

## МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ КОМПЛЕКСУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ І ТЕПЛОВИХ СИГНАЛІВ

М. О. Линник, А. Й. Наконечний

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра комп’ютеризованих систем автоматики  
E-mail: [maksym.o.lynyk@lpnu.ua](mailto:maksym.o.lynyk@lpnu.ua), [adrian.y.nakonechnyi@lpnu.ua](mailto:adrian.y.nakonechnyi@lpnu.ua)

© Линник М. О., Наконечний А. Й., 2023

У роботі розглянуто можливі підходи до поліпшення якості формування сигналів зображень як у світлий, так і в темний період доби, а також зменшення впливу шумів, завад та артефактів на характеристики сигналів зображень. Запропоновано використовувати вейвлет-область для аналізу теплових та сигналів зображень із подальшим їх можливим комплексуванням. Вказано основні особливості формування таких сигналів. Показано, що запропонований підхід дає змогу покращити якісні характеристики сигналів зображень, особливо в темний період часу, а також забезпечити ефективне їх оброблення, пов’язане із фільтруванням, компресією, масштабуванням та зміною контрастності. Здійснено порівняння отриманих результатів запропонованого методу з іншими аналогічними підходами до оброблення сигналів.

Ключові слова: теплові сигнали; відеосигнали; комплексування сигналів; вейвлет-перетворення.

### Вступ

Протягом усієї історії використання відеокамер основною проблемою в них було забезпечення високої якості й контрастності зображень, особливо у малоосвітлених місцях та в темну пору доби. Для покращення таких зображень використовували різні методи і підходи, пов’язані з виділенням і підсиленням маловидимих частин зображень. Останнім часом для таких випадків додатково використовують теплові сигнали, на основі яких формуються сигнали зображень. Однак, якщо використовувати сигнали лише такого типу, то складно досягти якісних зображень у світлу частину доби. З огляду на це, у багатьох випадках використовують дві камери, тобто відео та теплову. Таке комплексування відео та теплових сигналів підвищує ефективність систем відеоспостереження в умовах обмеженої видимості, таких як туман, дим або нічний час. Відео може бути непродуктивним у таких ситуаціях, оскільки об’єкти іноді погано видимі. Теплові сигнали, які відображають теплове випромінювання об’єктів, не залежать від видимості й можуть надати корисну інформацію про рух об’єктів, навіть у поганих умовах видимості. Комбінування відео та теплових сигналів дає змогу підвищити чутливість системи виявлення рухомих об’єктів і забезпечити надійне детектування навіть у складних умовах. З огляду на це в останніх технічних розробках дослідники намагаються сумістити роботу відео та теплових камер. Основна складність таких камер полягає у тому, що обробка різних сигналів за довжиною хвиль в таких пристроях здійснюється в різних областях і реалізація їх суміщення істотно ускладнюється. З огляду на це в роботі запропоновано використання енергетичної області для подання обох сигналів (вейвлет-області) й комплексування їх в цій області, що дає змогу забезпечити якісніше покращення сигналів зображень у різні часи доби.

## Аналіз останніх досліджень та публікацій

Проведення спостережень в умовах низького рівня освітленості та у повній темряві є одним із найважливіших напрямів досліджень, що здійснюються в галузі електронного приладобудування. Відомо, що потреба в таких високоефективних приладах особливо велика у військовій справі, а також у різних нових галузях народного господарства [10, 13]. Сучасні досягнення у цій сфері, особливо в останні десятиріччя, сприяли появі нових приладів спостереження з багатьма інформаційними каналами, як мінімум телевізійними та тепловізійними. Для об'єднання інформації таких каналів використовують операцію комплексуювання сигналів [9, 12]. Дослідження останніх років у сфері комплексуювання засвідчили високу якісну і кількісну перевагу у вирішенні завдань виявлення, розпізнавання, стеження та наведення на відповідні об'єкти [11]. Комплексуювання підвищує інформативність результуючого зображення порівняно із зображеннями, отриманими в окремих каналах системи, що істотно покращує усвідомлення ситуації оператором і збільшує ефективність системи загалом. Зрозуміло, що телевізійний канал формує в просторі контрасти об'єктів за рахунок відбиття сонячної енергії у видимому діапазоні частот, що приводить до зміни рівнів сигналів залежно від стану зовнішнього освітлення. З іншого боку, тепловізійний канал має малозмінний сигнал, оскільки сприймає випромінювання об'єктів відносно фону, яке змінюється доволі повільно. Крім того, денні та нічні умови спостереження в каналах також можуть відрізнятися суттєво. Як показують відповідні дослідження, для аналізу та комплексуювання сигналів найкраще використовувати подання обох інформаційних сигналів у вейвлет-області з подальшим можливим їх комплексуюванням [8].

### 1. Комплексуювання відео та теплових сигналів

#### 1.1. Особливості формування відео- та теплових сигналів

Відомо, що відеосигнал – це електричний сигнал, який передає візуальну інформацію про об'єкти за допомогою видимого світла. Сучасні відеокамери формують відеосигнали у діапазоні довжин хвиль від 380 до 700 нанометрів, однак вони не обов'язково захоплюють усі кольори спектра. Залежно від типів сенсорів, відеокамери можуть мати різну чутливість до різних довжин хвиль світла. Для прикладу, камери із CMOS сенсорами працюють в інтервалі від 1100 нм (інфрачервоне світло) до 200 нм (ближній ультрафіолет), а камери із CCD працюють із хвилями довжиною 400–1050 нм, що особливо важливо у детектуванні світла (фотометрії), а також у медичних та професійних цілях, де потрібні зображення із високою роздільною здатністю.

Натомість, теплові сигнали існують у інфрачервоному діапазоні, тобто із довжинами хвиль від 700 нм до 1 мм. Для детектування цих сигналів використовуються термічні камери, або тепловізори. В таких камерах сенсорами є матриці із тисячами детекторів, чутливих до ІЧ-променів, які перетворюють тепловий сигнал на електричний. Сучасні тепловізори зазвичай працюють у двох основних діапазонах: короткохвильовому (SWIR) та середньохвильовому (MWIR). SWIR діапазон має довжину хвилі від 1,4 до 3 мкм, а MWIR діапазон – від 3 до 8 мкм.

Відомо також, що людське око сприймає зображення у вигляді відбитого різними об'єктами світла. Відсутність світла означає відсутність відображення. Теплові зображення, з іншого боку, не залежать від видимого світла. Натомість, вони формуються за допомогою роботи в тепловому ІЧ-спектрі й працюють навіть у повній темряві, оскільки рівень навколишнього освітлення не має значення.

#### 1.2. Переваги комплексуювання відео та теплових сигналів

Комплексуювання відео- та теплових сигналів передбачає підсумування інформації, отриманої з відео- та теплових сигналів для отримання повнішої та кориснішої картини про спостережувані об'єкти. Такий процес охоплює синхронне відображення й аналіз відео- та теплових зображень, а також об'єднання їх в одне інтегроване зображення.

Поєднання відео- та теплових сигналів є корисним у певних випадках, залежно від комбінацій цих систем можна виявити ті чи інші особливості, які раніше могли бути непоміченими, збільшити точність відображення і покращити сприйняття людського зору. До вагомих переваг поєднання відео- та теплових сигналів можна зарахувати:

- *отримання додаткової інформації*; комплексування відео- та теплових сигналів [2] дає змогу отримати повніші відомості про ситуацію або об'єкт; теплові зображення дають додаткову інформацію про тепловий розподіл, температурні відмінності та області з підвищеною тепловою активністю, що не видимі на звичайних відеозаписах, і виявляти приховані проблеми, аномалії або небезпеку;
- *покращення детектування (виділення)*; комплексний аналіз відео- та теплових сигналів забезпечує точніше детектування об'єктів або подій [3];
- *підвищення ефективності аналітики*; комбінування відео- та теплових сигналів дає змогу застосовувати розумну аналітику даних для отримання корисної інформації [6];
- *розширення можливостей в галузі безпеки*; поєднання відео- та теплових сигналів є ефективним інструментом у сфері безпеки; відеозапис забезпечує візуальну ідентифікацію, а теплові зображення доповнюють його.

Отже, вказані переваги підтверджують важливість поєднання відео- та теплових сигналів для отримання повнішої та точнішої інформації, підвищення безпеки та ефективності процесів у різних галузях [2].

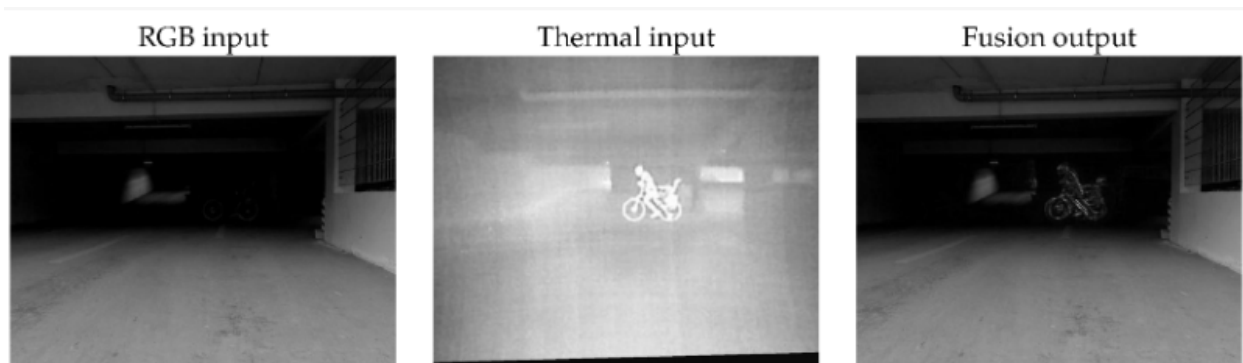


Рис. 1. Поєднання тепловізійної та відеоінформації

### 1.3. Інтегровані тепловізійні камери

Інтегровані тепловізійні камери поєднують відео- та тепловий функціонал в одному пристрої, мають два сенсори – один для відтворення відеозображень, інший – теплових зображень [4]. До особливостей та функцій інтегрованих тепловізійних камер можна зарахувати: двоканальне знімання, об'єднання відео та теплових зображень, синхронізацію даних, розширення функцій інтеграції [4].

Інтегровані тепловізійні системи використовують для підвищення безпеки та нагляду в об'єктах, таких як аеропорти, порти, промислові комплекси, для раннього виявлення пожежі або зростання температури, для медичних діагностичних процедур, для пошуку втрачених або заблокованих людей під час природних катастроф.

Щоб забезпечити точну відповідність під час перетворення та оброблення відео- та теплових сигналів у процесі комплексування повинна здійснюватись відповідна їх синхронізація. Необхідно враховувати, що синхронізація відео- та теплових сигналів є критичним елементом у комплексуванні, оскільки невідповідне забезпечення синхронізації може призвести до неточного або неправильного відображення інформації. Тому розробники систем комплексування приділяють велику увагу синхронізації та використанню різних технік і методів для її забезпечення.

Виділяють такі види синхронізації: синхронізація часу, синхронізація фреймів, синхронізація координат, синхронізація калібрування [2].

Отже, реалізація синхронізації у системах комплексування відео та теплових сигналів забезпечує необхідну точну інтеграцію та відображення відео- та теплової інформації, що розширює можливості спостереження, контролю та аналізу в різних галузях застосування.

## 2. Постановка завдання

Завдання полягає в аналізованні основних методів комплексування відео- та теплових сигналів для визначення можливих напрямів покращення якісних характеристик та оцінювання ефективності основних метрик, таких як точність, чутливість, специфічність та швидкодія.

## 3. Аналіз методів та вибір комплексування відео- і теплових сигналів

Сучасні методи комплексування відео- та теплових сигналів дають змогу отримати додаткову корисну інформацію із різних джерел. Вибір методу комплексування переважно визначається поставленим завданням і сформульованими вимогами до кінцевих зображень. Сьогодні відомо кілька методів комплексування відео- та теплових сигналів, до яких належать передусім методи спільної реєстрації, синтезу зображень, об'єднання даних і опрацювання та аналізу даних.

*Метод спільної реєстрації.* Цей метод є одним з ключових методів комплексування відео- та теплових сигналів. Його використовують для вирівнювання відео- та теплових зображень, виявлення та врахування геометричних трансформацій, таких як зміщення, масштабування та обертання [2], забезпечуючи точну відповідність між об'єктами та деталями на зображеннях з різних джерел. На рис. 2 наведено процес спільної реєстрації та нормалізації на прикладі людського мозку. Згідно із алгоритмом спершу виявляють особливості на відео- та теплових зображеннях. Особливостями можуть бути точки, куточки або дескриптори, які можна локалізувати та описати. Після виявлення особливостей встановлюють відповідності між особливостями на відео- та теплових зображеннях.

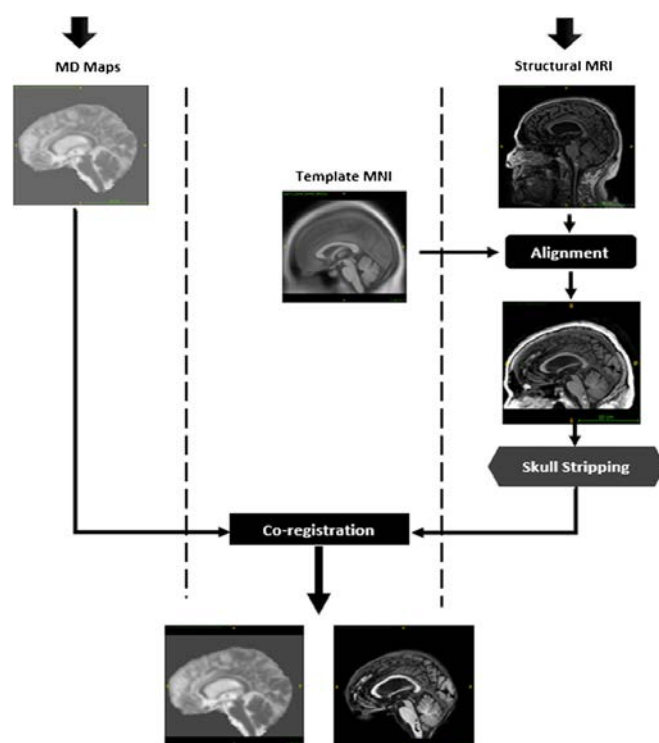


Рис. 2. Структура процесу спільної реєстрації і нормалізації на прикладі людського мозку

Наступний крок передбачає здійснення трансформації між відео- та тепловими зображеннями, під час якого можуть відбуватися зсув, масштабування, обертання або комбінація згаданих операцій.

Важливим кроком є оцінювання якості спільної реєстрації, яка забезпечується оцінюванням метрик, таких як сума квадратів різниць або кореляція між вирівняними зображеннями.

Метод спільної реєстрації може передбачати різні підходи та техніки, до яких можна зарахувати:

- пошук за шаблоном, який полягає у пошуку відповідних областей на відео- та теплових зображеннях із порівнянням шаблонів;
- визначення оптичного потоку, яке визначає швидкість руху об'єктів на відео, аналізуючи зміни піксельних значень між послідовними кадрами;
- здійснення кореляційної фільтрації, основаної на використанні кореляційних фільтрів для знаходження максимальної схожості між відео- та тепловими зображеннями [4];
- визначення особливих ознак або дескрипторів, за якими проводиться оцінка відповідності між відео- та тепловими зображеннями [4];
- визначення геометричних відповідностей, що передбачає використання геометричних принципів для визначення відповідності між відео- та тепловими зображеннями.

Необхідно зазначити, що метод спільної реєстрації відео- та теплових сигналів має низку істотних переваг, до яких зараховують передусім високу точність вирівнювання об'єктів і деталей на відео- та теплових зображеннях, можливість збереження інформації, а також прогнозування руху, виявлення аномалій, визначення теплового профілю.

До недоліків цього методу можна зарахувати насамперед можливість впливу шуму на вхідних зображеннях на правильність вирівнювання об'єктів, висока обчислювальна складність, особливо під час роботи з великими обсягами даних, встановлення певних вимог до умов освітлення. Вплив інтенсивного руху об'єктів може призвести до появи артефактів або розмиття.

*Метод синтезу зображень.* Спрямований на поєднання відео- та теплових зображень в одне комплексне зображення. Згідно із цим методу відбувається накладання теплової інформації на відео, створення мозаїчного зображення або використання алгоритмів синтезу зображень для поєднання інформації з обох джерел [3].

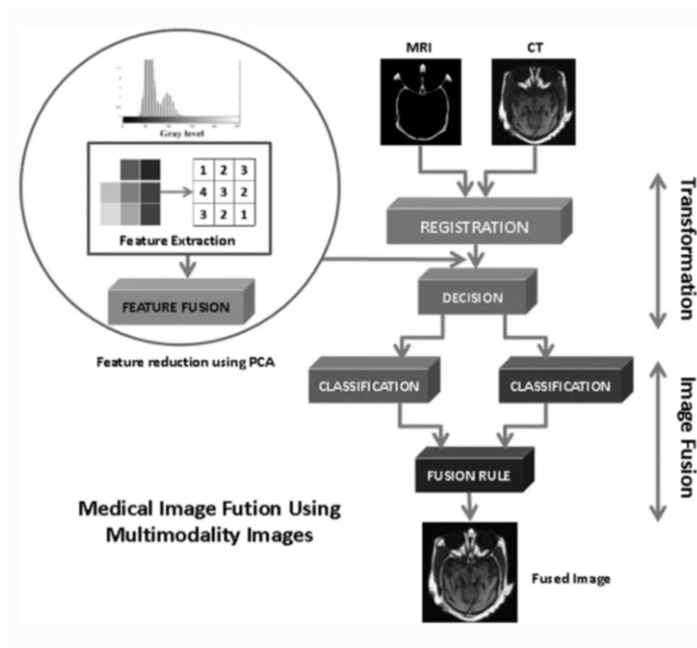


Рис. 3. Структура, що використовує метод синтезу зображень

Синтез зображень відповідає об'єднанню інформації з різних джерел або модальностей з метою створення нового зображення, яке містить повнішу контекстуальну інформацію. У контексті комплексуювання відео- та теплових сигналів синтез зображень використовується для поєднання відео та теплових зображень з метою отримання повнішого та інформативнішого зображення, яке може допомогти у розпізнаванні об'єктів, виявленні патернів та аналізі ситуацій [4].

Цей метод ґрунтується на використанні принципів теорії нечітких множин, яка дає змогу перетворювати числові дані на нечіткі множини, моделювати та обробляти нечітку інформацію [2], використовувати методи логічних правил або алгоритми нечіткої логіки для поєднання інформації з різних джерел [2]. Цей метод комплексуювання відео- та теплових сигналів також відзначається гнучкістю та простотою інтеграції, його легко впровадити в різноманітні пристрої, зокрема мобільні телефони, планшети, комп'ютери та спеціалізовані системи.

Відомо кілька підходів до синтезу зображень, а саме:

- ваговий сумісний синтез; передбачено використання відповідних вагових коефіцієнтів для кожного зображення залежно від їхньої важливості або якості; зображення об'єднують за допомогою зваженого додавання: ваги відображають ступінь впливу кожного зображення на кінцевий результат;
- формування моделі на основі перетину; використовується операція перетину для об'єднання зображень; піксель кінцевого зображення обчислюють, вибираючи мінімальне значення із пікселів вхідних зображень;
- формування моделі на основі об'єднання; використовується операція об'єднання для об'єднання зображень; піксель кінцевого зображення обчислюють, вибираючи максимальне значення із пікселів вхідних зображень;
- виконання мультискейлового аналізу; аналізують зображення різних масштабів для виділення різних деталей та структур; зображення розділяють на різні масштаби, а потім об'єднують, враховуючи інформацію кожного масштабу.

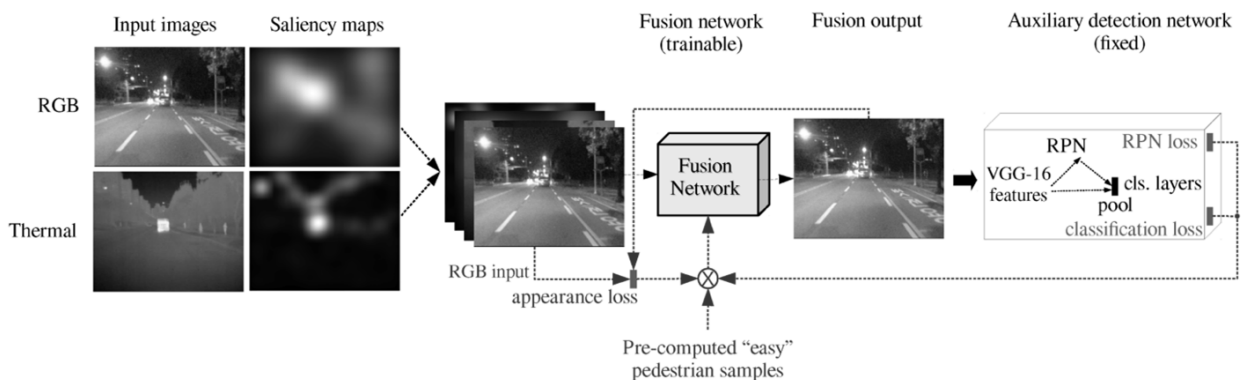


Рис. 4. Перетворення двох зображень на одне за допомогою методу синтезу

Метод синтезу зображень має низку переваг, до яких належать передусім:

- покращена якість зображення; синтез зображень дає змогу отримати контрастніші, чіткіші, детальніші та контекстуально багатші зображення, поєднуючи інформацію з різних джерел;
- підвищена розпізнаваність об'єктів; комплексуювання відео та теплових сигналів дає змогу отримати повнішу інформацію про об'єкти, їх тепловий слід та візуальну зовнішність, що поліпшує їх розпізнаваність і виявлення;
- покращена робота в умовах обмеженої видимості; поєднуючи відео та теплові сигнали, можна отримати зображення, яке відображає теплову інформацію об'єктів навіть за обмеженої видимості або поганих освітлювальних умов.

Одночасно є і деякі виклики під час використання синтезу зображень, зокрема:

- вирішення завдання вирівнювання зображень; об'єднання відео- та теплових зображень потребує точного вирівнювання двох зображень з різних джерел та коректного поєднання їх інформації.
- вибір оптимального методу; оскільки сьогодні є багато способів синтезу зображень, то вибір найефективнішого залежить від конкретного застосування, доступних даних та вимог до точності та ефективності.

Враховуючи переваги та виклики, метод синтезу зображень є потужним інструментом у комплексуванні відео- та теплових сигналів, який дає змогу отримати повнішу та контекстуально багатшу інформацію для різних сфер застосування, ураховуючи моніторинг, безпеку, навігацію та розпізнавання об'єктів.

*Метод об'єднання даних.* Метод використовується для поєднання відео- та теплових даних на рівні даних, а не лише на рівні зображень. Це передбачає синхронізацію, агрегацію та обробку даних з обох джерел для отримання повнішої та комплекснішої інформації. Об'єднання даних є важливим етапом у комплексуванні відео- та теплових сигналів. Цей процес охоплює збирання, оброблення та поєднання інформації з різних джерел для отримання повнішої та інформативнішої картини.

Основна мета об'єднання даних полягає в такому поєднанні відео та теплової інформації, щоб отримати збалансований набір даних, який максимізує інформаційну цінність і допомагає зрозуміти ситуацію. Переважно методи об'єднання даних передбачають:

- синхронізацію часу; відео та теплові дані повинні бути синхронізовані в часі для правильного відображення подій та явищ, що потребує використання синхронізаційних пристроїв;
- калібрування даних; теплові дані можуть потребувати калібрування для відображення реальних температур об'єктів;
- форматування та оброблення даних; відео та теплові дані можуть мати різні формати і роздільну здатність, а тому для їх об'єднання і суміщення здійснюються перетворення та оброблення даних;
- об'єднання інформації; відео та теплові дані можуть бути об'єднані різними способами, зокрема злиттям зображень, статистично, використанням алгоритмів вирішення конфліктів, що додатково дає змогу поєднати візуальну та теплову інформацію;
- візуалізацію та аналіз; об'єднані дані можна візуалізувати та проаналізувати з використанням спеціальних програмних засобів або інструментів.

Метод об'єднання даних під час комплексування відео та теплових сигналів має певні переваги та недоліки, які варто враховувати під час його застосування. Так, збільшення об'єму інформації у результаті об'єднання відео та теплових даних дає змогу отримати повнішу та контекстуально багатшу інформацію про об'єкти та події, а комплексування сигналів – зменшити вплив шуму та появу затемнень, які можуть виникати в одному з джерел, крім цього досягати високої роздільної здатності для виявлення дрібних деталей об'єктів [1].

Звичайно, є й деякі недоліки об'єднання цих сигналів, зокрема:

- складність оброблення; для об'єднання відео та теплових сигналів необхідно використовувати складні алгоритми опрацювання та аналізу даних, що потребує значних обчислювальних ресурсів та експертних знань для ефективної реалізації.
- висока вартість; використання обладнання та програмного забезпечення для комплексування відео- та теплових сигналів є достатньо витратним.
- залежність від зовнішніх умов; деякі методи об'єднання даних чутливі до зміни умов освітлення, температури та інших зовнішніх факторів, що може впливати на якість та надійність отриманих даних.

Незважаючи на згадані недоліки, метод об'єднання даних є ефективним інструментом для отримання повнішої та ціннішої інформації з використанням відео та теплових сигналів. Враховуючи переваги та недоліки, важливо вибирати підходи та методи, які найкраще відповідають конкретним потребам споживача.

*Метод обробки та аналізу даних.* Цей метод використовують для виділення корисної інформації з відео- та теплових даних із застосуванням різноманітних алгоритмів та технік, таких як виявлення об'єктів, відстеження, класифікація, вимірювання температури тощо [2].

Метод оброблення та аналізу даних займає одне з центральних місць під час комплексуювання відео та теплових сигналів. Він охоплює широкий спектр технік та підходів для оброблення та аналізу отриманих даних з метою отримання цінної інформації та розуміння різних аспектів спостережуваної сцени.

Спочатку відбувається етап фільтрації, нормалізації, шумозаглушення та використання інших технік для покращення якості та однорідності даних. Він спрямований на видалення шуму, вирівнювання освітленості, компенсацію перекривання об'єктів та здійснення інших коригувань для поліпшення якості даних.

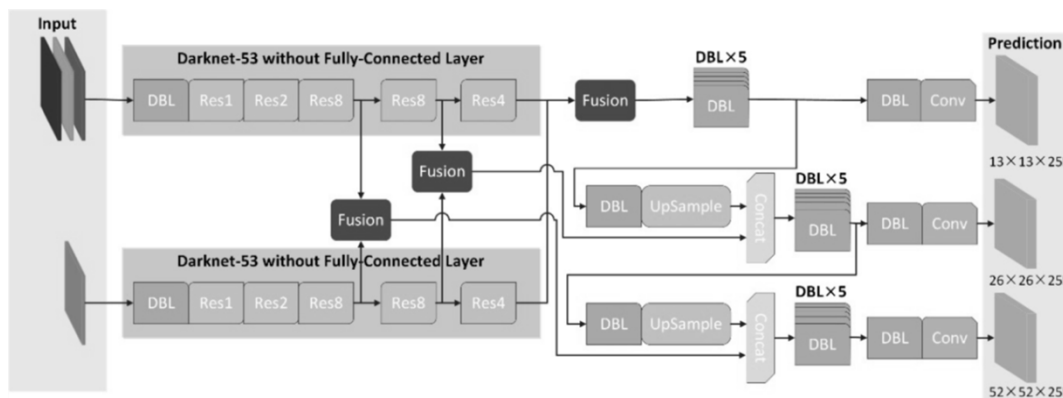


Рис. 5. Структура виконання операцій за методом оброблення та аналізу даних

Надалі відбувається виокремлення корисних ознак з оброблених даних. До них можуть належати статистичні характеристики, текстурні ознаки, геометричні ознаки, часові характеристики та інші аспекти, які відображають важливі аспекти досліджуваних об'єктів та сцен.

На наступному етапі аналізу даних на основі оброблених ознак застосовують різні методи та алгоритми для виявлення, класифікації, розпізнавання та інтерпретації об'єктів і сцен. Можуть використовуватися методи машинного навчання, статистичний аналіз, неймережеві моделі, алгоритми штучного інтелекту та інші підходи для отримання підсумкової інформації та визначення особливостей [7]. На завершальному етапі відбувається візуалізація та інтерпретація одержаних результатів, яка може передбачати візуалізацію об'єктів на зображеннях, створення карт або графіків, аналіз статистичних залежностей та виокремлення важливих патернів. Візуалізація допомагає краще розуміти та інтерпретувати результати обробки та аналізу даних.

Отже, метод оброблення та аналізу даних передбачає низку принципів, необхідних для ефективного використання даних і отримання цінної інформації, а саме: збалансованість точності та оброблення даних, зокрема великого обсягу, машинне навчання та статистику розпізнавання та виявлення важливих ознак, використання візуалізації, яка дає змогу подавати складні дані у вигляді зручних форм для встановлення залежностей у них, контроль якості даних, який дає змогу виявляти та виправляти помилки, виконувати фільтрування шуму і компенсацію відсутніх даних, оцінювання ефективності оброблення даних з погляду обчислювальної складності й часу виконання операцій, врахування контексту задач і специфіки даних, які повинні бути адаптованими до конкретних задач і враховувати особливості відео- та теплових сигналів [4].

До переваг методу оброблення та аналізу даних можна зарахувати:

- висока ефективність швидкого оброблення великих обсягів даних; використання оптимізованих алгоритмів та методів машинного навчання уможливорює швидке виявлення патернів та отримання цінної інформації з даних;



- висока точність одержаних результатів, оскільки цей метод дає змогу здійснювати детальний аналіз даних та виявляти складні залежності й забезпечувати точні прогнози;
  - оцінювання контексту даних і навколишньої ситуації, що допомагає виявляти складні зв'язки та встановлювати взаємозв'язки між різними елементами даних;
  - можливість автоматизації та зменшення впливу людського фактора.
- Основні складності реалізації методу оброблення та аналізу даних полягають у:
- залежності методу від якості вхідних даних; для реалізації потрібні високоякісні вхідні дані для досягнення точних і надійних результатів.
  - складності вибору ефективного методу оброблення та аналізу даних, що вимагає глибокого розуміння проблеми та особливостей даних.
  - обмеженій інтерпретованості результатів; у разі застосування складних алгоритмів машинного навчання можна отримати результати без чіткого теоретичного їх пояснення.

Наведений метод оброблення та аналізу даних є одним з важливих методів комплексування відео та теплових сигналів. Він дає змогу отримати істотну важливу інформацію з даних, здійснювати розпізнавання об'єктів, вирішувати завдання класифікації та розуміння навколишньої ситуації. Однак забезпечення ефективної обробки та аналізу даних може стикатися з викликами, пов'язаними зі складністю опрацювання великого обсягу даних, забезпеченням точності та ефективності алгоритмів, а також використанням підходів до розуміння складних сцен та об'єктів.

#### **4. Комплексування відео та теплових сигналів у часо-частотній, вейвлет-області**

Відомо, що основною метою комплексування цифрових телевізійних і тепловізійних зображень є поліпшення якості зображення, що містить інформативні елементи зображень тієї самої сцени, отримані в різних спектральних діапазонах. У такому разі одержання вихідних зображень у вейвлет-області передбачає розкладання кожного вихідного зображення на низькочастотні й високочастотні складові, роздільне опрацювання низько- і високочастотних компонентів зображень, комплексування компонент, основане на принципі зваженого підсумовування для кожного пікселя, формування результуючого зображення. Здійснюють багаторівневу декомпозицію кожного вихідного зображення за допомогою швидкого дискретного стаціонарного двовимірного вейвлет-перетворення, щоб отримати апроксимувальну складову, що являє собою низькочастотну компоненту зображення, і сім'ї деталізуючих складових, які є високочастотними компонентами зображення. Потім визначають значення матриць енергетичних характеристик пікселів на всіх рівнях розкладання для кожного зображення. Здійснюється фільтрація усіх складових, що передбачає коригування із адаптивною зміною значень відповідно до міжрівневої динаміки їх енергетичних характеристик і усунення шумової мікроструктури адаптивним пороговим обмеженням значень на кожному рівні розкладання. Для кожного розкладання визначають корегувальні функції яскравості та контрасту, параметром яких є значення апроксимувальної складової. Яскравості діапазонів кожного розкладання вирівнюють, перетворюючи апроксимувальні складові коригувальних функцій яскравості. Для кожного пікселя на кожному рівні розкладання обчислюють компоненти синтезованого зображення за допомогою виваженого підсумовування значень відповідних складових розкладів вихідних зображень з використанням вагових функцій. Фільтрація усіх складових синтезованого зображення передбачає коригування із адаптивною зміною значень відповідно до міжрівневої динаміки їх енергетичних характеристик і усунення шумової мікроструктури за рахунок адаптивного порогового обмеження значень на кожному рівні розкладання. Надалі обчислюють коригувальну функцію яскравості й коригувальна функція контрасту, параметром яких є значення апроксимувальної складової синтезованого зображення. Перетворена апроксимувальна складова дає можливість коригувати функцію яскравості. Синтезоване зображення формують, здійснюючи реконструкцію, за допомогою зворотного швидкого дискретного двовимірного вейвлет-перетворення, що застосовується до деталізуювальних

складових синтезованого зображення і апроксимувальної складової синтезованого зображення, а діапазон яскравості результуючого зображення узгоджується з параметрами відеосистеми.

Основна особливість і складність комплексуювання відео та теплових сигналів полягають в тому, що ці сигнали містяться у різних частотних діапазонах (420–800 мкм для відео і 2–12 мкм для тепловізійного сигналів) і мають різні рівні інтенсивності. З огляду на це зручно подати обидва сигнали в одній вейвлет-області, де вони мають однакове енергетичне представлення. В результаті такого подання отримують дві множини вейвлет-коефіцієнтів обох сигналів у часо-частотній області.

Якщо залежності відеосигналу  $f_1(x)$ , теплового  $f_2(x)$ , базової функції  $g(x)$  є функціями скінченної енергії (в  $L^2(R)$  просторі), а  $g(x)$  є допустимою функцією, то вейвлет-перетворення обох сигналів можна подати так

$$(W_\psi f_1) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f_1(x) g(x) dx, f_1 \in L^2(R) \quad (4.1)$$

$$(W_\psi f_2) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f_2(x) g(x) dx, f_2 \in L^2(R) \quad (4.2)$$

Важливою особливістю такого подання є те, що для вейвлет-перетворення обох сигналів використовується однакова базова функція.

У випадку прямого дискретного вейвлет-перетворення (ДВП) обчислюють “вейвлет-коефіцієнти”  $c'_{j,k}$  ( $j = 1, \dots, J$ ) і масштабні коефіцієнти  $b'_{j,k}$  сигналів зображень:

$$\text{ДВП}\{x'[n]; 2^j, k2^j\} = c'_{j,k} = \sum_n x'[n] g_j[n - 2^j k], \quad b'_{j,k} = \sum_n x'[n] h_j[n - 2^j k] \quad (4.3)$$

та “вейвлет-коефіцієнти”  $c''_{j,k}$  ( $j = 1, \dots, J$ ) і масштабні коефіцієнти  $b''_{j,k}$  теплових сигналів

$$b''_{j,k} = \sum_n x''[n] h_j[n - 2^j k] \text{ ДВП}\{x''[n]; 2^j, k2^j\} = c''_{j,k} = \sum_n x''[n] g_j[n - 2^j k], \quad (4.4)$$

де  $\sum_n x'[n]$  – сума вибірок сигналу зображень;  $\sum_n x''[n]$  сума вибірок теплового сигналу;  $g_j[n - 2^j k]$  – аналізуюча дискретна малохвильова функція;  $h_j[n - 2^j k]$  – аналізуюча масштабна функція.

У результаті підсумування отриманих коефіцієнтів обох перетворень одержимо

$$C_{j,k} = k \left\{ \sum_{m=0}^{M-1} (c'_{j,k})_m + \sum_{n=0}^{N-1} (c''_{j,k})_n \right\}. \quad (4.5)$$

Остаточний крок передбачає отримання вихідного сигналу у вигляді часових вибірок, що реалізується за допомогою оберненого ДВП

$$x[n] = \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k \in Z} C_{j,k} g_j[n - 2^j k] + \sum_{k \in Z} B_{j,k} h_j[n - 2^j k]. \quad (4.6)$$

Функціональну схему комплексуювання сигналів наведено на рис. 6.

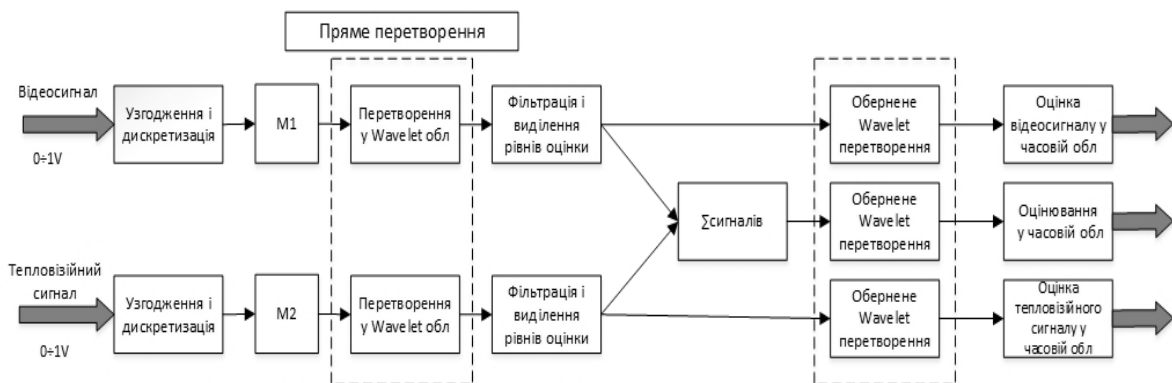


Рис. 6. Функціональна схема комплексуювання теплових та відеосигналів у вейвлет-області

Оскільки розміри відео та тепловізійних зображень здебільшого не збігаються, щоб уникнути розбіжностей під час накладання, після їх узгодження та дискретизації вони повинні проходити обов’язкове масштабування. Подання у вейвлет-області обох сигналів дає можливість не лише підсумувати сигнали в енергетичній області, а і фільтрувати їх від завад та шумів, відкидаючи малозначущі вейвлет-коефіцієнти.

Необхідно зазначити, що забезпечити високі якісні характеристики для такого подання можливо у випадку використання однотипної базової вейвлет-функції для обох перетворень. Вибір такої базової функції є завданням подальших досліджень.

Важливою перевагою такого комплексування зображень та теплових сигналів, фізичне походження яких різне, є те, що ця операція відбувається в одній вейвлет-області. Крім того використання такого перетворення дає змогу всебічніше аналізувати такі сигнали та змінювати глибину їх розкладу, що своєю чергою дає можливість широко впливати на характеристики вихідних сигналів.

### **5. Напрями покращення методів комплексування зображень та теплових сигналів**

Для поліпшення алгоритмів комплексування зображень та інфрачервоного термального сигналів додатково використовують такі підходи.

1. Калібрування кольорів. Залежно від особливостей конкретних камер і сцен, можуть виникати відхилення у кольоровому передаванні даних. Тому можливого покращення можна добитись калібруванням кольорів зображень, яке дає змогу вирівнювати колірний баланс і досягати точнішого комбінування.

2. Покращення контрастності. Переважно контрастність термального зображення низька, що впливає на якість комбінованого зображення. Використання технік покращення контрастності, таких як гістограмне розтягнення або адаптивне вирівнювання гістограми, може поліпшити якість комбінованого зображення.

3. Використання комп'ютерного зору: Додавання комп'ютерного зору до алгоритму може покращити розпізнавання об'єктів на комбінованому зображенні. Наприклад, можна застосувати алгоритми виявлення контурів, сегментації об'єктів або класифікації для автоматичного виділення та підкреслення об'єктів, які нас цікавлять, на комбінованому зображенні.

4. Оптимізація швидкодії: Під час опрацювання великого обсягу зображень може виникати проблема швидкодії. Оптимізація алгоритму та використання паралельних обчислень або GPU-прискорення може зменшити час обробки та забезпечити плавне відтворення комбінованого зображення.

5. Використання вейвлет-перетворення для аналізу та підсумування обох сигналів.

Згадані покращення можуть поліпшити якість комплексованого зображення, розпізнавання об'єктів та забезпечити ефективніше оброблення великих обсягів даних. Необхідно враховувати специфічні потреби та обмеження конкретного додатка перед впровадженням будь-яких покращень.

### **Висновки**

Вибір конкретного методу комплексування залежить від специфічних вимог завдання. Важливо здійснити дослідження та оцінити ефективність різних методів на основі таких метрик, як точність, чутливість, специфічність та швидкодія. Такий підхід дасть змогу вибрати найефективніший метод для конкретного поставленого завдання.

Вибираючи метод комплексування відео та теплових сигналів, також потрібно враховувати характеристики доступного обладнання. Деякі методи можуть вимагати спеціального обладнання, такого як сенсори з високою роздільною здатністю або спеціалізовані пристрої для оброблення сигналів. Оцінювання доступності та вартості такого обладнання також має велике значення під час вибору методу.

Використання вейвлет-області для перетворення та підсумування обох сигналів дає можливість не лише перетворювати і якісно комплексувати сигнали в енергетичній області, а і фільтрувати їх від завад та шумів.

Отримані додаткові додатні характеристики під час комплексування сигналів дають можливість підвищувати точність та надійність виявлення об'єктів, зменшувати помилкові спрацювання і забезпечувати повнішу та зрозумілішу інформації про сцену. Комплексування відео та теплових сигналів дає змогу збільшити зоровий контекст, що сприяє поліпшенню прийняття рішень.

Під час вибору методу комплексування необхідно враховувати, що деякі методи складно реалізувати, вони потребують значних обчислювальних ресурсів. Крім того, можуть виникати складності із зіставленням і синхронізацією даних із різних джерел, а інтеграція різних типів сигналів може бути викликом під час роботи з різними форматами та розширеннями зображень.

## Список літератури

1. Lacruz Alcaraz, Ramón, Pablo García-Fogeda. "Signal Noise Filtering Using Wavelet Coefficient Temporal Correlation Techniques". *AIP Conference Proceedings*, Vol. 2293, No. 1, 2020, 200012. <https://doi.org/10.1063/5.0028948>
2. Nakonechnyy, A. Y., Lahun, I. I., Veres, Z. Ye., Nakonechnyy, R. A., Fedak, V. I. "Teoriya i praktyka obrobky syhnaliv u malokhvyly'oviy (wavelet) oblasti": monohrafiya. Rastr-7, 2020.
3. Veres Z. Ye. Nakonechnyy A. Y., "Metody otsinky yakosti zobrazen' ta shlyakhy yikh vdoskonalennya". *Komputerni tekhnolohiyi drukarstva*, 2008, No. 20, 69–81.
4. Alhoritm prostоровoho rozshirennya zobrazen' dlya zmeshennya spotvorenn' u rukhomikh ta nerukhomikh zbrazhenniakh / A. Y. Nakonechnyy, V. I. Fedak, Z. Ye. Veres. *Metody ta pryklady kontroly yakosti*, 2009, No. 23, 115–119. <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/4242>
5. Fedak V. I., Nakonechnyy A. Y. "Artifacts suppression in images and video. Non-local Means as algorithm for reducing image and video distortions" // *X International PhD Workshop on Systems and Control. Hluboka nad Vltavou, Czech Republic 2009*
6. Fedak V., Nakonechnyy A. "Spatio-Temporal Algorithm For Coding Artifacts Reduction In Highly Compressed Video", *Technical translations Automatic Control (AC)*, 2013, No. 2.
7. Lahun, I. I. "Bahatokryterial'na optymizatsiya vyboru bazovykh funktsiy v protsesi malokhvyly'ovoho peretvorennya syhnaliv", *Naukovyy zbirnyk Ukrayins'koyi akademiyi drukarstva "Komputerni tekhnolohiyi drukarstva"*, 2017, No. 37, 63–67.
8. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ktd\\_2017\\_1\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ktd_2017_1_10)
9. Kolobrodov V. H., Mykytenko V. I., Mamuta M. S. Otsinka efektyvosti bahatokanalnykh optyko-elektronnykh system sposterihannia z kompleksuvanniam informatsii // *Naukovi visti NTUU "KPI"*, 2012, No. 6, 127 – 131. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/NVKPI\\_2012\\_6\\_20](http://nbuv.gov.ua/UJRN/NVKPI_2012_6_20)
10. Mykytenko V. I., Baltabaiev M. M., Ponomarenko O. A. Kompleksuvannia zobrazen u tsilodobovykh dvokanalnykh systemakh sposterihannia, *Visnyk NTUU "KPI". Seriya Pryladobuuduvannia*, 2014, Vyp. 48(2), S. 43–49. [https://doi.org/10.20535/1970.48\(2\).2014.36023](https://doi.org/10.20535/1970.48(2).2014.36023)
11. R. H. Vollmerhausen et al., *Analysis and evaluation of sampled imaging systems*. Washington: SPIE Press, 2010, 304 p. <https://doi.org/10.1117/3.853462>
12. Rybalko M. S., Mykytenko V. I., Mamuta O. D. Otsinka pokaznykiv yakosti kompleksovanykh zobrazen v dvokanalnykh OESS, *Visnyk Cherkaskoho derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu*, 2011, No. 4, 57–62.
13. Kolobrodov V. H., Mykytenko V. I. *Kompleksuvannia informatsii v bahatokanalnykh optyko-elektronnykh systemakh sposterihannia: monohrafiia*. K.: Avers, 2013. 178 s. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/26769>
14. Young S. S., Driggers R. G., Jacobs E. L. *Signal processing and performance analysis for imaging systems*. Artech House Publisher, New York, 2008. 304 p.

METHODS AND ALGORITHMS OF COMPLEXING IMAGES  
AND THERMAL SIGNALS

M. O. Lynnyk, A. Y. Nakonechnyy

Lviv Polytechnic National University,  
Department of Computerized Automation Systems

© Lynnyk M., Nakonechnyy A., 2023

This paper considers possible approaches to improving the quality of image signal formation both in the light and in the dark period of the day, as well as reducing the influence of noise, interference and artifacts on the characteristics of image signals. It is proposed to use the wavelet domain for the analysis of thermal and image signals with their subsequent possible complexation. The main features of the formation of such signals are indicated. It is shown that the proposed approach allows to improve the quality characteristics of image signals, especially in the dark period of time, as well as to ensure their effective processing related to filtering, compression, scaling and contrast change. A comparison of the obtained results of the proposed method with other existing similar signal processing approaches is given.

**Key words:** thermal signals; video signals; complexation of signals; wavelet transformation.