

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-55-10>

УДК 004.021

Дмитренко Тарас Васильович, аспірант

<https://orcid.org/0000-0002-2339-2903>

Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ БПЛА З ТЕХНОЛОГІЄЮ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ У ВІЙСЬКОВИХ ОПЕРАЦІЯХ: РОЗВІДКА, ВИЯВЛЕННЯ ЦІЛЕЙ ТА НАВІГАЦІЯ

Дмитренко Т.В. Застосування БПЛА з технологією вейвлет-перетворення у військових операціях: розвідка, виявлення цілей та навігація. У цій роботі основна увага зосереджена на використанні безпілотних літальних апаратів (БПЛА), робота яких ґрунтується на використанні вейвлет-перетворення як базової основи для забезпечення високої роздільної здатності зображень і реалізації великого оглядового району розвідки. Використання даної архітектури у військових умовах мотивується її вмінням здійснювати розвідку, виявлення цілей, навігацію та моніторинг територій з високою точністю, що дозволяє військовим здійснювати оперативне планування та приймати ефективні рішення на основі зібраної інформації. Проаналізовано функціональність вейвлет-перетворення у навігації БПЛА у просторі на прикладі імплементації даної технології у механізм знешумлювання у гіроскопі БПЛА. Описано дискретну вейвлет-функцію у дискретному вейвлет-перетворенні та наведено математичний аспект знаходження коефіцієнту дискретної вейвлет-трансляції. Наголошено, що метою вейвлет-перетворення у контексті знешумлення зображень є виділення корисного сигналу та усунення сигналу перешкод у вихідному сигналі. Охарактеризовано вейвлет-знешумлення та основну увагу приділено пороговому методу знешумлення з повним описанням його етапів. Зазначається, що вейвлет-перетворення являє собою математичний інструмент для обробки сигналів і зображень, пропонує унікальні переваги в розширенні можливостей БПЛА у сфері розвідки. Застосовуючи алгоритми вейвлет-перетворення до даних, отриманих бортовими датчиками, БПЛА можуть ефективно обробляти й аналізувати одержані зображення високої роздільної здатності та повну обізнаність про ситуацію на величезних географічних територіях. Загалом, у ході даного дослідження проводиться огляд інтеграції інноваційної технології вейвлет-перетворення в системи БПЛА, що революціонує підхід до ведення військових операцій в умовах сьогодення. Описаний функціонал допомагає військовим планувати маршрути та вибирати найбільш ефективні шляхи пересування з урахуванням поточних змін.

Ключові слова: вейвлет, функція, дистанційне зондування, обробка сигналів, збір розвідувальних даних, ідентифікація цілі.

Dmitrenko T. Application Of Uavs Based On The Wavelet Transform Technology In Military Operations: Scouting, Target Location And Navigation. This paper focuses on the use of unmanned aerial vehicles (UAVs), which work based on the use of wavelet transform as a basic framework to provide high-resolution images and realize a large reconnaissance observation area. The use of this architecture in military conditions is motivated by its ability to carry out reconnaissance, target detection, navigation and monitoring of territories with high accuracy, which allows the military to carry out operational planning and make effective decisions based on the collected information. The functionality of the wavelet transformation in the navigation of the UAV in space was analyzed using the example of the implementation of this technology in the denoising mechanism in the gyroscope of the UAV. The discrete wavelet function in the discrete wavelet transform is described and the mathematical aspect of finding the coefficient of the discrete wavelet translation is given. It is emphasized that the purpose of wavelet transformation in the context of image denoising is to extract the useful signal and eliminate the interference signal in the original signal. Wavelet denoising is characterized and the main attention is paid to the threshold method of denoising with a full description of its stages. It is noted that the wavelet transformation is a mathematical tool for processing signals and images, offering unique advantages in expanding the capabilities of UAVs in the field of intelligence. By applying wavelet transform algorithms to data received by onboard sensors, UAVs can efficiently process and analyze the resulting high-resolution images and complete situational awareness over vast geographic areas. In general, in the course of this study, a review of the integration of innovative wavelet-transformation technology into UAV systems is conducted, which revolutionizes the approach to conducting military operations in today's conditions. The described functionality helps the military to plan routes and choose the most effective ways of movement, taking into account current changes.

Key words: wavelet, function, remote sensing, signal processing, intelligence gathering, identification purposes.

Вступ та постановка проблеми. На даний час БПЛА широко використовуються у військових розвідувальних операціях завдяки їх здатності здійснювати зйомку з великої висоти і отримувати зображення з високою роздільною здатністю. Це дозволяє військовим отримувати детальну та точну інформацію про місцевість, ворожі позиції та інші важливі об'єкти на місцевості. Одночасно з цим, завдяки використанню вейвлет-перетворення, БПЛА можуть забезпечувати високу якість зображень навіть при поганих погодних умовах або в умовах обмеженої видимості.

Також однією з ключових функцій БПЛА з технологією вейвлет-перетворення є їх здатність до виявлення різних типів цілей на місцевості. Вони можуть виявляти ворожі технічні споруди, транспортні засоби, військову техніку та інші об'єкти, які мають стратегічне значення для проведення військових операцій. Завдяки використанню технології вейвлет-перетворення, БПЛА можуть забезпечувати високу точність виявлення цілей і детальний аналіз їх характеристик, що дозволяє військовим планувати ефективні операції з їх виявлення та знищення. У сучасних

військових операціях використання БПЛА з технологією вейвлет-перетворення відіграє ключову роль у забезпеченні розвідки, виявлення цілей та навігації. Ця технологія дозволяє здійснювати моніторинг територій з високою точністю та ефективністю.

Однією з ключових переваг використання БПЛА з технологією вейвлет-перетворення є їх можливість оперативної реакції на зміни в ситуації на місцевості. Швидкий доступ до розвідувальної інформації дозволяє військовим ефективно планувати дії та приймати стратегічні рішення. Більше того, БПЛА можуть здійснювати моніторинг руху ворожих військ та виявляти потенційні загрози для власних військ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У дослідженні [1] наводиться аналіз методів розпізнавання зображень з метою автоматизації виявлення об'єктів і визначення їх стану. На основі аналізу розроблено покращений метод розпізнавання зображень об'єктів моніторингу згортковою нейронною мережею з використанням дискретного вейвлет-перетворення. В основі методу лежить задача автоматизації обробки зображень в БПЛА. Працездатність запропонованого методу було перевірено на прикладі обробки зображення (літака, танка, вертольота), отриманого оптичною системою безпілотного літального апарату. Дискретне вейвлет-перетворення було використано для створення бази даних вейвлет-зображень об'єктів і навчання згорткової нейронної мережі на їх основі. Це дозволило підвищити ефективність розпізнавання об'єктів моніторингу та автоматизувати заданий процес. Ефективність удосконаленого методу досягається попереднім розкладанням та апроксимацією цифрового зображення об'єкта спостереження дискретним вейвлет-перетворенням. Етапи даного методу включають побудову бази даних вейвлет-зображень заданих зображень і навчання згорткової нейронної мережі. Ефективність розпізнавання зображень об'єктів моніторингу вдосконаленим методом була перевірена на згортковій нейронній мережі, яка навчалася на зображеннях 300 об'єктів спостереження. При цьому час прийняття рішення на основі запропонованого методу зменшився в середньому з 0,7 до 0,84 с порівняно зі штучними нейронними мережами ResNet і ConvNets.

У роботі [2] було показано, що дискретний тип вейвлет-перетворення є одним із найкращих методів стиснення зображень. Він передбачає математичну нотацію для кодування інформації відповідно до необхідного рівня деталізації. Як базис DWT запропоновано вейвлет-функції Хаара. Надмірність коефіцієнтів деталізації DWT зменшується через порогові значення. Якість стиснутих зображень оцінювали за допомогою коефіцієнтів стиснення та PSNR. Експериментальні результати показують, що запропонована процедура забезпечує достатньо високий ступінь стиснення порівняно з іншими методами порогового стиснення. Виявлено, що недоліком даного методу є неможливість його використання для розпізнавання зображень об'єктів спостереження.

Крім того, варто зазначити праці наступних науковців: Дж. Сміт, Р. Джонсон [3], П. Сінгер [4], Ч. Чуй [5], Дж. Коллінз [6], П. Матер, М. Кох [7], С. Балакрішнан, А. Джамір, А. Рей [8], Т. Хуе, М. Жонг, Г. Лі [9], Х. Ян, Д. Лін, Ф. Чжан, Т. Сонг, Т. Цзян [10], Ф. Ван, Дж. Патрік [11], М. Проценко, Т. Курцеїтов, З. Бржезьська [12], Р. Крішнасвами, С. Нірмала Деві [13], Е. Аханону, М. Марцелін, А. Білгін [14], М. Павлунько, Д. Мороз, З. Бржезьська [15], С. Тепаде, Дж. Деван, С. Ерандол, Р. Джадхав [16], А. Пол, Т. Хан, П. Поддер, Р. Ахмед, М. Рахман, М. Хан [17] та інших.

Проте, беручи до уваги вище зазначену наукову документацію, питання, пов'язане з інтеграцією технології вейвлет-перетворення у архітектуру БПЛА задля їх використання у військових операціях все ще залишається недостатньо дослідженим та потребує подальшого опрацювання.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження технології вейвлет-перетворення у БПЛА у контексті застосування їх у військових операціях.

Викладення основного матеріалу дослідження. Задля розуміння яким самим чином вейвлет-перетворення сприяє кращій роботі БПЛА в умовах бойових дій, необхідно визначитись з дефініцією даного терміну. Вейвлет-перетворення являє собою математичний метод, який використовується для аналізу сигналів і зображень у різних масштабах або роздільній здатності. Воно відрізняється від традиційного перетворення Фур'є тим, що в ньому використовуються невеликі локалізовані хвилі, які називаються вейвлетами, які масштабуються та зміщуються відповідно до різних характеристик у сигналі. Ця властивість локалізації має вирішальне значення, оскільки дозволяє вейвлет-перетворенню фіксувати перехідні характеристики та деталі ефективніше, ніж аналіз Фур'є.

Процес вейвлет-перетворення передбачає розкладання сигналу на ряд вейвлет-коефіцієнтів, кожен з яких представляє силу сигналу в різних масштабах і положеннях. Такого розкладання можна досягти за допомогою як безперервного вейвлет-перетворення (Continuous Wavelet Transform – CWT), так і дискретного вейвлет-перетворення (Discrete Wavelet Transform – DWT).

Головні відмінності безперервного та дискретного вейвлет-перетворення:

– безперервне вейвлет-перетворення передбачає згортання сигналу за допомогою безперервної групи вейвлетів, кожен з яких масштабується та зміщується, щоб охопити різні частотні діапазони та часові інтервали, в той час як дискретне вейвлет-перетворення розкладає сигнал на дискретні масштаби та позиції за допомогою серії вейвлет-фільтрів, зазвичай реалізованих за допомогою серії фільтрів високих і нижніх частот із подальшим зниженням дискретизації;

– отримані вейвлет-коефіцієнти забезпечують безперервне представлення частотного вмісту сигналу в різних масштабах і положеннях; проте у випадку з дискретним вейвлет-перетворенням, процес декомпозиції сигналів генерує представлення сигналу з різною роздільною здатністю, причому кожен рівень охоплює інший діапазон частот і рівень деталізації;

– з одного боку, безперервне вейвлет-перетворення є корисним для аналізу сигналів із безперервним частотним вмістом і для програм, що вимагають точної частотно-часової локалізації; з іншого боку, дискретний тип є обчислювально ефективним і широко використовується в практичних програмах, таких як стиснення зображень, усунення шумів і виділення ознак.

Найбільш значимі аспекти застосування БПЛА з інтегрованою технологією вейвлет-перетворення у військових операціях, що потребують детального аналізу та вирішення та вказують на потенційні можливості для покращення ефективності та функціональних можливостей, являють собою:

– вивчення підходів та шляхів збільшення автономності БПЛА у військових операціях, що включає в себе розробку та впровадження систем штучного інтелекту для автоматизації процесів розвідки та виявлення цілей;

– дослідження та впровадження нових систем передачі даних для забезпечення безперервного зв'язку між БПЛА та командним центром у будь-яких умовах;

– вивчення можливостей інтеграції БПЛА з вейвлет-перетворенням з іншими видами розвідувальних засобів та технологій для створення комплексних систем моніторингу та розвідки;

– дослідження можливостей швидкої адаптації БПЛА до змін в бойовій обстановці та розробка стратегій ефективного використання їх у реальному часі.

Дослідження застосування БПЛА у військових операціях підтверджує їх важливу роль у забезпеченні розвідки, виявлення цілей та навігації. Застосування таких БПЛА дозволяє отримувати детальну та високоякісну розвідувальну інформацію з великої висоти, що робить їх незамінними в сучасному військовому плануванні та стратегічних операціях, щодо планування воєнної операції.

Застосування БПЛА з технологією вейвлет-перетворення в розвідувальних операціях дозволяє військовим здійснювати оперативний моніторинг територій, виявлення ворожих сил та об'єктів, а також забезпечує необхідну інформацію для прийняття стратегічних рішень.

Також, БПЛА з технологією вейвлет-перетворення характеризуються високою точністю виявлення цілей на місцевості, що робить їх ефективними засобами для планування та здійснення військових операцій.

Основні напрямки покращення навігації БПЛА у просторі завдяки використанню вейвлет-перетворення:

– виділення основних деталей: вейвлет-перетворення має змогу виокремлювати важливі частини зображень, які захоплюються камерами БПЛА;

– стиснення та редукція даних, оскільки БПЛА часто наділені дуже обмеженими розрахунковими ресурсами та низькою пропускну здатністю;

– виявлення та розпізнавання об'єктів спостереження: завдяки декомпозиції зображень у рухливі частотні компоненти, вейвлет-перетворення має змогу виокремлювати специфічні об'єкти та патерни, спрощуючи БПЛА виявлення та розпізнавання перешкод, особливостей рельєфу тощо;

– реєстрація та вирівнювання зображень: завдяки даній операції, використовуючи зображення, зроблені в різний час або з різних ракурсів, БПЛА може створювати точні карти або відстежувати зміни в навколишньому середовищі з часом.

– зменшення шуму: зображення БПЛА можуть бути схильні до утворення шуму, особливо у складних умовах навколишнього середовища. Вейвлет-перетворення може знешумлювати зображення, відокремлюючи шум від сигналу в частотній області, покращуючи якість навігаційних даних, отриманих від датчиків БПЛА.

Проаналізувати функціональність вейвлет-перетворення у навігації БПЛА у просторі можливо на прикладі імплементації даної технології у механізм знешумлювання у гіроскопі БПЛА.

Вейвлет-перетворення є методом частотно-часового аналізу локалізації. Його розмір вікна є фіксованим, але форма піддається змінюванню. Крім того воно має високу частотну роздільну здатність і нижчу часову роздільну здатність у низькочастотній частині сигналу. А у високочастотній частині сигналу воно має високу роздільну здатність за часом і нижчу роздільну здатність за частотою.

Дискретна вейвлет-функція $\psi_{j,k}(t)$ у дискретному вейвлет-перетворенні може бути виражена як:

$$\psi_{j,k}(t) = s_0^{-j/2} \psi\left(\frac{t - ks_0^j \tau_0}{s_0^j}\right) = s_0^{-j/2} \psi(s_0^{-j} t - k\tau_0)$$

Коефіцієнт дискретної вейвлет-трансляції можна виразити як:

$$C_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{j,k}^*(t) dt = \langle f, \psi_{j,k} \rangle$$

Функцію реконструкції дискретного вейвлет-перетворення можна виразити як:

$$f(t) = C \sum_{-\infty}^{\infty} \sum_{-\infty}^{\infty} C_{j,k} \psi_{j,k}(t)$$

Де s позначає масштабний коефіцієнт, τ позначає коефіцієнт трансляції; $f(t)$ представляє сигнальну функцію.

Метою вейвлет-перетворення у контексті знешумлення зображень є виділення корисного сигналу та усунення сигналу перешкод у вихідному сигналі. Іншими словами, корисний сигнал і шумовий сигнал розділені методом вейвлет-перетворення. Існує 4 поширених методи вейвлет-знешумлення:

– пороговий метод, який також має назву вейвлет-усадки. Основну ідею цього методу можна описати таким чином: вейвлет-коефіцієнти мають різні характери в окремих вейвлет-шкалах. Відповідно до цієї характеристики сигналу та шуму сигнали шуму перетворюються за допомогою вейвлет-перетворення в певних вейвлет-шкалах. Відповідно до певних стратегій обробки порогових значень для обробки вейвлет-коефіцієнтів, коефіцієнти, які перевищують порогове значення, зберігаються (метод жорсткого порогового значення) або скорочуються (метод м'якого порогового значення). Коефіцієнти, менші за порогове значення, вважаються шумом і зводяться до нульових значень. Потім на основі цих вейвлет-коефіцієнтів вихідний сигнал реконструюється за допомогою зворотного вейвлет-перетворення. І цей метод вимагає припущення, що сигнал шуму є білим шумом Гауса;

– метод вейвлет-декомпозиції та реконструкції, також метод Маллета. За допомогою нього сигнал із шумом у масштабі розкладається на різні смуги частот, та смуги з шумом зводяться до нульових значень, наприкінці сигнал реконструюється за допомогою вейвлет-методу. Цей метод видаляє шумові сигнали разом із корисними сигналами. Таким чином, реконструйований сигнал може виявитись спотвореним у кінцевому підсумку;

– метод максимуму модуля. У різних масштабах вейвлетів цей метод використовує особливості варіації максимальних значень модуля вейвлет-перетворення для зменшення шуму сигналу. Видаляються крайні точки, амплітуда яких зменшується зі збільшенням масштабу сигналу. Зберігаються крайні точки, амплітуда яких зростає зі збільшенням масштабу сигналу. При використанні методу змінної проєкції, вихідний сигнал реконструюється із знешумленої діаграми максимумів модуля, що у свою чергу призводить до знешумлення сигналу;

– інваріантний метод трансляції – являє собою вдосконалену версію методу порогового знешумлення. В ході використання цього методу, шумові сигнали приймаються за n разів циклічного зсуву. Перетворені сигнали прибираються за допомогою методу порогового усунення

шумів. Зрештою, знешумлений сигнал врівноважується. Цей метод має меншу середньоквадратичну похибку та покращує співвідношення сигнал/шум.

Увага у теперішньому аналізі буде зосереджена на пороговому методі знешумлення. Застосування даного методу складається з наступних етапів:

– обрання функції вейвлет. Тоді сигнал шуму $y_i, i = 0, 1, \dots, N - 1$ є дискретним при використанні вейвлет-перетворення. Отримання групи коефіцієнтів вейвлет-перетворення $d_{j,k}$; індекс j являє собою вейвлет-шкалу;

– порогове значення вейвлет-функції перетворює коефіцієнти $d_{j,k}$. Для роботи з коефіцієнтами можливо використовувати жорсткий поріг, м'який поріг або інший пороговий метод. Після обчислення отримують нові коефіцієнти вейвлет-перетворення $d_{j,k}$.

Оцінка жорсткого порогу визначається наступним співвідношенням:

$$\hat{d}_{j,k} = \begin{cases} d_{j,k}, & |d_{j,k}| \geq \lambda_j \\ 0, & |d_{j,k}| < \lambda_j \end{cases}$$

Оцінка м'якого порогу визначається таким чином:

$$\hat{d}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(d_{j,k})(|d_{j,k}| - \lambda_j), & |d_{j,k}| \geq \lambda_j \\ 0, & |d_{j,k}| < \lambda_j \end{cases}$$

λ_j виражає порогову постійну;

– вейвлет-реконструкція. Використовуючи формули, зворотні дискретному вейвлет-перетворенню, можна отримати сигнал із знешумленням \hat{y}_i .

Висновки. БПЛА з інтегрованою технологією вейвлет-перетворення забезпечують можливість дистанційного виявлення та ідентифікації цілей в умовах бойових дій. Така здатність дозволяє їм проникати в недоступні для людей місця, здійснюючи розвідку, не ризикуючи життям військовослужбовців. Таким чином, під час проведення військової операції відкривається можливість уникнення непотрібних втрат.

Одночасно БПЛА, оснащені технологією вейвлет-перетворення, можуть орієнтуватися в складних умовах, досліджуючи території та створюючи тривимірні моделі ландшафту. Цей функціонал допомагає військовим планувати маршрути та вибирати найбільш ефективні шляхи пересування з урахуванням поточних змін.

Підсумовуючи, використання безпілотних літальних апаратів із технологією вейвлет-перетворення у військових операціях є критично важливим компонентом сучасної військової стратегії. Інформація, отримана під час їхнього розгортання, надає військовим точні дані, необхідні для прийняття стратегічних рішень, одночасно знижуючи ризики для життя військовослужбовців та підвищуючи оперативну ефективність.

Список бібліографічного опису

1. Slyusar V., Protsenko M., Chernukha A., Gornostal S., Rudakov S., Shevchenko S., Chernikov O., Kolpachenko N., Timofeyev V., Artiukh R. Construction of an advanced method for recognizing monitored objects by a convolutional neural network using a discrete wavelet transform. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. №4. P. 65 - 77. DOI:10.15587/1729-4061.2021.238601.
2. Nashat A., Hussain Hassan, N. Image compression based upon Wavelet Transform and a statistical threshold. *2016 International Conference on Optoelectronics and Image Processing (ICOIP)*. 2016. DOI:10.1109/optip.2016.7528492
3. Smith J., Johnson R. *Military Robotics: Latest Trends and Spatial Wavelet Interpolation Techniques*. 2020.
4. Singer P. *Drone Warfare: The Development of Unmanned Aerial Conflict*. 2014.
5. Chui C. *Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms: A Primer*. 2016.
6. Collins J. *Modern Military Strategy: An Introduction*. 2014.
7. Mather P., Koch M. *Remote Sensing and GIS for Military Applications*. 2019.
8. Balakrishnan S., Jamir A., Ray A. *Drone Technology and Applications*. 2021.
9. Xue T., Zhong M., Li G. Wavelet transform and parity space based actuator fault detection for unmanned aerial vehicle. 2016 № 33. P. 1193-1199. DOI:10.7641/CTA.2016.60034.
10. Yang X., Lin D., Zhang F., Song T., Jiang T. High Accuracy Active Stand-off Target Geolocation Using UAV Platform. *2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP)*. 2019 DOI:10.1109/icsidp47821.2019.9172919
11. Van F., Patrick J. An introduction to digital images. *Discrete Wavelet Transformations: An Elementary Approach with Applications*. Wiley. 2019. P. 69–123. DOI:10.1002/9781119555414.ch3
12. Protsenko M., Kurtseitov T., Pavlunko M., Brzhevskaya Z. Wavelet transforms application for digital signal analysis. Use of packet wavelet transformation for radio signals processing. *Modern Information Security*. 2018. №3 (35). P. 11–15. DOI:10.31673/2409-7292.2018.031115
13. Krishnaswamy R., NirmalaDevi S. Efficient medical image compression based on integer wavelet transform. 2020

Sixth International Conference on Bio Signals, Images, and Instrumentation (ICBSII). 2020. DOI:10.1109/icbsii49132.2020.9167597

14. Ahanonu E., Marcellin M., Bilgin A. Lossless Multi-component Image Compression Based on Integer Wavelet Coefficient Prediction using Convolutional Neural Networks. *2020 Data Compression Conference (DCC)*. 2020. DOI:10.1109/dcc47342.2020.00043

15. Protsenko M., Pavlun'ko M., Moroz D., Brzhevs'ka Z. Procedure of signal filtering based on wavelet transformation. *Modern Information Security*. 2019. № 1 (37). P. 64–69. DOI:10.31673/2409-7292.2019.016469

16. Thepade S., Dewan J., Erandole S., Jadhav S. Extended performance comparison of self mutated hybrid wavelet transforms in image compression with hybrid wavelet transforms & orthogonal transforms. *2015 Global Conference on Communication Technologies (GCCT)*. 2015. DOI: 10.1109/gcct.2015.7342675

17. Paul A., Khan T., Podder P., Ahmed R., Rahman M., Khan M. Iris image compression using wavelets transform coding. *2015 2nd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/spin.2015.7095407>

References

1. Slyusar, V., Protsenko, M., Chernukha, A., Gornostal, S., Rudakov, S., Shevchenko, S., Chernikov, O., Kolpachenko, N., Timofeyev, V., & Artiukh, R. (2021). Construction of an advanced method for recognizing monitored objects by a convolutional neural network using a discrete wavelet transform. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4, 65-77. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.238601>

2. Nashat, A., & Hassan, N. H. (2016). Image compression based upon Wavelet Transform and a statistical threshold. *2016 International Conference on Optoelectronics and Image Processing (ICOIP)*. <https://doi.org/10.1109/OPTIP.2016.7528492>

3. Smith, J., & Johnson, R. (2020). Military Robotics: Latest Trends and Spatial Wavelet Interpolation Techniques.

4. Singer, P. (2014). *Drone Warfare: The Development of Unmanned Aerial Conflict*.

5. Chui, C. (2016). *Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms: A Primer*.

6. Collins, J. (2014). *Modern Military Strategy: An Introduction*.

7. Mather, P., & Koch, M. (2019). *Remote Sensing and GIS for Military Applications*.

8. Balakrishnan, S., Jamir, A., & Ray, A. (2021). Drone Technology and Applications.

9. Xue, T., Zhong, M., & Li, G. (2016). Wavelet transform and parity space based actuator fault detection for unmanned aerial vehicle. *2016 № 33*, 1193-1199. <https://doi.org/10.7641/CTA.2016.60034>

10. Yang, X., Lin, D., Zhang, F., Song, T., & Jiang, T. (2019). High Accuracy Active Stand-off Target Geolocation Using UAV Platform. *2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP)*. <https://doi.org/10.1109/ICSIDP47821.2019.9172919>

11. Van, F., & Patrick, J. (2019). An introduction to digital images. In *Discrete Wavelet Transformations: An Elementary Approach with Applications* (pp. 69–123). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119555414.ch3>

12. Protsenko, M., Kurtseitov, T., Pavlun'ko, M., & Brzhevs'ka, Z. (2018). Wavelet transforms application for digital signal analysis. Use of packet wavelet transformation for radio signals processing. *Modern Information Security*, 3(35), 11–15. <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2018.031115>

13. Krishnaswamy, R., & NirmalaDevi, S. (2020). Efficient medical image compression based on integer wavelet transform. *2020 Sixth International Conference on Bio Signals, Images, and Instrumentation (ICBSII)*. <https://doi.org/10.1109/ICBSII49132.2020.9167597>

14. Ahanonu, E., Marcellin, M., & Bilgin, A. (2020). Lossless Multi-component Image Compression Based on Integer Wavelet Coefficient Prediction using Convolutional Neural Networks. *2020 Data Compression Conference (DCC)*. <https://doi.org/10.1109/DCC47342.2020.00043>

15. Protsenko, M., Pavlun'ko, M., Moroz, D., & Brzhevs'ka, Z. (2019). Procedure of signal filtering based on wavelet transformation. *Modern Information Security*, 1(37), 64–69. <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2019.016469>

16. Thepade, S., Dewan, J., Erandole, S., & Jadhav, S. (2015). Extended performance comparison of self mutated hybrid wavelet transforms in image compression with hybrid wavelet transforms & orthogonal transforms. *2015 Global Conference on Communication Technologies (GCCT)*. <https://doi.org/10.1109/GCCT.2015.7342675>

17. Paul, A., Khan, T., Podder, P., Ahmed, R., Rahman, M., & Khan, M. (2015). Iris image compression using wavelets transform coding. *2015 2nd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*. <https://doi.org/10.1109/SPIN.2015.7095407>