

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ НЕПОМІТНОСТІ ТА СТІЙКОСТІ СТЕГАНОВІДОМЛЕНЬ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ФРАКТАЛЬНИХ РОЗМІРНОСТЕЙ

У статті розглянуто сучасні підходи до підвищення непомітності та стійкості стеганографічних методів через аналіз фрактальних властивостей цифрових зображень. Запропоновано підхід, який базується на визначенні областей із високою фрактальною розмірністю для вбудовування прихованої інформації. Такий підхід дозволяє вибирати ділянки зображення, де приховані дані менш помітні для стеганоаналізу, зокрема, для атак типу стиск, додавання шуму та розмиття, що є типовими загрозами для стеганографічних систем у реальних умовах експлуатації. Методика передбачає застосування клітинного методу обчислення фрактальних розмірностей (box-counting), який дозволяє кількісно оцінити складність локальних текстур зображення. Це дає змогу виділити області з високим рівнем структурної неоднорідності, що є оптимальними для приховування інформації, оскільки такі зони менш схильні до візуального виявлення або математичного аналізу. Крім того, використання високочастотних фільтрів (зокрема, Собела та Лапласа) дозволяє додатково визначати ділянки з високою деталізацією, які стійкіші до атак на основі стискання (наприклад, JPEG) або згладжування. Порівняльний аналіз ефективності стеганографічних алгоритмів засвідчив, що використання фрактальної розмірності як критерію вибору областей для приховування інформації дозволяє підвищити непомітність на 10–15% за метриками PSNR і SSIM при збереженні прийнятної стійкості до втратних перетворень. Дослідження продемонстрували, що комбінований підхід, який поєднує фрактальний аналіз і частотну обробку, мінімізує ризик викриття прихованої інформації навіть після стандартної обробки зображення. Це робить запропонований підхід перспективним для використання у високозахисних інформаційних системах, де важливі як приховання факту передавання інформації, так і її цілісність після можливих атак.

Ключові слова: стеганографія, фрактальна розмірність, непомітність, стійкість, стегоповідомлення, цифрові зображення, box-counting, високочастотні фільтри.

Вступ і формулювання проблеми.

Стеганографія є одним із ключових методів приховування інформації, що широко використовується у задачах безпечного передавання даних. Традиційні алгоритми стеганографії часто не враховують особливостей структури носія, що робить їх уразливими до виявлення. Відповідно до цієї вимоги, приховане повідомлення має бути доставлене адресату без суттєвих спотворень з можливістю подальшого використання. Стійкість стегоалгоритмів нерозривно пов'язана з імовірністю виявлення прихованого повідомлення. Цей зв'язок характеризується обернено пропорційною залежністю – чим менша імовірність виявлення прихованого повідомлення, тим вищою є стійкість прихованих повідомлень до методів статистичного аналізу. Таким чином, однією з основних проблем є забезпечення стійкості до методів статистичного аналізу.

Питання пошуку місць для приховування інформації є одним з фундаментальних питань стеганографії. У цій роботі за стегоконтейнер використовуються цифрові зображення. В просторовій області традиційними місцями для приховування даних, здебільшого, використовують високочастотні ділянки зображення [1]. Такий загальновідомий підхід до пошуку місць вбудовування робить стегоалгоритм вразливим до атак. Це призводить до необхідності пошуку нових технологій визначення місць вбудовування інформації. У роботі розроблено метод підвищення стійкості стеганографічних алгоритмів шляхом використання фрактальних розмірностей зображень. Розроблений підхід дозволяє враховувати локальні фрактальні характеристики носія інформації, що сприяє зменшенню ризику виявлення стеганографічного вбудовування за допомогою сучасних методів аналізу. Фрактальний аналіз надає можливість оцінювати складність і текстурні властивості зображень. Використання фрактальних характеристик для стеганографічних цілей дозволяє адаптувати приховування інформації до локальних властивостей носія, що підвищує його стійкість.

Аналіз відомих методів обчислення фрактальних розмірностей.

Серед найбільш вживаних методів обчислення фрактальних розмірностей слід виділити наступні.

Метод комірок. Згідно цього методу, зображення об'єкту покривають комірками з різним розміром ε . Залежно від розміру комірки ε , для покриття об'єкту необхідна відповідна кількість комірок $N(\varepsilon)$. Фрактальну розмірність обчислюють за виразом

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log(1/\varepsilon)}. \quad (1)$$

Фрактальна розмірність представляє собою тангенс кута нахилу прямої, яка апроксимує залежність $N(\varepsilon)$ в логарифмічному масштабі [2].

Метод комірок застосовують для аналізу локальних областей зображення – текстур, меж об'єктів тощо. Працює цей метод з бінарними зображеннями, тому процес трансформації напівтонового зображення в бінарне суттєво впливає на результат обчислення фрактальної розмірності.

Метод обчислення фрактальної розмірності за контуром. Цей метод обчислення фрактальної розмірності в дечому схожий на метод комірок. Для деякого фрактального об'єкта обчислюються периметр контуру P та площа S , а фрактальна розмірність обчислюється за виразом

$$D = 2 \frac{\log P}{\log S}. \quad (2)$$

Метод обчислення фрактальної розмірності за контуром застосовують здебільшого для випадку аналізу складності форми об'єктів.

Спектральний метод обчислення фрактальної розмірності базується на аналізі зображення в частотній області. Для отримання спектра енергії виконується перетворення Фур'є, а фрактальна розмірність обчислюється на основі нахилу спектра в логарифмічному масштабі. Цей метод застосовується переважно для аналізу та розпізнавання текстур зображень.

Отже, обчислення фрактальної розмірності зображень є важливим методом аналізу текстури та складності форми візуальних даних. Існують різні підходи для визначення фрактальної розмірності, кожен з яких має свої особливості та сфери застосування. Вибір методу залежить від типу зображення та поставленого завдання.

Метою проведених у роботі досліджень є розробка та аналіз методів підвищення непомітності та стійкості стеганографічних методів шляхом оптимізації вибору областей для вбудовування інформації на основі фрактальних розмірностей і високочастотних фільтрів. Для досягнення цієї мети необхідно дослідити сучасні підходи до оцінки фрактальної розмірності цифрових зображень для підвищення непомітності та стійкості стегоповідомлень; розробити алгоритм вибору областей для вбудовування стегоповідомлень з урахуванням фрактальної розмірності та високочастотних компонент для забезпечення балансу між непомітністю та стійкістю; провести експериментальний кількісний аналіз стеганографічних алгоритмів для кількісної оцінки непомітності та стійкості; оцінити стійкість і непомітність запропонованого підходу до типових атак, таких як JPEG-стиснення, додавання шуму та розмиття.

Фрактальна розмірність як основа адаптивного стеганографічного алгоритму.

Представлені вище методи показують, що фрактальна розмірність характеризує ступінь заповнення простору зображення на різних масштабних рівнях. Зважаючи на це, її можна використовувати для визначення рівня складності та текстурної варіативності ділянок зображення.

У рамках запропонованого методу фрактальну розмірність доцільно використовувати для вибору областей приховування інформації. Локальні області з високим рівнем фрактальної розмірності є менш помітними для злоумисника і вони є пріоритетними при вбудовуванні. Окрім цього, рівень фрактальної розмірності може служити регулятором інтенсивності

приховування, тобто ступінь модифікації пікселів адаптується відповідно до фрактальної розмірності з метою мінімізації візуальних та статистичних артефактів.

Є два способи обчислення фрактальної розмірності D – глобальний та локальний. Глобальна фрактальна розмірність обчислюється для цілого зображення та відображає його інтегральну фрактальну оцінку. При реалізації методів обробки, аналізу чи розпізнавання зображень глобальна фрактальна розмірність, здебільшого, є неінформативною, оскільки не містить характеристик локальних областей. У запропонованому методі одним із ключових кроків є пошук локальних областей для найкращого приховування інформації. Для їх виявлення обчислюватимуться локальні фрактальні розмірності. Структурна схема адаптивного стеганографічного алгоритму представлена на рисунку 1.

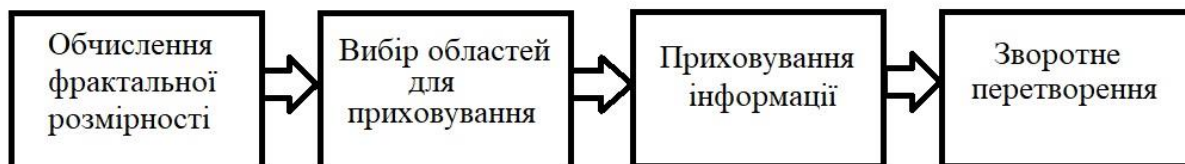


Рис. 1. Структурна схема адаптивного стеганографічного алгоритму.

Отже, перший крок алгоритму полягає в обчисленні локальних фрактальних розмірностей $D(i, j)$ вхідного зображення L . Розмір локальної апертури та спосіб її переміщенні по полю зображення суттєво впливають на значення локальних фрактальних розмірностей. Відомо, що розмір локальної апертури має бути співмірним з розміром досліджуваних об'єктів на зображенні [3]. Переміщення локальної апертури по полю зображення відбуватиметься ковзним способом.

На основі значень фрактальних розмірностей $D(i, j)$, які обчислені по всьому полю зображення L , проводиться вибір областей для приховування інформації. Для цього застосовують, здебільшого, порогові методи. Чим вище порогове значення T , тим менше пікселів буде використано для приховування і навпаки. Отже, порогове значення T має значний вплив на вибір пікселів для вбудовування, зокрема, їх кількість. Проте вибір порогового значення T проводиться емпіричним способом, оскільки не існує однозначної кореляції між величиною порогу T та кількістю вибраних пікселів. На цю залежність суттєво впливає семантичне наповнення зображення. Тому для стеганографічного приховування рекомендують обирати зображення, які містять велику кількість дрібних деталей, що еквівалентно більшій кількості високочастотних складових у його спектрі.

Наступним кроком згідно структурної схеми (рис. 1) є приховування інформації. У запропонованому методі досліджувалися методи приховування у просторовій області:

- Метод приховування у найменш значущий біт [4]. Области вбудовування визначаються через використання високочастотних фільтрів або фрактальних розмірностей. Цей метод простий в реалізації, проте має низьку стійкість до стегоаналізу та стиску даних.

- Метод приховування у найменш значущий біт з випадковим розподілом пікселів для вбудовування [4]. Біти повідомлення вставляються у випадкові позиції найменш значущих бітів, що ускладнює стегоаналіз. Визначення індексів пікселів для вбудовування здійснюється на основі генератора випадкової послідовності. Недоліком методу є те, що він не враховує семантичне наповнення зображення, що робить імовірним вбудовування в ділянки з однаковим рівнем інтенсивностей. Такий підхід є вразливим для візуальних атак.

- Метод допусків [4] схожий на попередні два методи, але у ньому встановлюється діапазон зміни інтенсивностей пікселів у певному діапазоні. Цей метод доцільно застосовувати при використанні зображень-стегоконтейнерів з глибиною кольору більшою за 8, або коли семантичне наповнення дозволяє використовувати вищі рівні мультиплексування.

- Метод палітри кольорів [5]. Цей метод використовує незначні зміни в палітрі кольорів зображення для приховування інформації, що особливо ефективно для зображень із обмеженою кількістю кольорів. Метод має низьку стійкість до перекодування та оптимізації палітри.

- Піксельні кластерні методи [6]. Згідно цього методу повідомлення кодується у вигляді спеціальних шаблонів або груп пікселів, які змінюються за заздалегідь відомим правилом. Ці методи мають більшу, у порівнянні з розглянутими вище методами, стійкість до виявлення. Недоліком є підвищена складність реалізації та низька пропускна складність.

Для видобування прихованої інформації проводиться зворотне перетворення. При цьому приймальна сторона має володіти інформацією про сам метод вбудовування та про ключову інформацію, а саме координати пікселів, в які це вбудовування здійснювалося. Ключова інформація, подібно як і в криптографії, не повинна потрапити до злоумисника, оскільки в такому випадку може бути скомпрометована вся прихована інформація.

Обчислення фрактальних розмірностей кольорових зображень в адаптивному методі стеганографічного приховування.

У цій роботі за стегоконтейнер обрано зображення. Пояснюється це тим, що сучасні зображення мають доволі високу роздільну здатність та, як наслідок, надлишковість, що дає можливість приховувати значні об'єми інформації. З цих же міркувань за стегоконтейнер, здебільшого, приймаються кольорові зображення, а не напівтонові. Не існує усталеного алгоритму обчислення фрактальних розмірностей кольорових зображень, тому обчислюють її по різному. Обчислення фрактальних розмірностей для кольорових зображень допомагає аналізувати їхню складність, текстуру та виявляти приховані закономірності. Оскільки кольорове зображення зазвичай складається з трьох колірних каналів (R, G, B), підхід до обчислення фрактальної розмірності дещо відрізняється від напівтонових зображень.

Це може бути обчислення фрактальної розмірності для кожного колірних каналу окремо D_R, D_G, D_B , а фрактальна розмірність кольорового зображення f_{RGB} обчислюється як усереднене значення фрактальних розмірностей по кожному колірному каналу

$$D_{RGB} = \frac{D_R + D_G + D_B}{3}. \quad (3)$$

Метод обчислення фрактальної розмірності кольорового зображення на основі векторної довжини кольору [7] полягає в тому, що кольорове зображення перетворюють в напівтонове $L(i, j) = \sqrt{R^2 + G^2 + B^2}$ і вже на основі нього проводять обчислення.

Розглянуті вище та подібні до них методи обчислюють фрактальні розмірності або для кожного колірних шару окремо, або перетворюють вхідне зображення у напівтонове і лише тоді обчислюють фрактальні розмірності, тобто з кольоровим зображенням працюють опосередковано, а отже, не враховують його особливості.

Для кольорових зображень об'єктивний аналіз фрактальних властивостей потребує пристосування методів до багатовимірних даних. Це розширює можливості аналізу складних кольорових зображень.

У цій роботі запропоновано метод обчислення фрактальних розмірностей D_{RGB} безпосередньо кольорового зображення L . На зображенні для деякого пікселя $L(i, j)$ формується ковзна апертура певного розміру $m \times n$ елементів (рис. 2). Розмір апертури має бути співвимірним з лінійними розмірами об'єктів інтересу на зображенні.

Далі для кожної локальної апертури формують гістограму [8] в тривимірному просторі RGB (рис. 3). У цій гістограмі кожен піксель апертури займає місце в колірному просторі, яке визначається значенням інтенсивності за відповідною колірною складовою (рис. 4).

Гістограма в тривимірному просторі RGB представляє собою куб, який можна розбити на множину підкубів. Кількість підкубів буде залежати від розміру їх ребра (рис. 5).

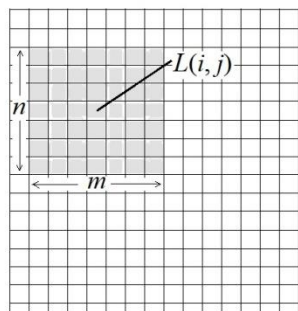


Рис. 2. Ковзна апертура з центром в пікселі з координатами (i, j) та розміром $m \times n$ елементів.

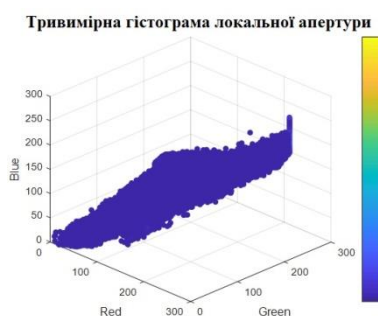


Рис. 3. Гістограма локальної апертури в тривимірному просторі RGB .

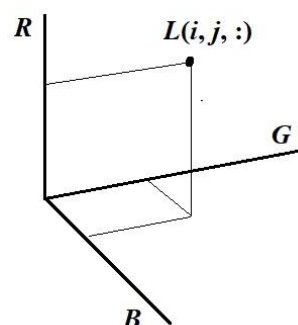
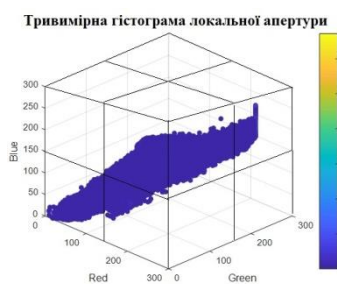
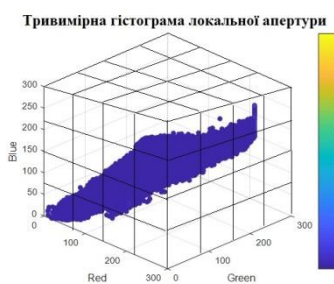


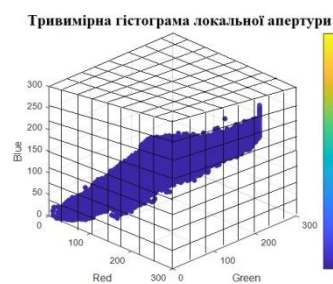
Рис. 4. Розміщення пікселя апертури в колірному просторі.



а)



б)



в)

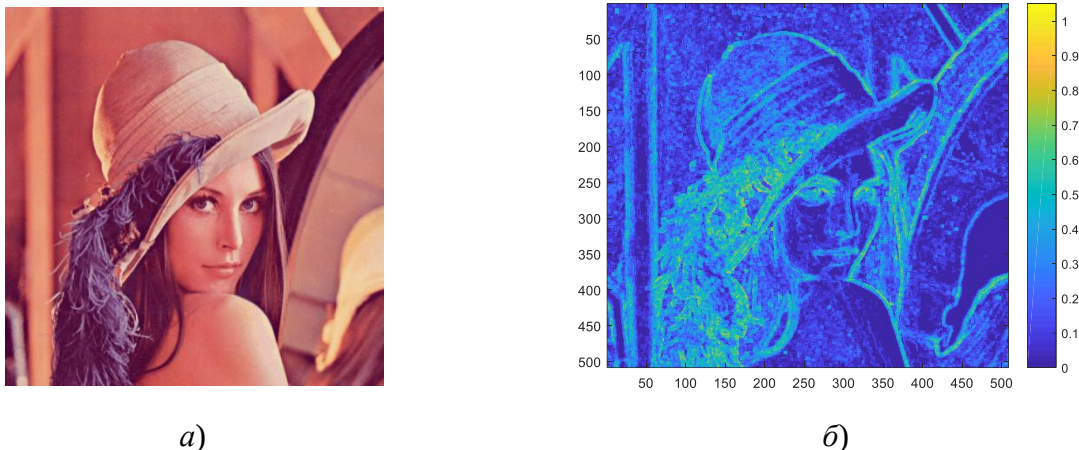
Рис. 5. Гістограми локальної апертури в тривимірному просторі RGB , покриті підкубами з різним розміром ребра ε .

Чим менший розмір ребра підкуба ε , тим більша їх кількість N потрібна для того, щоб закрити просторову гістограму в RGB -кубі. RGB -куб покривається підкубами з різним розміром ребра ε . Підраховується кількість підкубів N , яка потрібна для покриття гістограми. Фрактальна розмірність локальної апертури $D_{RGB}(i, j)$ кольорового зображення обчислюється за виразом

$$D_{RGB}(i, j) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)}. \quad (4)$$

Алгоритм дозволяє отримати просторово локалізовані значення фрактальної розмірності $D_{RGB}(i, j)$, що особливо корисно для аналізу текстур у кольорових зображеннях. В результаті

проведених за виразом (4) обчислень формується поле фрактальних розмірностей D_{RGB} , розмір якого співпадає з розміром вхідного зображення.



а) б)
Рис. 6. Вхідне зображення (а) та відповідне йому поле фрактальних розмірностей D_{RGB} (б).

Значення елементів поля фрактальних розмірностей для зручності можна пронормувати в межах від 0 до 1. Після цього застосовують пороговий метод для визначення місць приховування інформації

$$DT(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{if } D_{RGB}(i, j) > T; \\ 0, & \text{if } D_{RGB}(i, j) < T. \end{cases} \quad (5)$$

Порогове значення T визначається емпірично, виходячи з міркувань необхідної кількості місць для приховування чи розміру приховуваного повідомлення. В результаті застосування виразу (5) отримано бінарне зображення (рис. 7), на якому пікселі чорного кольору визначають місця можливого приховування інформації. Видобування інформації відбувається в зворотному порядку.

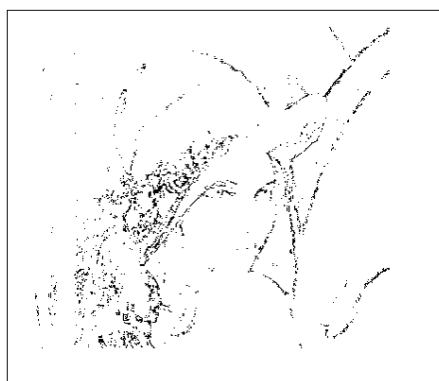


Рис. 7. Зображення, яке отримане після порогового опрацювання поля фрактальних розмірностей D_{RGB} .

Аналіз результатів комп'ютерного моделювання запропонованого методу.

Порівнюємо ефективність стегоалгоритмів, у яких місця для приховування інформації у кольорові зображення вибиралися традиційним підходом з використанням високочастотних фільтрів і за запропонованим у роботі способом з використанням фрактальної розмірності. Довжина приховуваного повідомлення складає 1024 біти. Приховування відбувається відомим методом у найменш значущий біт. Оцінювання ефективності проводимо за допомогою кількох

оцінок - PSNR, SSIM, фрактальна розмірність, стійкість до атак (JPEG-стиснення). Результати експериментів представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Оцінювання ефективності при застосуванні різних способів вибору місць для приховування

Метод вибору місць	PSNR (дБ)	SSIM	Фрактальна розмірність (Δ)	Стійкість до JPEG (Q=50)
Фрактальна розмірність	42.5	0.98	0.012	Низька
ВЧ-фільтр (Лапласіан)	40.2	0.95	0.007	Висока
ВЧ-фільтр (Собель)	39.8	0.93	0.009	Висока
Комбінований метод (гібрид)	44.3	0.99	0.006	Середня

На основі отриманих результатів можемо зробити такі висновки щодо ефективності стегоалгоритмів. Алгоритм, що вбудовує дані у фрактально складні області, **менше спотворює зображення**, але чутливий до стиснення, оскільки фрактальні області часто є низькочастотними. Приховування інформації у високочастотних областях зображення спричиняє більші **локальні спотворення**, але такі області краще витримують стиснення JPEG. Застосування комбінованого підходу, який базується на виборі фрактально складних областей із високочастотними компонентами, дає **оптимальний баланс** між непомітністю та стійкістю. Таким чином, запропонований стеганоалгоритм з використанням фрактальних розмірностей для визначення місць приховування інформації є найбільш прийнятним для випадків, де важлива непомітність. Застосування стегоалгоритму з використанням високочастотних фільтрів забезпечує кращу стійкість для випадку втратних перетворень, наприклад, стиснення JPEG. Комбінований стегоалгоритм, у якого пошук місць для вбудовування здійснюється із застосуванням фрактальних розмірностей та високочастотних фільтрів, є універсальним рішенням, оскільки забезпечує і високу якість і помірну стійкість.

Таблиця 2

Кількісне оцінювання стійкості стегоалгоритму.

Метод вибору місць	BER (JPEG)	BER (шум)	BER (розмиття)	NCC (JPEG)	NCC (шум)	NCC (розмиття)
Фрактальна розмірність	0.35	0.42	0.47	0.82	0.74	0.68
ВЧ-фільтр (Лапласіан)	0.12	0.18	0.23	0.91	0.85	0.78
ВЧ-фільтр (Собель)	0.14	0.21	0.25	0.89	0.83	0.76
Комбінований метод (фрактали+ВЧ)	0.18	0.24	0.29	0.88	0.81	0.74

Важливою характеристикою стегоалгоритму є його стійкість, тобто здатність зберігати приховане повідомлення після атак або обробки зображення, таких як стиснення, додавання шуму чи розмиття. У роботі проведено кількісне оцінювання стійкості до зазначених атак. Вхідні дані залишились тими ж, як і у попередньому експерименті. Досліджувалися атаки з наступними характеристиками - **JPEG-стиснення (Q=50)**, **додавання гаусівського шуму** ($\sigma = 10$), **розмиття Гауса** (локальна апертура 3x3). **Оцінка стеганостійкості проводилася за двома характеристиками – часткою бітів, які змінилися після атаки (BER, Bit Error Rate), оцінкою схожості між оригінальним і відновленим повідомленням на основі**

нормованої кросс-кореляції (**Normalized Cross-Correlation, NCC**). Результати експерименту представлені в таблиці 2.

В таблиці 2 наведено результати кількісного оцінювання стеганостійкості до основних типів атак. У випадку JPEG-стиснення стегоалгоритм з використанням високочастотних фільтрів краще витримує стиснення, оскільки інформація приховується в деталях, які зазнають меншого стиску. Алгоритм з пошуком областей для вбудовування на основі фрактальних розмірностей менш стійкий, оскільки області з високим значенням фрактальної розмірності, зазвичай, розташовані у низькочастотних ділянках та мають більші втрати при стисканні. При додаванні шуму на заповнений стегоконтейнер, застосування високочастотних фільтрів для пошуку місць для вбудовування, забезпечує кращу стійкість, ніж застосування фрактальних розмірностей. Пояснюється це тим, що шум більше впливає на гладкі області зображення, а не на високочастотні деталі. Поєднання методів обчислення фрактальної розмірності та високочастотних фільтрів забезпечує збалансовану стійкість до шуму.

При застосуванні методів розмиття більш стійкими до спотворень є такі заповнені стегоконтейнери, місця для вбудовування в яких визначалися комбінованим методом, тобто поєднанням фрактальних розмірностей та високочастотних фільтрів. Застосування виключно фрактальних розмірностей при визначенні місць для вбудовування забезпечує меншу стійкість, оскільки розмиття згладжує фрактальну структуру.

Висновки

Таким чином, якщо стеганоалгоритм має забезпечити непомітність при приховуванні інформації, тоді пошук місць для вбудовування доцільно проводити з використанням фрактальних розмірностей. Для забезпечення стійкості стегоалгоритмів до атак місця для приховування доцільно вибирати через застосування високочастотних фільтрів. Збалансоване поєднання непомітності та стійкості до атак досягається через поєднання обидвох підходів.

Перелік посилань

1. Хорошко В. О., Яремчук Ю. Є., Карпінець В. В. Комп'ютерна стеганографія: методи приховування інформації у цифрових зображеннях // Науковий вісник ВНТУ. 2021. № 3. С. 45–52. URL: <http://ir.lib.vntu.edu.ua> (дата звернення: 28.02.2025).
2. Мар'єнко О. В., Степаненко О. О. Фрактальний аналіз зображень у медицині та морфології: базові методи та перспективи застосування // Morphologia. 2021. Т. 15, № 3. С. 200–207. URL: <http://repo.knmu.edu.ua> (дата звернення: 28.02.2025).
3. Журавель І. М. Вибір налаштувань під час обчислення поля фрактальних розмірностей зображення // Науковий вісник НЛТУ України. 2018. Т. 28, № 2. С. 159–163.
4. Дубовик О. В., Коваленко О. В. Методика оцінки стеганографічних методів приховування інформації в зображеннях // Системи обробки інформації. 2015. № 2(127). С. 45–48.
5. Kaur S., Kaur A. Palette-Based Image Steganography: A Survey // International Journal of Computer Applications. 2015. Vol. 111, No. 12. P. 1–5.
6. Chan C. K., Cheng L. M. Image Steganography Using Pixel Value Differencing and LSB Substitution // Microelectronics Journal. 2016. Vol. 37, No. 7. P. 393–402.
7. Pustyulga S. I., Samchuk V. P. Quantitative analysis of null-dimensional (points) multiplicity by methods of fractal geometry // Applied Geometry and Engineering Graphics. 2019. № 96. С. 64–72. DOI: 10.32347/0131-579x.2019.96.64-72.
8. Журавель Ю. І., Мичуда Л. З. Метод кількісного оцінювання візуальної якості цифрових кольорових зображень // Сучасний захист інформації. 2024. № 4 (60). С. 39–45. DOI: 10.31673/2409-7292.2024.040004.
9. Журавель Ю. І., Мичуда Л. З. Стеганографічний метод приховування інформації з використанням фрактальних розмірностей зображення // Інформаційні технології і автоматизація – 2024: матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції, Одеса, 31 жовтня – 1 листопада 2024 р. Одеса: Видавництво ОНТУ, 2024. С. 191–194.
10. Вовк О. О., Астраханцев А. А. Синтез стеганографічного методу передачі даних, ефективного за критеріями надійності та захищеності // Проблеми телекомунікацій. 2015. № 1. С. 45–52. URL: <https://visn-icct.uu.edu.ua/index.php/icct/article/download/61/18> (дата звернення: 28.02.2025).

Надійшла 25.01.2025