним чином, проте для інших образів, отримуються ще кілька пар реперних точок (не менше чотирьох), які використовуються для синхронізації зображень шляхом геометричної трансформації одного зображення по відношенню до іншого.

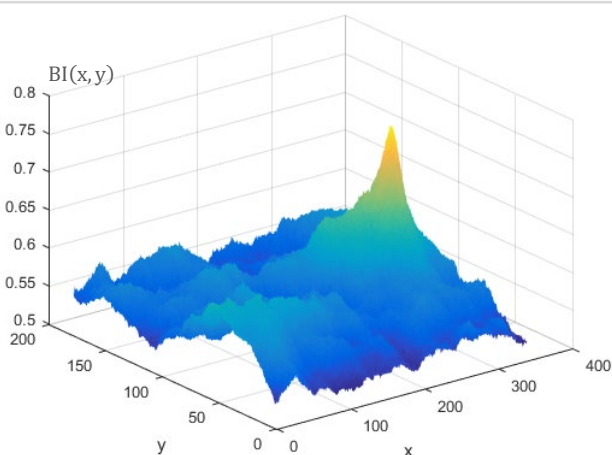


Рис. 2. Функція взаємної інформації для зображень рис. 3



Рис. 3. Результат прив'язки різноспектральних зображень

На основі аналізу та моделювання існуючих методів оцінювання інформативності зображень, зокрема: інформаційної ентропії Шенона I_E , інтегрального показника інформативності зображень I_{ISI} (від англ. *Integral Score of Informativeness*) та безеталонної метрики оцінювання інформативності зображень I_{NMI} (від англ. *No-reference Metric of image Informativeness estimation*), 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. За допомогою цієї метрика інформативність зображення оцінює шляхом аналізу п'яти його параметрів, а саме: ентропії E , контрасту K , середнього значення яскравості L , середньоквадратичного відхилення σ , кількості градацій яскравості H . В свою чергу інтегральний показник визначається як сума цих п'яти параметрів, попередньо пронормованих до діапазону $[0,1]$, з урахуванням вагових коефіцієнтів. Удосконалення метрики полягає у заміні ентропії E , як одного з критеріїв метрики, на градієнт G ; пороговому обмеженні кількості значущих градацій яскравості; оцінюванні коефіцієнта контрасту зображення на основі середніх значень контрастів в його локальних областях. З урахуванням внесених змін, інтегральний показник інформативності приймає вигляд:

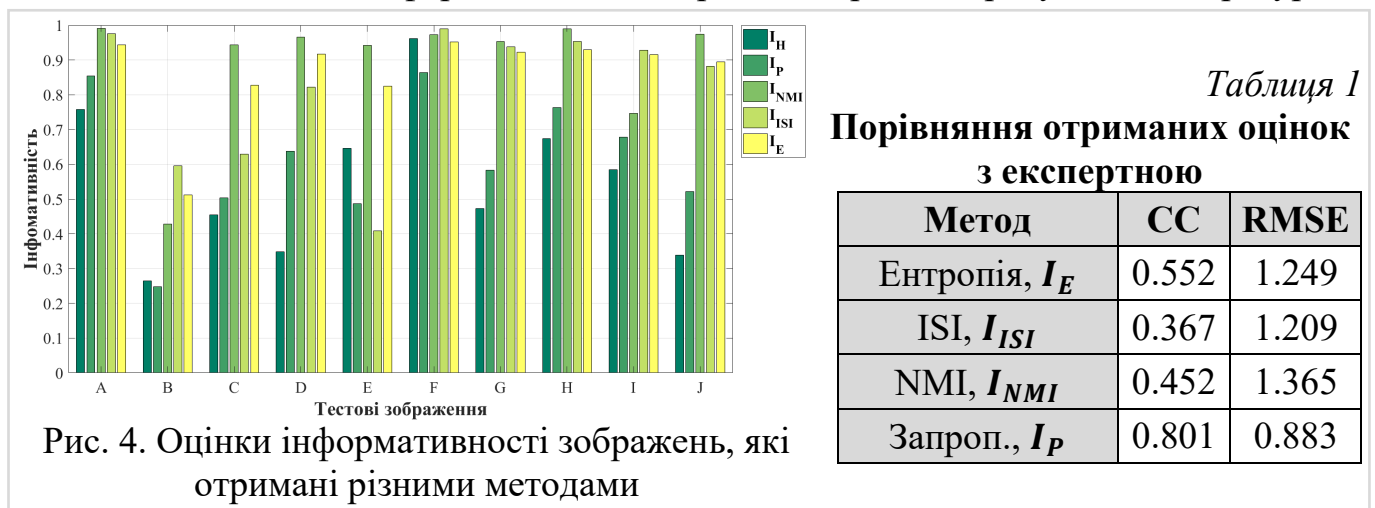
$$I_p = \omega_1 G_n + \omega_2 L_n + \omega_3 \sigma_n + \omega_4 H_n + \omega_5 K_n, \quad (2)$$

де індекс n означає, що всі параметри пронормовані до діапазону $[0;1]$, а ω_i – вагові коефіцієнти визначаються по критерію Фішберна:

$$\omega_i = \frac{2(N-i+1)}{N(N+1)}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (3)$$

де N – кількість часткових показників, у даному випадку $N = 5$.

Результати порівняння оцінок інформативності отриманих за допомогою відомих методів I_E , I_{ISI} , I_{NMI} , запропонованого I_p та усереднена оцінка інформативності, яка отримана групою експертів I_H , наведені на рис. 4. Обчисливши коефіцієнт кореляції (CC) та середньоквадратичну похибку (RMSE) між оцінками отриманими за допомогою алгоритмів та оцінкою групи експертів (див. табл. 1) можна зробити висновок, що удосконалена метрика I_p найбільше корелює з експертною оцінкою I_H , яка на сьогодні досі залишається найбільш обґрунтованим способом оцінювання інформативності зображень, проте потребує значних ресурсів.



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). Цей факт дає підстави для використання удосконаленої метрики для

оцінювання інформативності зображень у процесі комплексування та оцінювання результуючого комплексованого зображення.

З метою визначення найбільш ефективного методу комплексування, а саме зображень видимого та ІЧ діапазонів, з поміж проаналізованих в розділі І методів, реалізовано їх математичні моделі в пакеті MATLAB R2015a. Дослідження проводилось на наборі з десяти пар зображень. Всі пари представляють різні сцени у видимому та ІЧ діапазонах та були попередньо просторово синхронізовані. Комплексовані зображення отримуються шляхом почергового застосування до кожної тестової пари моделей п'ятнадцяти методів комплексування. В результаті отримується 150 комплексованих зображень, по 15 на кожну вхідну тестову пару. Ефективність комплексування оцінено за трьома метриками (див. табл. 2):

- на основі оцінювання інформативності комплексованих зображень за допомогою удосконаленої метрики I_P ;
- на основі метрики Q_G , котра характеризує наскільки ефективно метод комплексування дає змогу перенести градієнт, тобто інформацію про границі об'єктів, з вхідних зображень на комплексоване;
- на основі метрики Q_C , котра на основі блочного (локального) порівняння зображень характеризує наскільки ефективно ділянки з подібним характером розподілу значень пікселів перенесені з вхідних зображень на комплексоване.

В таблиці 2 наведено усереднені нормовані оцінки ефективності комплексування зображень розглянутими методами.

Таблиця 2

Оцінювання ефективності комплексування зображень

| Метрика оцінювання | Метод комплексування | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|------------------------|-----------------------------|-------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|-------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|---|---|
| | Усереднення | Метод вагової функції | Максимум яскравості | Степенеve перетворення | Черезрядкове комплексування | Метод маски | Підсилення відмінностей | Аналіз НЧ та ВЧ складових | Аналіз головних компонент | Компл. з пріоритетом | Компл. на основі оцінювання інформ. | Метод локал. синтезу | Компл. за допомогою тривимірного ФНЧ | комплексування на основі піраміди Лапласа | комплексування на основі дискретного вейвлет-перетворення |
| I_P | 0,55 | 0,50 | 0,58 | 0,40 | 0,55 | 0,55 | 0,58 | 0,53 | 0,59 | 0,55 | 0,53 | 0,52 | 0,52 | 0,56 | 0,57 |
| Q_G | 0,80 | 0,67 | 0,74 | 0,43 | 0,65 | 0,74 | 0,71 | 0,49 | 0,73 | 0,82 | 0,51 | 0,64 | 0,62 | 0,89 | 0,85 |
| Q_C | 0,70 | 0,65 | 0,83 | 0,08 | 0,60 | 0,73 | 0,65 | 0,50 | 0,69 | 0,58 | 0,70 | 0,46 | 0,61 | 0,76 | 0,73 |

Отже, з отриманих результатів комплексування різноспектральних зображень різними методами та оцінювання їх ефективності за 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, а саме: №14 – комплексування на основі піраміди Лапласа та №15 – комплексування на основі дискретного вейвлет-перетворення (ДВП). Причому найбільший потенціал для удосконалення має метод комплексування на основі ДВП, оскільки при його реалізації можна змінювати чотири вхідні параметри: 1) форму

базисної вейвлет-функції; 2) кількість рівнів розкладу; 3) правило формування НЧ вейвлет-коефіцієнтів та 4) правило формування ВЧ вейвлет-коефіцієнтів результуючого вейвлет-спектру. Тому саме на основі ДВП доцільно розробити новий метод комплексування, що дасть змогу підвищити ефективність мультиспектральної системи моніторингу в складних умовах спостереження.

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

В загальному випадку при комплексуванні за допомогою ДВП вхідні зображення на кожному рівні декомпозиції розкладаються на низькочастотну (НЧ) та високочастотну (ВЧ) складові вейвлет-спектра. В якості базисної вейвлет-функції використовується вейвлет Хаара, а кількість рівнів декомпозиції може змінюватися від 1 до $\log_2(\min(N, M))$, де N, M – розміри зображення. НЧ вейвлет-спектр комплексованого зображення формується шляхом усереднення НЧ складових вейвлет-спектрів вхідних зображень, а ВЧ вейвлет-спектр – вибором максимального по модулю значення з відповідних складових вейвлет-спектрів вхідних зображень. На завершальному етапі до сформованого результуючого вейвлет-спектра застосовується зворотне ДВП і, таким чином, отримується комплексоване зображення. Проте, під час комплексування різноспектральних зображень, отриманих в складних умовах спостереження, потрібно розробити ефективний метод, оскільки проводити формування НЧ частини результуючого вейвлет-спектра на основі усереднення відповідних НЧ частин вхідних зображень або на основі абсолютного максимуму, недоцільно. Легко передбачити, що формування НЧ вейвлет-спектра комплексованого зображення шляхом усереднення буде призводити до зниження контрасту у випадку, коли одне з вхідних зображень є низької якості або малоінформативним. Тому для усунення цього недоліку пропонується новий метод комплексування, який відрізняється від описаного вище іншим принципом формування НЧ-частини результуючого вейвлет-спектра.

Першим етапом запропонованого методу комплексування є визначення найбільш інформативного зображення (серед вхідних) за допомогою метрики запропонованої у розділі II. Позначимо це зображення як A (рис. 5, а), тоді інше зображення позначимо як B (рис. 5, б).

На другому кроці кожне з вхідних зображень A та B , розкладаються за допомогою ДВП на кожному рівні декомпозиції на чотири матриці вейвлет-коефіцієнтів: одна з яких представляє НЧ складові вейвлет-спектра (LL_A та LL_B), а три інші ВЧ складові (HL_A, LH_A, HH_A та HL_B, LH_B, HH_B). НЧ-частина комплексованого вейвлет-спектра LL_F формується наступним чином:

$$LL_F(n, m) = LL_A(n, m) + W(n, m) \times [LL_B(n, m) - LL_C(n, m)], \quad (4)$$

де LL_C – матриця коефіцієнтів, що описують характер зв'язку між НЧ частинами вхідних зображення, W – матриця коригуючих коефіцієнтів, які визначається, як:

$$W(n, m) = LL_C(n, m) / \max(LL_C(n, m)), \quad (5)$$

де, (n, m) – позиція коефіцієнтів в матриці.

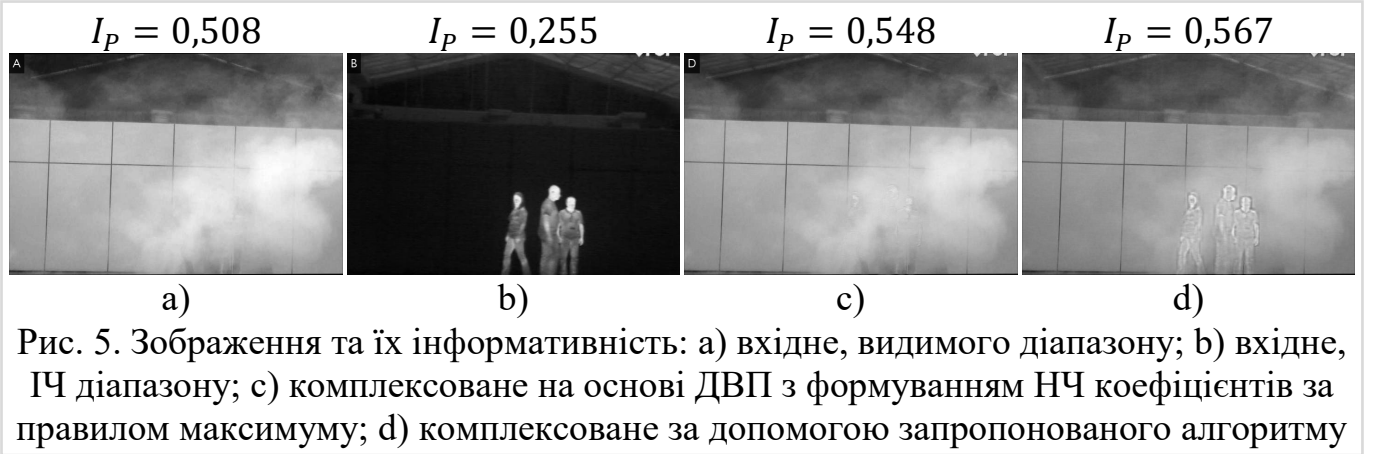


Рис. 5. Зображення та їх інформативність: а) вхідне, видимого діапазону; б) вхідне, ІЧ діапазону; с) комплексоване на основі ДВП з формуванням НЧ коефіцієнтів за правилом максимуму; д) комплексоване за допомогою запропонованого алгоритму

Матриця зв'язку НЧ вейвлет-коефіцієнтів зображень A та B визначається за допомогою регресійного аналізу, LL_C :

$$LL_C(n, m) = \alpha + \beta \times LL_A(n, m), \quad (6)$$

де α і β – коефіцієнти регресійної моделі (рис. 6), які визначаються як:

$$\alpha = \overline{LL_B(n, m)} - \beta \times \overline{LL_A(n, m)}, \quad (7)$$

$$\beta = \frac{\sum_{N, M} (LL_A(n, m) - \overline{LL_A(n, m)}) (LL_B(n, m) - \overline{LL_B(n, m)})}{\sum_{N, M} (LL_A(n, m) - \overline{LL_A(n, m)})^2} \equiv \frac{Cov(LL_A, LL_B)}{Var(LL_A)}, \quad (8)$$

де $\overline{LL_A(n, m)}$, $\overline{LL_B(n, m)}$ – середні значення відповідних матриць вейвлет-коефіцієнтів; $n = \overline{1, N}$, $m = \overline{1, M}$, де N, M – кількість елементів у кожній із матриць вейвлет-спектру на конкретному рівні декомпозиції.

Регресійна пряма (рис. 6), знайдена в процесі регресійного аналізу, проходить через центр мас залежності коефіцієнтів матриць LL_A та LL_B . Коефіцієнти рівняння прямої для даного випадку: $\alpha = 70,215$ і $\beta = -0,047$.

В (4) різниця $[LL_B(n, m) - LL_C(n, m)]$ опосередковано описує деталі зображення B , які відсутні в зображенні A .

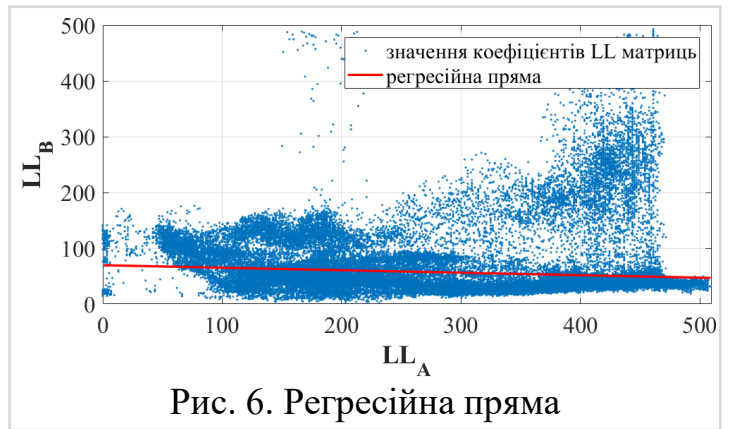


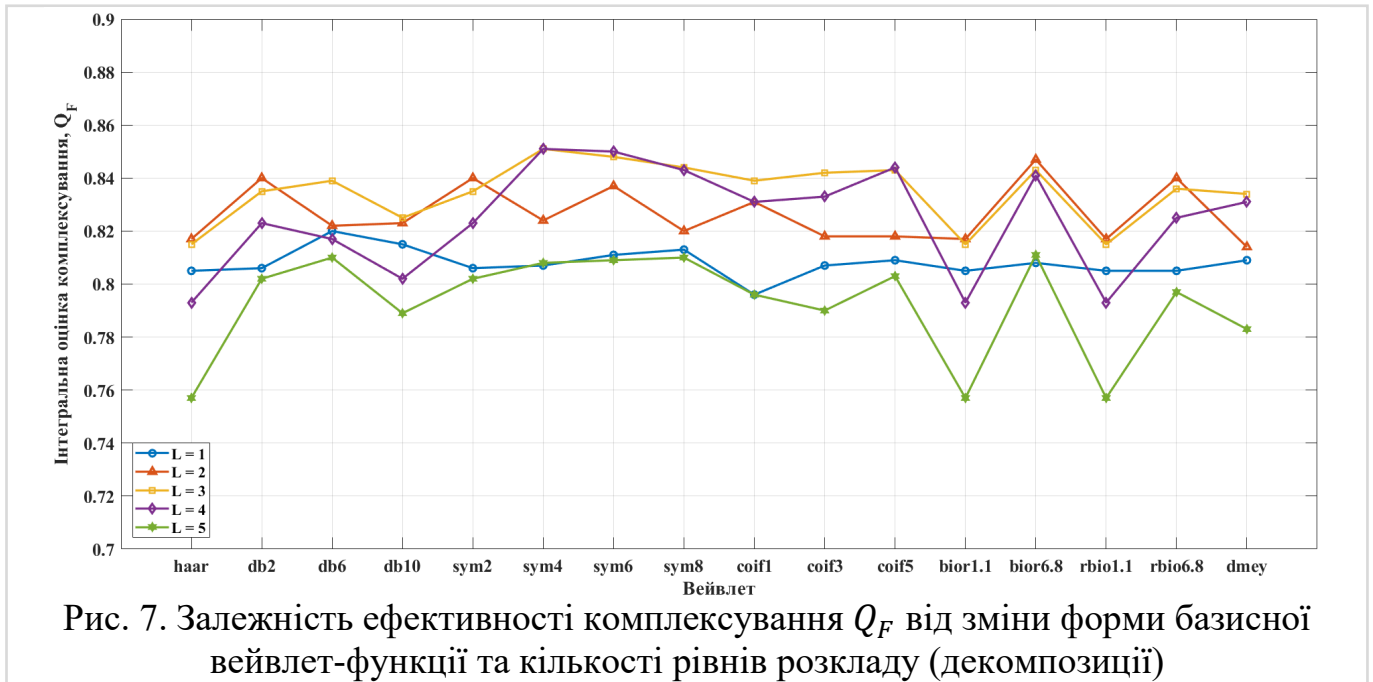
Рис. 6. Регресійна пряма

Третім кроком є формування ВЧ-частини комплексованого вейвлет-спектра, яка формується шляхом порівняння коефіцієнтів відповідних матриць ВЧ вейвлет-спектрів вхідних зображень і вибору максимального по модулю значення.

На завершальному етапі застосовується зворотне ДВП до сформованого комплексованого вейвлет-спектра і нормалізація сформованого комплексованого зображення (рис. 5, d) до діапазону $[0, 255]$ (у випадку 8-бітного зображення).

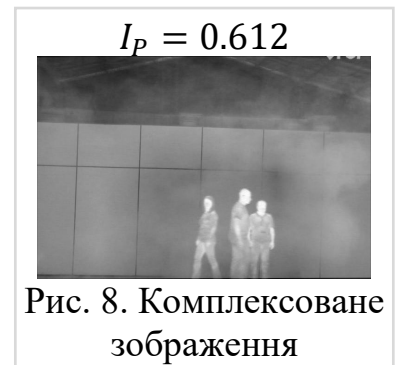
Порівнюючи зображення представлені на рис. 5 та їх інформативності, видно, що використання регресійного аналізу для формування НЧ частини комплексованого вейвлет-спектра дає змогу синтезувати зображення F (рис. 5, d), яке є більш інформативне, на відміну від вхідних зображень A і B , а також від зображення комплексованого відомим методом (рис. 5, c).

Для дослідження впливу на ефективність комплексування та інформативність комплексованого зображення форми базисної-вейвлет функції та кількості рівнів розкладу проведено комплексування зображень з тестового набору запропонованим алгоритмом із почерговою зміною базисної вейвлет-функції та кількості рівнів розкладу, оцінено інформативність комплексованих зображень та ефективність комплексування метриками Q_G та Q_C , а інтегральна оцінка ефективності комплексування Q_F , що є добутком нормованих оцінок, I_P , Q_G та Q_C , представлена графіком на рис. 7.



Із значень інтегрального показника Q_F випливає, що найбільш доцільно проводити комплексування зображень запропонованим методом при чотирьох рівнях розкладу з використанням вейвлета “sym4”. Так, при комплексуванні зображень представлених на рис. 5, а) і рис. 5, б) з визначеними параметрами вейвлет-перетворення, інформативність комплексованого зображення, представленого на рис. 8, зросла на 4.5% до $I_P = 0.612$.

Оскільки в переважній більшості сучасні сенсори видимого діапазону формують кольорові зображення (рис. 9, а), в роботі отримала розвиток модель комплексування, яка в результаті удосконалення передбачає використання інформації про розподіл кольорів на зображенні видимого діапазону під час комплексування. Суть удосконалення моделі комплексування полягає у використанні колірної моделі $CIE L^*a^*b^*$ (далі Lab) під час комплексування. Дана колірна модель є апаратно незалежною, що є її ключовою особливістю, і дає змогу розкласти кольорове RGB зображення на яскравісну складову L та дві колірні a і b . Виділена яскравісна складова використовується для комплексування у градаціях сірого, а отримане комплексоване зображення F використовується як нова яскравісна складова, тобто $L = F$. Після зворотного переходу з Lab в модель RGB , отримується



комплексоване зображення (рис. 9, d), що додатково містить в собі інформацію про розподіл кольорів з зображення видимого діапазону.



Рис. 9. Комплексування зображень з урахуванням розподілу кольорів: а) вхідне зображення видимого діапазону; б) вхідне зображення ІЧ діапазону с) комплексоване в градаціях сірого; д) комплексоване з урахуванням розподілу кольорів на зображенні видимого діапазону

Схема обробки зображень запропонованими алгоритмами наведена на рис. 10 і складається з трьох етапів:

1) На вхід надходить два зображення: VI – видиме (сформоване сенсором видимого діапазону) і IR – ІЧ зображення, які подаються на вхід блоку просторової синхронізації, де одне з зображень трансформується по відношенню до іншого на основі обчислених параметрів розузгодженості, в результаті чого на виході блоку 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. Як базове зображення A завжди вибирається зображення з більшою інформативністю.

3) Зображення A і B надходять в блок комплексування. За допомогою ДВП вони розкладаються на визначену кількість рівнів із використанням визначеної вейвлет-функції. НЧ вейвлет-коефіцієнти (коефіцієнти апроксимації) комплексуються на основі регресійного аналізу зв'язку між A і B , а ВЧ вейвлет-коефіцієнти (коефіцієнти деталізації) комплексуються за правилом абсолютного максимуму. За допомогою інверсного ДВП з отриманого результуючого вейвлет-спектра синтезується (реконструюється) комплексоване зображення F , представлене градаціями сірого.

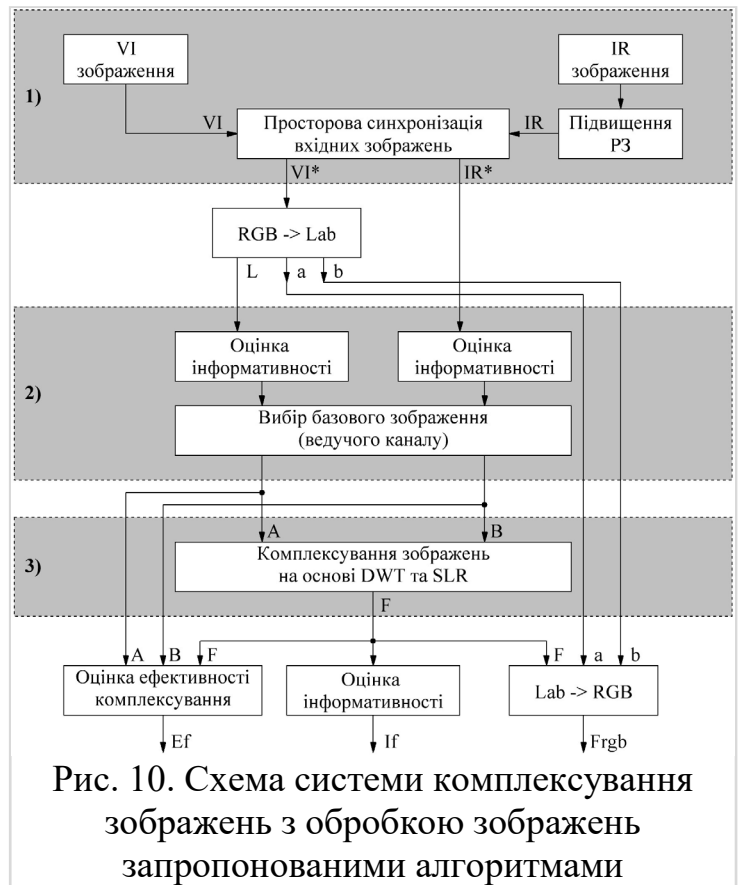


Рис. 10. Схема системи комплексування зображень з обробкою зображень запропонованими алгоритмами

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

Отже, як видно з рис. 8 та рис. 9, запропонований алгоритм комплексування дає змогу відобразити на комплексованому зображенні корисну інформацію з зображень видимого та ІЧ діапазонів, незважаючи на те, що об'єкти інтересу на зображенні видимого діапазону (рис. 5, а) приховані димовою завісою. Це свідчить, що даний алгоритм доцільно використовувати для підвищення інформативності мультиспектральних систем при моніторингу об'єктів в складних умовах спостереження. А розвинена модель комплексування дає змогу синтезувати кольорове комплексоване зображення (рис. 9, d), яке є більш адаптованим для психофізичного сприйняття людиною-оператором, ніж комплексоване зображення в градаціях сірого (рис. 9, с), 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.

Для виявлення рухомих об'єктів удосконалено модель виявлення руху, 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. На рис. 11, а представлено один з кадрів відеопотоку, який використовувався як один з тестових при розробці методу виявлення рухомих об'єктів. На рис. 11, b червоним кольором виділено площі рухомих об'єктів, що були виявлені розробленим методом, а синім кольором рухомі тіні цих об'єктів. В результаті усунення малоінформативного фону та компенсації негативного впливу рухомих тіней отримується зображення кадру на якому представлено тільки рухомі об'єкти (рис. 11, c).

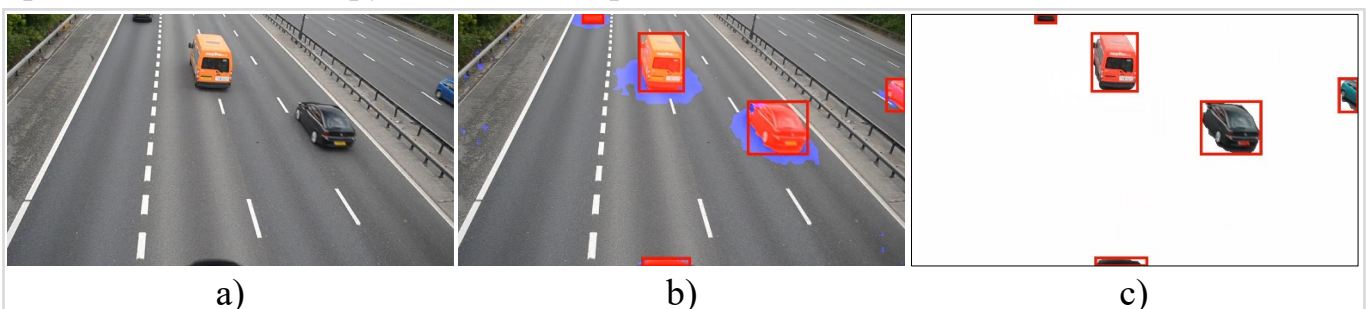


Рис. 11. Виявлення рухомих об'єктів: а) кадр відеопотоку; б) марковані рухомі об'єкти (червоним кольором) та їх тіні (синім кольором); с) виділені рухомі об'єкти

Рис. 12 показує, як реалізований на основі розробленого методу алгоритм адаптується до дестабілізуючих факторів та коректує параметри моделі фону. Функціонування алгоритму можна розділити на два етапи. На першому етапі алгоритм навчається і оцінює параметри моделі фону, а на другому етапі переходить

в режим пошуку рухомих об'єктів і постійної корекції моделі фону з метою врахування зміни параметрів спостережуваної сцени в процесі спостереження. Гострі піки на графіках рис. 12, що виходять за межі порогів T1, T2 свідчать про наявність руху в області, за яку відповідає заданий піксель в кадрі відеопотоку.

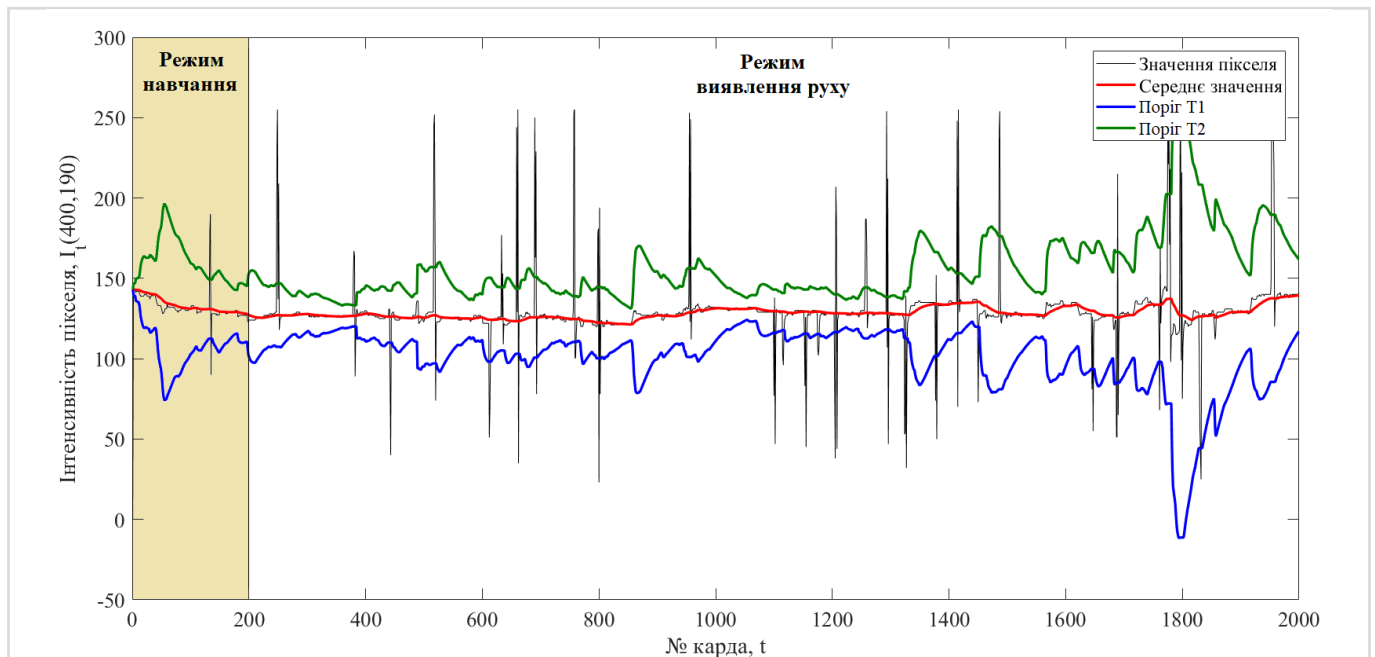
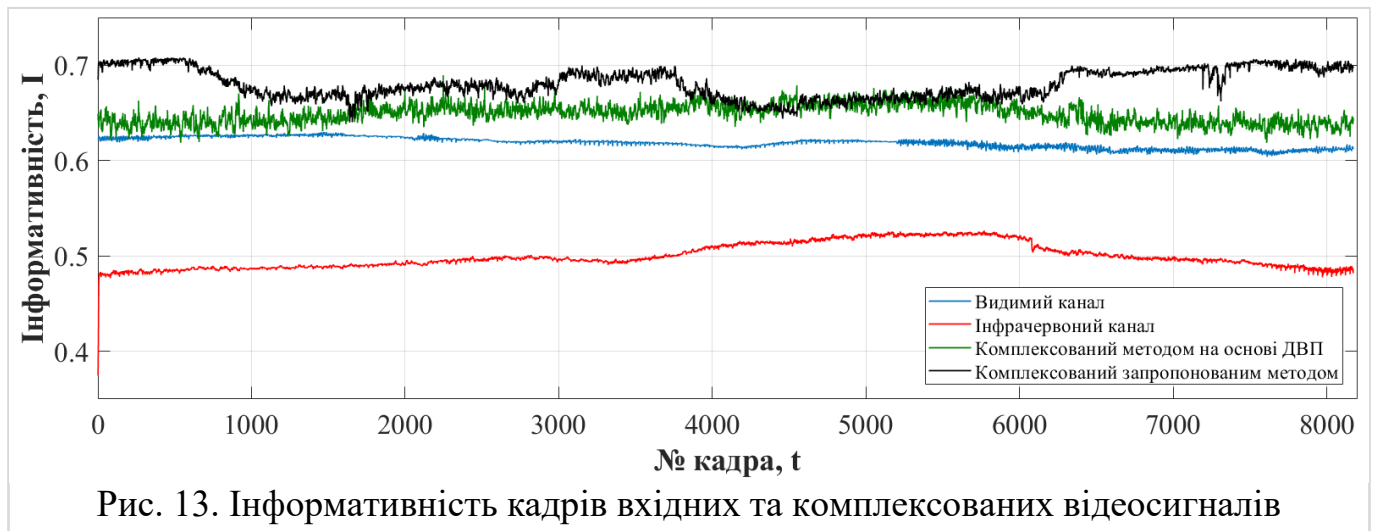


Рис. 12. Приклад визначення та корекції моделі фону (сер. значення та дисперсії) для пікселя з координатами [400,190] на протязі 2000 кадрів тестового відеосигналу

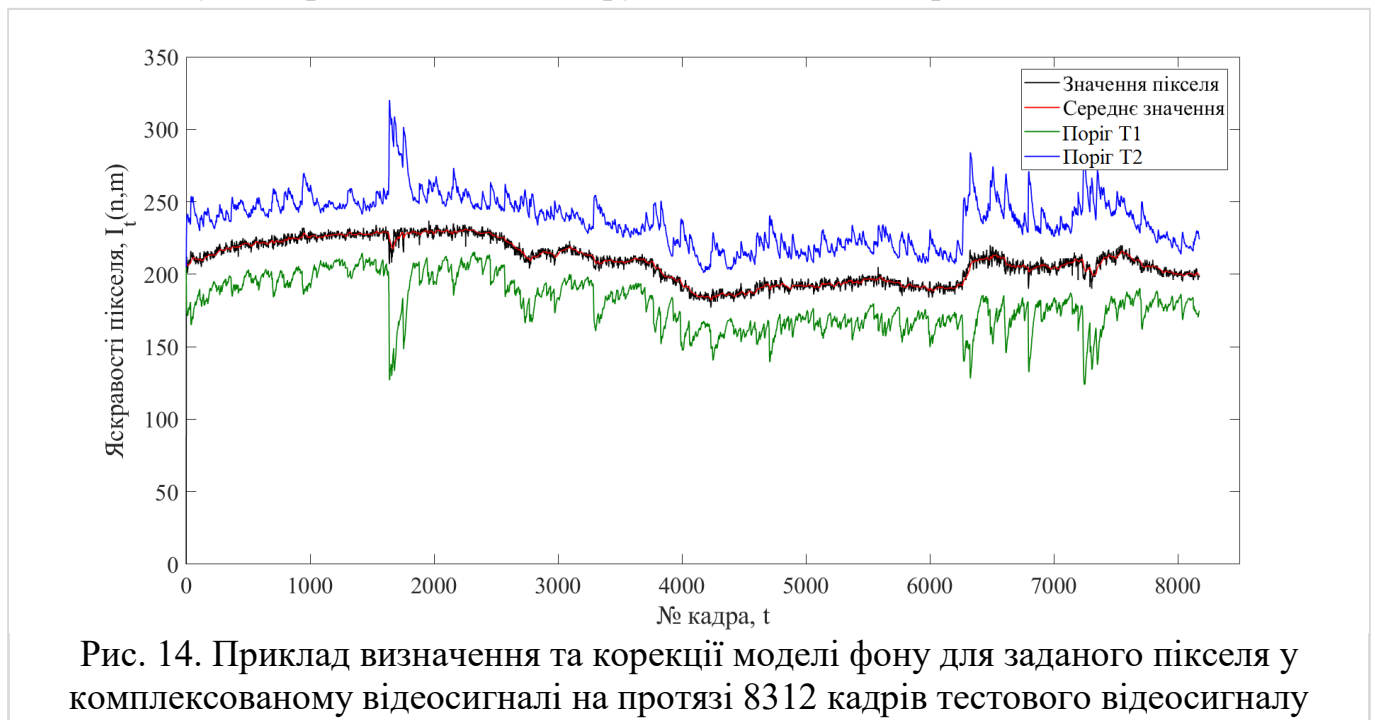
Запропонований адаптивний алгоритм виявлення рухомих об'єктів дає змогу ефективно виявляти рухомі об'єкти при наявності дестабілізуючих факторів, зокрема: виконувати коректне формування моделі фону навіть при наявності інтенсивного руху в полі зору камери; адаптуватися, як в просторі так і в часі, до 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 дає змогу усунути 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.

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 II та дослідженого в розділі III методу. Вхідні відеосигнали попередньо синхронізовані в часі (при реєстрації) та просторі за допомогою методики прив'язки, дослідженої в розділі II. Синхронізовані відеосигнали мають тривалість 4.32 с з частотою кадрів — 29.97 кадрів/с та складаються з 8312 кадрів розміром 1632×1000 пікселів. На рис. 9, а та б наведено кадри під №450 вхідних відеосигналів, а на рис. рис. 9, d відповідний їм кадр комплексованого відеосигналу.

На рис. 13 приведено графіки інформативності кадрів комплексованого та вхідних відеосигналів. Як видно з графіків, інформативність кадрів комплексованого відеосигналу практично на усьому проміжку часу є більшою від інформативності кадрів, як вхідних відеосигналів (в середньому на 10.1% більшою, ніж видимого каналу), так і кадрів комплексованих відомим методом на основі ДВП (в середньому на 4.89%).



Проведемо виявлення рухомих об'єктів по комплексованому відеосигналі за допомогою розробленого алгоритму виявлення руху. На рис. 14 представлено приклад результату формування та оновлення моделі фону (оцінювання сер. значення та дисперсії) та порогів бінаризації для одного з пікселів кадрів комплексованого відеосигналу, а на рис. 15 – виявлені рухомі об'єкти в кадрі під №694.



Для оцінки ефективності моніторингу за допомогою МСМ з комплексуванням скористаємося класичними характеристиками системи моніторингу, такими як імовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації, які для випадку цифрових зображень визначаються за допомогою показника успішності виконання завдання (англ. *Targeting Task Performance (TTP) Metric*), що розроблений відділом моделювання та симуляції

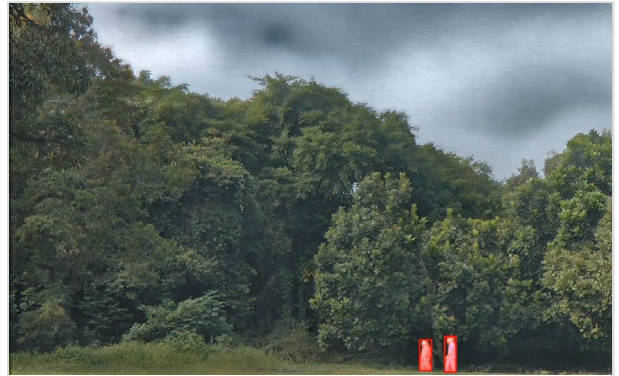


Рис. 15. Виділені рухомі об'єкти на комплексованому відеосигналі

управління нічного бачення та електронних сенсорів армії США (англ. *Modeling and Simulation Division Night Vision and Electronic Sensors Directorate U.S. Army*).

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

$$TTP_F = w \times [CC(A, F) \times TTP_A + CC(B, F) \times TTP_B] / [1 + CC(A, B)], \quad (9)$$

де TTP_A , TTP_B – показники успішності виконання завдання ведучим та допоміжним каналами, 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 :

$$w = \frac{2I_F}{I_A + I_B}. \quad (10)$$

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. 3.

Таблиця 3

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, згідно з яким тест-об'єктом є абсолютно чорне тіло (АЧТ), що має розмір 2.3×2.3 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 за поганих погодних умов для ІЧ каналу – $\tau = 0.2 \text{ км}^{-1}$ та видимого каналу – $\tau = 1 \text{ км}^{-1}$.

Використовуючи вищезгадані пропозиції, визначимо залежності імовірності виявлення, розпізнавання та ідентифікації (рис. 16) для моніторингу з застосуванням запропонованих методів при необхідній кількості штрихів на зображенні об'єкта, що розділяються для забезпечення 50% ймовірності правильного виявлення – $V_{50} = 2.7$, розпізнавання – $V_{50} = 14.5$ та ідентифікації – $V_{50} = 18.8$.

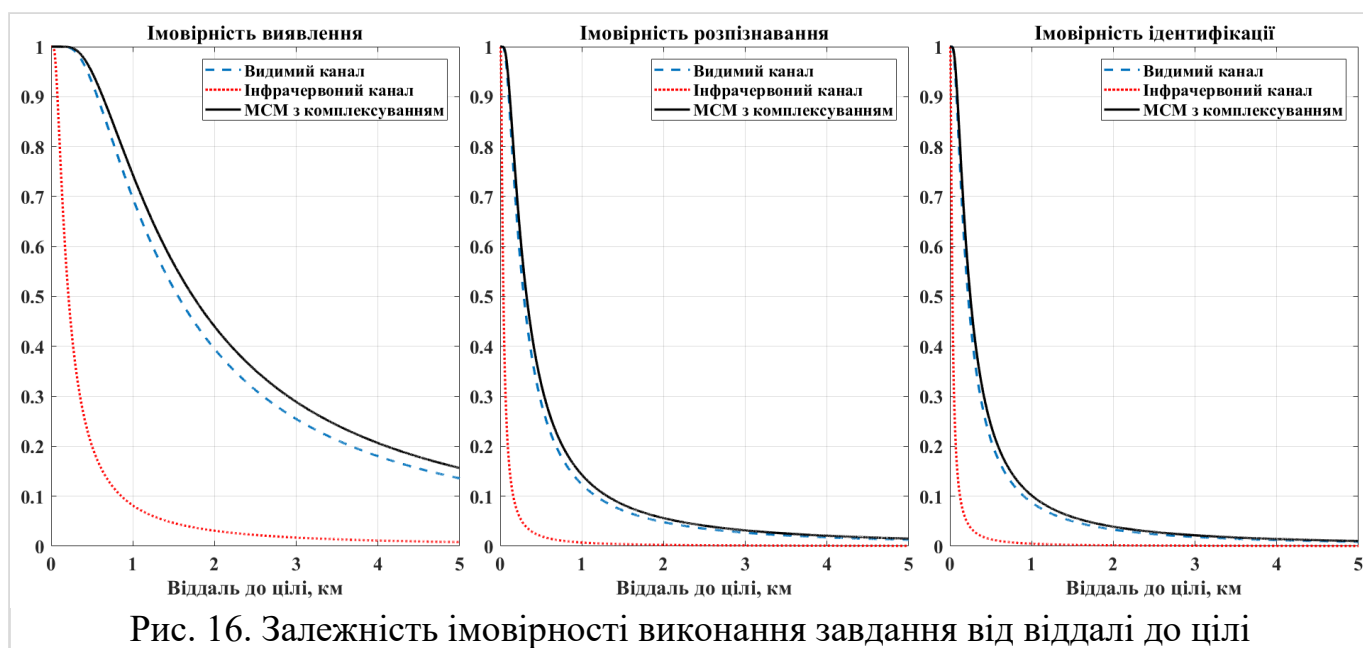


Рис. 16. Залежність імовірності виконання завдання від віддалі до цілі

Числові значення обчислених імовірностей на рівні 0.5 наведені в табл. 4.

Таблиця 4

Максимальні дальності виконання завдання з імовірністю 0,5

| Завдання | Максимальна дальність виконання завдання для каналу, м | | | Виграш від використання комплексування, % |
|---------------|--|----------------|-----------------|---|
| | Видимого | Інфрачервоного | Комплексованого | |
| Виявлення | 3110 | 425 | 3476 | 11.78% |
| Розпізнавання | 580 | 80 | 648 | 11.72% |
| Ідентифікація | 448 | 62 | 500 | 11.61% |

Значно менша дальність виконання поставленого завдання для ІЧ каналу, порівняно з видимим, пов'язана зі значно меншою роздільною здатністю його сенсора.

На рис. 17 представлено рекомендований варіант організації сенсорної частини МСМ. На даному рисунку сенсори видимого та ІЧ каналу розміщуються під кутом 90° , а між ними в оптичній площині під кутом 45° до входної зони розміщується дзеркало LWIR діапазону, котре має малий коефіцієнт відбиття у видимому діапазоні, пропускаючи EMX цього діапазону для реєстрації відповідною камерою, і має близький до 1 коефіцієнт відбиття в тепловому (LWIR) діапазоні, відбиваючи EMX даного діапазону на відповідну камеру для їх реєстрації.

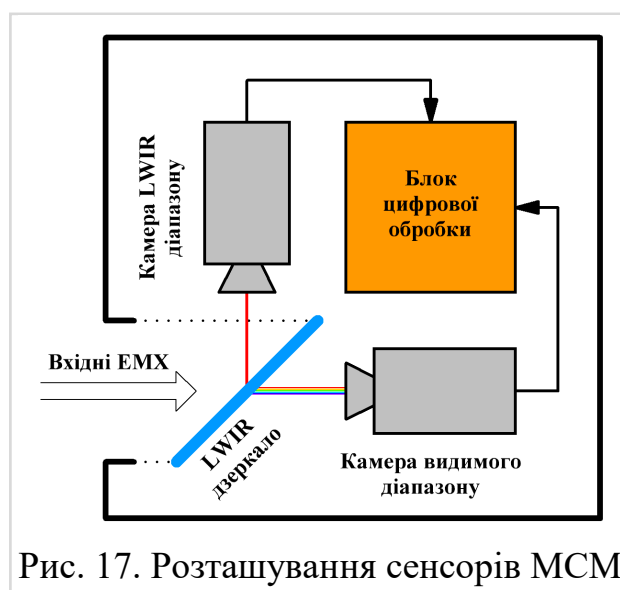


Рис. 17. Розташування сенсорів МСМ

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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ 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 / Ivan Prudyus, Victor Tkachenko, Petro Kondratov, Serhiy Fabirovskyy, Leonid Lazko, **Andriy 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. Hryvachevskiy** // Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej (WAT). – 2018. – Volume 67, № 2. – P. 15–26. (**Index Copernicus**)

7. Prudyus I. Sub-pixel Based Forming of High-resolution Images / Ivan Prudyus, Victor Tkachenko, Leonid Lazko, Sergiy Fabirovskyy, **Andriy Gryvachevskyy** // The 15th International Conference on Computation Problems of Electrical Engineering (CPEE-2014), 9th – 12th 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. **Hryvachevskiy A.** Image segmentation based on cluster analysis of multispectral monitoring data / Andrii Hryvachevskiy, Ivan Prudyus // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET'2016): Proceedings of the XIIIth 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 / Petro Kondratov, Albert Ohanesyan, Viktor Tkachenko, Ivan Prudyus, Leonid Lazko, **Andrii Hryvachevskiy** // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET'2016): Proceedings of the XIIIth 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 ХХІ 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 (UkrMiCo'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 / Andrii Hryvachevskiy, Ivan Prudyus, Leonid Lazko, Sergiy Fabirovskyy // Computation Problems of Electrical Engineering (CPEE-2016): XVII International Workshop, 14th – 17th September 2016.: Proceedings of Workshop. – Sandomierz, Poland. – 2016. (**Scopus**)

15. **Hryvachevskiy A.** An adaptive algorithm of moving objects detection / Andrii Hryvachevskiy, Vitaliy Nichoha, Ivan Prudyus, Sergiy 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 / Ivan Prudyus, Viktor Tkachenko, Leonid Lazko, Petro Kondratov, Sergiy Fabirovskyy, **Andrii 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 / Andrii Hryvachevskiy, Sergiy Fabirovskyy, Leonid Lazko, Viktor 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 / Ivan Prudyus, Leonid Lazko, **Andrii Hryvachevskiy**, Sergiy 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. 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.

22. **Hryvachevskiy A.** Methods of multispectral image fusion at the pixel level / Andrii Hryvachevskiy, Ivan Prudyus, Leonid Lazko, Sergiy 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. **Hryvachevskiy 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.

АНОТАЦІЯ

Гривачевський А. П. Підвищення інформативності мультиспектральних систем моніторингу шляхом комплексування зображень видимого та інфрачервоного діапазонів. – На правах рукопису.

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

В дисертаційній роботі розв’язано актуальне науково-технічне 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. Удосконалена багатокритеріальна метрика оцінювання інформативності зображень невідомого сюжетного змісту. 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. Розроблений адаптивний до дестабілізуючих факторів метод та алгоритм виявлення рухомих об’єктів під час відеомоніторингу. На основі розроблених технологій вдалося збільшити імовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації рухомих об’єктів мультиспектральною системою моніторингу, що, в свою чергу, дало змогу збільшити віддаль ефективного спостереження на 11%.

Ключові слова: мультимодальне комплексування зображень, інформативність, мультиспектральний моніторинг, дискретне вейвлет-перетворення.

ABSTRACT

Hryvachevskiy 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.

In the dissertation, an actual scientific and technical task was solved for the development of effective methods for increasing efficiency, namely, raising the information content and reducing the amount of redundant information in multispectral optical-electronic systems for monitoring objects and scenes that incorporating imaging sensors of the visible and infrared ranges of electromagnetic waves. The multi-criteria metric for evaluating the informativeness of images of unknown plot content is improved. The developed method and algorithm for multimodal integration of the visible and infrared ranges images based on discrete wavelet transform, in which, unlike the known methods, the formation of low-frequency wavelet coefficients of the resulting wavelet spectrum of a complex image is based on the regression analysis of the corresponding parts of the incoming wavelet spectra, informativeness of the fused image is improved by about 10%, as well as reduced the amount of data without useful information on the average by 26.72%, compared with the amount of data received on partial channels of the visible and infrared ranges. An adaptive method and algorithm for detecting moving objects to destabilizing factors during video monitoring are developed. Based on the developed technologies, it was possible to increase the probability of moving objects detecting, recognizing and identifying with a multispectral monitoring system, which in turn made it possible to increase the effective observation distance up to 11%.

Keywords: multimodal image fusion, informativeness, multispectral monitoring, discrete wavelet transformation.

АННОТАЦИЯ

Гривачевский А. П. Повышение информативности мультиспектральных систем мониторинга путем комплексирования изображений видимого и инфракрасного диапазонов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 – радиотехнические и телевизионные системы. – Национальный университет «Львівська політехніка» Министерства образования и науки Украины, Львов, 2018.

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача разработки методов повышения эффективности, а именно повышение информативности и уменьшения количества избыточной информации, формируемой мультиспектральными оптико-электронными системами мониторинга объектов и сцен, имеющими в своем составе сенсоры видимого и инфракрасного диапазонов электромагнитных волн. Усовершенствованная многокритериальная метрика оценки информативности изображений неизвестного сюжетного содержания. Разработан метод и алгоритм мультимодального комплексирования изображений видимого и инфракрасного диапазонов на основе дискретного вейвлет-преобразования в котором, в отличие от известных методов, формирование низкочастотных вейвлет-коэффициентов результирующего вейвлет-спектра комплексованного изображения базируется на основе регрессионного анализа соответствующих частей вейвлет-спектров входящих изображений позволяет повысить информативность

комплексированного изображения примерно на 10%, а также уменьшить объем данных без потери полезной информации в среднем на 26.72%, по сравнению с суммой данных, получаемых по каналам видимого и инфракрасного диапазонов. Разработан адаптивный к дестабилизирующим факторам метод и алгоритм обнаружения движущихся объектов при видеомониторинге. На основе разработанных технологий удалось увеличить вероятность обнаружения, распознавания и идентификации движущихся объектов мультиспектральной системой мониторинга, что, в свою очередь, позволило увеличить расстояние эффективного наблюдения на 11%.

Ключевые слова: мультимодальное комплексирование изображений, информативность, мультиспектральный мониторинг, дискретное вейвлет-преобразования.