

ВИКОРИСТАННЯ АДАПТИВНОГО ВИБОРУ РАДІУСУ КІЛЕЦЬ КОЕФІЦІЄНТІВ ЗОБРАЖЕННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ЦВЗ ДО АТАК

Вінницький Національний Технічний Університет

Анотація. В даній роботі розглянуто аналіз вдосконаленого стеганографічного методу вбудовування цифрових водяних знаків (ЦВЗ) у зображення, що поєднує дискретне перетворення Фур'є (DFT) та вейвлет-перетворення подвійного дерева (DTCWT) з адаптивним вибором радіусу кілець коефіцієнтів.

Ключові слова: захист авторського права, стеганографія, цифровий водяний знак.

Вступ

Технологія вбудовування цифрових водяних знаків (ЦВЗ) є важливим інструментом захисту авторських прав у цифровому середовищі, зокрема растрових зображень. Ефективність ЦВЗ для цифрових зображень визначається їх стійкістю до атак (масштабування, обертання, JPEG-стиснення) та непомітністю для людського ока [1]. Для забезпечення більшої стійкості існуючі методи вбудовування ЦВЗ використовують частотні перетворення [2]. У більшості методів ці перетворення використовуються окремо і їх ефективність знижується при складних атаках [3]. Запропонований у роботі [3] метод з використанням комбінування DFT і DTCWT дозволяє об'єднати їх переваги, але ключовим залишається вибір зон вбудовування, оскільки використання фіксованих радіусів кілець у спектрі обмежує стійкість до певних атак [4]. Тому в роботі було запропоновано адаптивний вибір кілець на основі спектральних характеристик зображення, що забезпечує вищий рівень стійкості ЦВЗ до активних атак.

Дослідження

Запропонований метод стеганографічного вбудовування цифрового водяного знака ґрунтується на комбінованому використанні дискретного перетворення Фур'є (DFT) та вейвлет-перетворення подвійного дерева (DTCWT), доповненому адаптивним вибором радіусів кільцевих зон у спектральному домені [4]. Такий підхід дозволяє покращити локалізацію областей вбудовування та забезпечити підвищену стійкість до геометричних та частотних атак, зберігаючи візуальну якість зображення.

На першому етапі зображення конвертується в колірну модель YUV. Цифровий водяний знак вбудовується в Y-канал, який трансформується в частотну область за допомогою DFT. Отриманий спектр $F(u, v)$ ділиться на кільцеві зони навколо центру за радіусом. Формально, двовимірне дискретне перетворення Фур'є визначається як:

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \cdot e^{-j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})}$$

де $f(x, y)$ — вхідне зображення розміром $M \times N$, а $F(u, v)$ — комплексний спектр.

Замість фіксованого поділу на кільця, як у роботі [2], запропоновано динамічно обчислювати радіуси кожного кільця на основі рівномірного розподілу коефіцієнтів та аналізу енергетичної щільності спектра. Центр спектра (низькочастотна область) зберігається недоторканим для зменшення візуальних спотворень. Радіус кожного кільця r_i визначається з умови:

$$r_i = \sqrt{\frac{i \cdot (r_{max}^2)}{n}}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

де n — кількість кілець, r_{max} максимальний радіус, який залежить від розміру спектра. Кожен коефіцієнт $F(u, v)$ класифікується у кільце R_i , якщо його відстань d до центру задовольняє:

$$r_{\{i-1\}} < d(u, v) \leq r_i, \quad d(u, v) = \sqrt{\left\{ \left(u - \frac{M}{2}\right)^2 + \left(v - \frac{N}{2}\right)^2 \right\}}$$

У кожне кільце вбудовується частина знака у вигляді спектрального шаблону, сформованого за псевдовипадковими послідовностями. Вибір шаблону визначається бітовим кодом повідомлення. Змінений спектр формується як:

$$R'_i = R_i + \alpha_i \cdot P_i$$

де α_i — коефіцієнт ваги, обчислений для кожного кільця на основі його енергії:

$$\alpha_i = \frac{k}{|P_i|} \cdot |R_i|, \quad 0 < k < 1$$

Це дозволяє зберігати фіксовану відносну енергію знака, забезпечуючи баланс між стійкістю і непомітністю. Інверсне DFT відновлює модифікований Y-канал.

Для підвищення стійкості до десинхронізуючих атак (обертання, зміщення), в U-канал додатково вбудовується коригувальна інформація, що дозволяє на етапі витягування ЦВЗ компенсувати зміщення. Це реалізується через DTCWT з трирівневим розкладанням. У кожному підканалі високих частот, що відповідають 6 орієнтаціям, виконується вбудовування синтезованого шаблону:

$$S'_i = S_i + \beta \cdot Q_i$$

де S_i — піддіапазон, Q_i — патерн, β — коефіцієнт, що контролює силу вбудовування. Зворотне DTCWT дозволяє сформувати модифікований U-канал.

На стороні приймача, знаючи ключі генерації послідовностей, здійснюється обернене DFT/DTCWT, класифікація кільця, та кореляційний аналіз для детекції наявності знака.

Висновок

Проведений аналіз запропонованого методу показав, що адаптивний підхід до вибору радіуса кілець у спектрі дискретного перетворення Фур'є дозволяє більш точно локалізувати області для вбудовування цифрового водяного знака з урахуванням енергетичних характеристик зображення. Це забезпечує кращу рівновагу між непомітністю та стійкістю до спотворень, порівняно з існуючими методами із фіксованими параметрами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Підвищення стійкості цифрових водяних знаків у потокових відеозаписах на основі диференціального вбудовування енергії (DEW) [Текст] / Ю. Є. Яремчук, В. В. Карпінець, І. С. Зоря, Д. О. Козак // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2023. — № 1. — С. 55–64.
2. Chuanda Cai, Changgen Peng, Jin Niu, Weijie Tan, Hanlin Tang . Low distortion reversible database watermarking based on hybrid intelligent algorithm. Mathematical Biosciences and Engineering, 2023, 20(12): 21315-21336. URL: [10.3934/mbe.2023943](https://doi.org/10.3934/mbe.2023943)
3. Ying Q., Lin J., Qian Z. et al. Robust digital watermarking for color images in combined DFT and DT-CWT domains. Mathematical Biosciences and Engineering, 16(5): 4788–4801.
4. Звірик Д. С., Карпінець В. В. Вплив радіуса кілець коефіцієнтів у вейвлет-перетворенні DTCWT. Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи : Всеукр. науково-практ. інтернет-конф., м. Вінниця. Вінниця, 2024. С. 1–3.
URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/view/22961/18937>.

Яремчук Юрій Євгенович — д.т.н., проф., професор кафедри МБІС, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: yurevyar@vntu.edu.ua

Карпінець Василь Васильович — к.т.н., доц., завідувач кафедри МБІС, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: karpinets@gmail.com

Пуздрановський Ілля Володимирович – магістр кафедри МБІС, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: ilia.puzdranovskuy@gmail.com

Звірик Денис Станіславович – магістр кафедри МБІС, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: zds2303@gmail.com

USING ADAPTIVE COEFFICIENT OF THE IMAGE RINGS RADIUS SELECTION TO ENHANCE THE ROBUSTNESS OF DIGITAL WATERMARK TO ATTACKS

Annotation. *This study investigates an enhanced steganographic method for digital watermark embedding into images, combining Discrete Fourier Transform (DFT) and Dual-Tree Complex Wavelet Transform (DTCWT) with adaptive coefficient ring radius selection.*

Keywords: copyright protection, steganographic, digital watermarking

Yurii Yevhenovych Yaremchuk – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Management and Security of Information Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: yurevyar@vntu.edu.ua

Vasyl Vasylovych Karpinets – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Management and Security of Information Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: karpinets@gmail.com

Illia Volodymyrovych Puzdranovskiy – Master's Degree of the Department of Management and Security of Information Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: ilia.puzdranovskuy@gmail.com

Denys Stanislavovych Zviryk – Master's Degree of the Department of Management and Security of Information Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: zds2303@gmail.com