

ВИКОРИСТАННЯ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЛЯ ПРИХОВУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ В НЕРУХОМИХ ЗОБРАЖЕННЯХ

© Лагун А. Н., Лагун І.І., 2013

Наведено результати досліджень щодо використання вейвлет-перетворення для приховування інформації в цифрових зображеннях. Приховано цифрові водні знаки у гладких областях зображення за допомогою вейвлетів Добеші і отримано стегозображення високої якості. Також проаналізовано вплив рівнів розкладання контейнера зображення на якість приховування цифрового водяного знака. Також визначено можливості застосування різних типів вейвлет-перетворень у стеганографії.

Ключові слова: дискретне малохвильове перетворення, стеганографія, цифровий водяний знак, стегозображення.

The paper presents the outcomes of research on the use of wavelet transform for hiding information in digital still images. Hiding digital watermarks in smooth areas of an image using Daubechies wavelets was carried out and high-quality steganographic images were obtained. The influence of the level of decomposition of image container on the quality of the digital watermark hiding was analysed. The paper also outlines applicability of different types of wavelet transforms in steganography.

Key words: discrete wavelet transform, steganography, digital watermarking, stego.

Вступ

Розвиток засобів цифрової обчислювальної техніки дав поштовх для розвитку комп'ютерної стеганографії, яка ґрунтується на вбудовуванні секретного повідомлення в цифрові дані, що, як правило, мають аналогову природу (аудіозаписи, зображення, відео).

Стегосистема – сукупність засобів і методів, які використовують для формування прихованого каналу передавання інформації [1]. Основним призначенням стегосистеми є “не стільки приховування секретних даних, скільки передавання з основною інформацією додаткової, взагалі не секретної, котру не можна видалити без значного погіршення якості основного повідомлення і на підставі прийому якої здійснюється процедура ідентифікації і/або верифікації основного повідомлення”. Загальну структуру стегосистеми наведено на рис. 1.

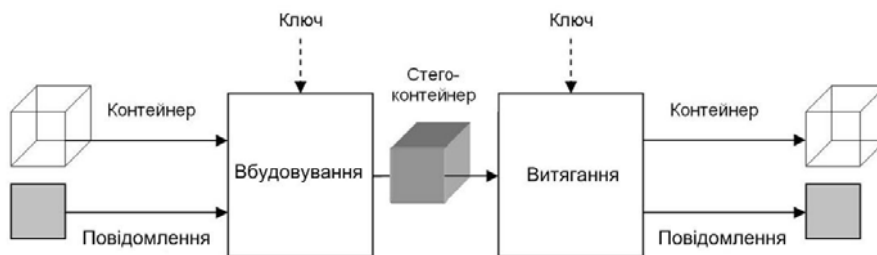


Рис. 1. Структура стегосистеми

Повідомлення вбудовується в контейнер за допомогою ключа стегокодером, формуючи стегоконтейнер, або стего. Стего на приймальній стороні надходить на стегодетектор, який витягає приховане повідомлення.

Часто як контейнер використовують нерухомі цифрові зображення, а для захисту інтелектуальної власності контейнера використовують цифрові водяні знаки (ЦВЗ). ЦВЗ – це зазвичай невеликий обсяг інформації (наприклад, ім'я автора, торгова марка, дата публікації, цифровий ідентифікатор об'єкта), яку вбудовують в контейнер для її подальшого виявлення, зокрема для підтвердження авторства у разі несанкціонованого копіювання [2].

Вбудовують ЦВЗ у нерухоме зображення різними методами, з яких можна виділити дві великі групи: приховування інформації в просторовій та частотній областях зображення.

Найпоширенішим методом приховування інформації в часовій (просторовій) області є метод

заміни найменшого значущого біта (LSB), що полягає в заміні надлишкової, малозначимої частини зображення бітами секретного повідомлення.

Стеганографічні методи приховування даних у просторовій області зображення є нестійкими до більшості з відомих видів спотворень. Наприклад, використання операції компресії із втратами (щодо зображення, це може бути JPEG-компресія) призводить до часткового або, що ймовірніше, повного знищення вбудованої в контейнер інформації. Стійкішими до різноманітних спотворень, зокрема й компресії, є методи, що використовують для приховування даних не просторову, а частотну область контейнера.

Найпоширенішими серед усіх ортогональних перетворень у стеганографії є вейвлет-перетворення і дискретно-косинусне перетворення.

1. Огляд принципів кодування та характеристик зображень при використанні вейвлет-перетворень

Вейвлет-перетворення – це локалізований аналітичний метод часових інтервалів із фіксованим розміром вікна й конвертованою формою, що дає змогу добре локалізувати низькочастотні деталі сигналу в частотній області (основні гармоніки), а високочастотні – в часовій.

Основна ідея дискретного вейвлет-перетворення (DWT) у процесі обробки зображення полягає в розкладанні зображення в підзображення різних просторових та частотних областей [3]. Після DWT перетворення інформація аналізується в 4-х частотних областях, одна з яких є низькочастотною (LL) і три – високочастотними (LH, HL, HH) (рис. 2).

Чверть коефіцієнтів двовимірного перетворення є результатом дії високочастотного фільтра (H) на рядки, а потім його дії на результуючі стовпці інформації. Це блок коефіцієнтів у правому нижньому кутку схеми, позначений HH₁. Інша чверть коефіцієнтів двовимірного перетворення є результатом дії низькочастотного фільтра (L) на стовпці інформації, які вже пройшли через високочастотний фільтр. Цей блок позначений LH₁ і знаходиться в правому верхньому куті схеми. Аналогічно блок HL₁, розташований в лівому нижньому кутку схеми, є результатом низькочастотної обробки рядків з подальшою високочастотною обробкою стовпців. Лівий верхній кут схеми поділено на менші блоки, показуючи, що операція вейвлет-перетворення послідовно впливає на меншу кількість коефіцієнтів, – аж до останнього коефіцієнта в лівому верхньому кутку, до якого застосовується тільки низькочастотний фільтр. Коефіцієнти з високочастотною складовою називаються деталізуючими, а тільки з низькочастотною (LL) – апроксимуючими.

LL ₃	LH ₃	LH ₂	LH ₁
HL ₃	HH ₃		
HL ₂		HH ₂	
HL ₁		HH ₁	

Рис. 2. Схема вейвлет-перетворення

Для дискретного вейвлет-аналізу використовують різні базиси вейвлетів [4], зокрема вейвлети Хаара, Добеші, симлети, кофлети та ортогональні вейвлети. Наведені базиси відрізняються різними значеннями вейвлет-коефіцієнтів та підходами до формування спектрів.

Загалом оцінюють алгоритми приховування ЦВЗ за критеріями стійкості та якості приховування. Якість приховування ЦВЗ у зображенні визначається за допомогою пікового відношення сигнал/шум (PSNR), яке визначається за формулою

коефіцієнтів, – аж до останнього коефіцієнта в лівому верхньому кутку, до якого застосовується тільки низькочастотний фільтр. Коефіцієнти з високочастотною складовою називаються деталізуючими, а тільки з низькочастотною (LL) – апроксимуючими.

Для дискретного вейвлет-аналізу використовують різні бази вейвлетів [4], зокрема вейвлети Хаара, Добеші, симлети, кофлети та ортогональні вейвлети. Наведені бази відрізняються різними значеннями вейвлет-коефіцієнтів та підходами до формування спектрів.

Загалом оцінюють алгоритми приховування ЦВЗ за критеріями стійкості та якості приховування. Якість приховування ЦВЗ у зображенні визначається за допомогою пікового відношення сигнал/шум (PSNR), яке визначається за формулою

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{A^2}{\frac{1}{MN} \sqrt{\sum_{u=1}^M \sum_{v=1}^N (X_{uv} - X_{uv}^*)^2}} \quad (1)$$

Ще одним числовим показником, який дає змогу оцінити якість приховування ЦВЗ, є середньоквадратична похибка:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{u=1}^M \sum_{v=1}^N (S_{uv} - C_{uv})^2, \quad (2)$$

де u і v – координати зображення; M і N – розміри зображення; S_{uv} – створене стегозображення; C_{uv} – початкове зображення.

2. Дослідження якості стегозображень із використанням деталізуючих та апроксимуючих вейвлет-коефіцієнтів

Для вбудовування ЦВЗ відбираються тільки вейвлет-коефіцієнти $f(m,n)$, амплітуда яких вища за деякий поріг (JND). Використаємо схему вбудовування ЦВЗ, яку запропонував Christine I.Podilchuk [5]. Вбудовування інформації виконується з урахуванням порогу JND:

$$X_{u,v,l,f}^* = \begin{cases} X_{u,v,l,f} + J_{l,f} \cdot w_{u,v,l,f}, & X_{u,v,l,f} > J_{l,f} \\ X_{u,v,l,f} & \end{cases}, \quad (3)$$

де l – рівень розкладання ($l=1,2,3,4$), f – частотний діапазон ($f=1,2,3$).

Витягування інформації здійснюється при знанні початкового зображення за формулою

$$w_{u,v}^* = \frac{X_{u,v}^* - X_{u,v}}{J_{u,v}} \quad (4)$$

Отримане зображення віднімається від вихідного зображення і визначається кореляція між різницею сигналів і послідовністю $w_{u,v}$. Значення коефіцієнта кореляції порівнюється з JND-порогом, що дозволяє визначити, чи міститься водяний знак в отриманому зображенні. Перед обчисленням кореляції всі коефіцієнти, які менші за модулем від поточного порогу, відкидаються.

Як контейнер використовується нерухоме зображення. Для досліджень вибрано зображення castle.jpeg і ЦВЗ для приховування у вигляді QR-коду (рис. 3).



Рис. 3. Контейнер castle.jpeg і цифровий водяний знак



Рис. 4. Результат приховування ЦВЗ

Алгоритм буде таким. Спочатку розкладається зображення на апроксимуючі та деталізуючі коефіцієнти за допомогою функції `dwt2`. Тип вейвлет-коефіцієнтів вибираємо як вейвлети Добеші 2-го порядку. Оскільки ЦВЗ вбудовуватиметься в частотній області зображення, то необхідно застосувати вейвлет-перетворення і до ЦВЗ.

Спочатку вбудуємо ЦВЗ в правий верхній кут зображення. В цьому місці зображення існує однорідне зображення синього кольору, тому вбудовуємо використовуючи порог чутливості 1, в синю складову зображення. Результати приховування наведено на рис. 4.

Для цього типу зображення за допомогою Matlab - функції `psnr_mse_maxerr` одержано такі значення: $PSNR=94.5183$; $MSE=2.3E-5$.

З одержаних результатів можна зробити висновок, що за рахунок гладких областей зображення-контейнера приховування ЦВЗ відбувається дуже добре навіть без використання порогового коефіцієнта для масштабування ЦВЗ, про що свідчать результати психовізуального аналізу і обчислені коефіцієнти PSNR і MSE.

З використанням іншої області зображення і зеленої частини палітри зображення-контейнера, різних значень порогу чутливості одержано результати, які наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів для оцінки якості стегозображення

№ з/п	JND	PSNR	MSE
1	1	77.7110	0.0011
2	0.5	82.0527	4.1E-4
3	0.1	94.1940	2.6E-5
4	0.01	97.7869	1.1E-5

З цих результатів випливає, що при вбудовуванні ЦВЗ у різко контрастні області зображення потрібно використовувати поріг чутливості для ЦВЗ, щоб зменшити значення апроксимуючих та деталізуючих коефіцієнтів розкладання.

Основним недоліком розглянутих алгоритмів вбудовування є низька стійкість до атак на основі афінних перетворень.

Оскільки основна інформація про спектр зображення міститься в апроксимуючих коефіцієнтах, то згодом було досліджено можливість приховування ЦВЗ у деталізуючих коефіцієнтах.

Для розкладання використовується вейвлет-перетворення Добеші D8.

При вбудовуванні ЦВЗ в R-складову палітри зображення без врахування порогу чутливості з використанням апроксимуючих і деталізуючих коефіцієнтів 5-го рівня розкладання виявилось, що ЦВЗ поширився по всьому стегозображенню і може спостерігатися неозброєним оком. Тому під час приховування було введено поріг чутливості, який становить 0.5 і 0.01. Про якість приховування свідчать коефіцієнти PSNR і MSE, значення яких наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Коефіцієнти якості стегозображення

№ з/п	JND	PSNR	MSE
1	1	75.6065	0.0018
2	0.5	81.6271	4.5E-4
3	0.1	95.6065	1.8E-5

Також досліджено можливість приховування ЦВЗ у деталізуючих коефіцієнтах. Розмір розкладеного ЦВЗ (перший рівень розкладання) має бути таким, щоб ЦВЗ повністю помістився в деталізуючий або апроксимуючий коефіцієнт. У нашому випадку вибрано розмір ЦВЗ $126 \times 126 = 15876$ пікселів. Такий ЦВЗ може поміститися в деталізуючі або апроксимуючі коефіцієнти контейнера на четвертому рівні розкладання.

ЦВЗ вбудовувався у вертикальні (сV4), горизонтальні (сH4), діагональні (сD4) і апроксимуючі (сA4) коефіцієнти четвертого рівня розкладання без врахування порогу чутливості. Для всіх чотирьох випадків було обчислено значення коефіцієнтів якості стегозображення, які наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Коефіцієнти якості стегозображення для різних типів вейвлет-коефіцієнтів

№ з/п	Тип вейвлет-коефіцієнтів розкладання	PSNR	MSE
1	Деталізуючі горизонтальні	75.8441	0.0017
2	Деталізуючі вертикальні	75.8308	0.0017
3	Деталізуючі діагональні	75.1354	0.002
4	Апроксимуючі	76.5639	0.0014

З таблиці видно, що немає істотного значення, в які з коефіцієнтів вейвлет-розкладання зображення-контейнера вбудовувати ЦВЗ, оскільки і за апроксимуючих, і вертикальних, і горизонтальних, і діагональних деталізуючих коефіцієнтів помітно спотворюється стегозображення.

Цього можна уникнути, якщо при вбудовуванні використати поріг чутливості, який дорівнює 0,1. У цьому випадку значення PSNR перевищують 90, що вказує на якість стегозображення.

3. Визначення впливу типу вейвлет-базису на якість вбудовування ЦВЗ у нерухоме зображення

Для дослідження вибрано такі вейвлет-базиси, як вейвлети Добеші, симлети, кофлети, дискретні вейвлети Мейера, біртогональні вейвлети. Використовується поріг чутливості, що дорівнює 1, оскільки в цьому випадку можна отримати візуальну і кількісну оцінку якості стегозображення. Крім того, досліджено чотири рівні розкладання контейнера і один рівень розкладання ЦВЗ. Результати досліджень наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Результати досліджень впливу типу вейвлетів на якість стегозображення

№ з/п	Тип вейвлет-перетворення	PSNR	MSE
1	db45	73.5305	0.0029
2	db30	72.4667	0.0037
3	db15	71.9468	0.0042
4	db8	71.8329	0.0043
5	db1	71.5662	0.0045
6	coif5	71.636	0.0045
7	coif1	71.1199	0.0050
8	sym2	70.1597	0.0063
9	sym8	72.2994	0.0038
10	sym15	70.5322	0.0058
11	sym25	71.4069	0.0047
12	dmey	70.5442	0.0057
13	bior1.1	71.5662	0.0045
14	bior1.5	66.6822	0.0140
15	bior2.8	61.7355	0.0436
16	bior3.1	31.2740	48.4931
17	bior3.5	50.7218	0.5507
18	bior4.4	69.9705	0.0065
19	bior5.5	70.1940	0.0062
20	bior6.8	69.3766	0.0075

Аналізуючи дані таблиці, встановлено, що:

– при використанні для приховування ЦВЗ вейвлетів Добеші якість стегозображення збільшується із збільшенням порядкового номеру вейвлета Добеші, що пояснюється більшою кількістю коефіцієнтів у випадку db45, які формують спектр зображення. Проте це підвищення якості є незначним при зміні типу вейвлетів від db1 до db45 (значення PSNR від 71.56 до 73.53, відповідно), тому майже всі вейвлети Добеші можна використовувати для приховування;

– при дослідженні кофлетів і симлетів різних порядків одержано подібні результати, як і для вейвлетів Добеші, про що свідчать результати психовізуального аналізу одержаних стегозображень і значення PSNR і MSE. Тому і ці вейвлети можна використовувати для цілей стеганографії;

– при використанні біртогональних вейвлетів bior1.1 і bior5.5 одержано прийнятні результати якості стегозображення. Проте біртогональні вейвлети третього порядку спотворюють зображення із прихованим цифровим водяним знаком, яке сприймає людське око, і тому не можуть використовуватися для приховування ЦВЗ.

Висновки

1. Результати досліджень показали, що внаслідок існування гладких областей в зображенні-контейнері ЦВЗ приховується дуже добре навіть без використання порогового коефіцієнта для масштабування ЦВЗ, про що свідчать результати психовізуального аналізу і обчислені коефіцієнти PSNR і MSE. Проте внаслідок вбудовування у визначені біти, які знаходяться в одному місці контейнера, стійкість цього методу вбудовування до відомих стегоатак дуже низька.

2. Доведено, що при вбудовуванні ЦВЗ у різко контрастні області зображення потрібно використовувати поріг чутливості для ЦВЗ, щоб зменшити значення апроксимуючих та деталізуючих коефіцієнтів розкладання. Основним недоліком розглянутих методів вбудовування є низька стійкість до атак на основі афінних перетворень.

3. Встановлено, що немає істотного значення, в які з коефіцієнтів вейвлет-розкладання зображення-контейнера вбудовувати ЦВЗ, оскільки і за апроксимуючих, і вертикальних, і горизонтальних, і діагональних деталізуючих коефіцієнтів помітно спотворюється стегозображення. Цього можна уникнути, якщо при вбудовуванні використати поріг чутливості.

4. Дослідженням впливу типу вейвлет-перетворення на якість стегозображення встановлено, що вейвлет-перетворення Добеші, кофлети, симлети і дискретні вейвлети Мейєра дають майже однакову якість стегозображення, а біртогональні вейвлети третього порядку дуже зменшують значення PSNR і тому спотворюють стегозображення.

1. Грибунин В.Г. *Цифровая стеганография* / В.Г. Грибунин, И.Н. Оков, И.В. Туринцев. – М. : СОЛОН-Пресс, 2002. – 236 с. 2. Коначович Г.Ф. *Компьютерная стеганография. Теория и практика.* / Г.Ф. Коначович, А.Ю. Пузыренко. – К. : МК-Пресс, 2006. – 288 с. 3. Малла С. *Вейвлеты в обработке сигналов* / С. Малла. – М. : Мир, 2005. – 671 с. 4. Добеши И. *Десять лекций по вейвлетам* / И. Добеши. – Ижевск : НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2001. – 464 с. 5. Wolfgang R.B. *Perceptual Watermarking for Digital Images and Video* / R.B. Wolfgang, C.I. Podilchuk, E.J. Delp // *Proceeding IEEE, Special Issue on Identification and Protection of Multimedia Information.* – 1999. – Vol. 87, № 7. – P. 1088–1126.