

УДК: 004.056.5

ЗМЕНШЕННЯ ВІДХИЛЕНЬ КООРДИНАТ ТОЧОК ВНАСЛІДОК ВБУДОВУВАННЯ ЦИФРОВИХ ВОДЯНИХ ЗНАКІВ У ВЕКТОРНІ ЗОБРАЖЕННЯ

Василь Карпінець, Юрій Яремчук

Вінницький національний технічний університет

Анотація: В роботі проведено аналіз проблеми виникнення значних відхилень окремих точок векторного зображення після вбудовування ЦВЗ. Для вирішення вказаної проблеми запропоновано метод відбору придатних для вбудовування матриць коефіцієнтів ДКП, зміна яких не призводить до значних відхилень координат точок. Для цього перед вбудовуванням використовуються умови для порівняння значень коефіцієнтів з деяким граничним значенням, що визначає максимально можливу зміну коефіцієнтів внаслідок вбудовування ЦВЗ.

Summary: The paper analyzes the problem of large deviations of individual points of the vector image after embedding watermark. To solve the given problem the selection method suitable for embedding matrix coefficients of discrete cosine transform, a change which does not lead to significant variations of position. To do this, before embedding conditions used to compare coefficients of a certain limit, which determines the maximum possible change in the coefficients due to watermark embedding.

Ключові слова: Стеганографія, цифровий водяний знак, захист авторського права, дискретне косинус-перетворення, векторні зображення.

I Вступ

Графічні цифрові зображення сьогодні дуже широко використовуються в комп'ютерних системах, зокрема все більшого поширення отримують цифрові зображення векторного формату, що використовуються для проектування архітектурних об'єктів, інтер'єрів, розробки приладів, реклами, логотипів, створення шрифтів, географічних карт тощо, на створення яких витрачається багато часу та коштів. В зв'язку з цим актуальною стає проблема захисту векторних зображень. При цьому особливий інтерес викликає таке забезпечення захисту, для якого не потрібно наявності оригіналу для підтвердження авторства.

Ця проблема вирішується методами вбудовування цифрових водяних знаків (ЦВЗ) у зображення. Серед них найбільшого поширення отримали методи, які базуються на частотних перетвореннях. До таких методів відносяться методи Базіна-Барса-Маделана, Хе-Жу-Ванга, Солачідіса-Ніколаїдіса-Пітаса [2], а також метод Войта-Янга-Буша [3], який базується на зміні значень високочастотних (ВЧ) коефіцієнтів одновимірного дискретного косинусного перетворення (ДКП) векторного зображення. Використання ДКП дозволяє виділяти високочорельовані точки векторного зображення і змінювати відповідні їм коефіцієнти для забезпечення меншого впливу на якість векторного зображення. Даний метод забезпечує зменшення впливу ЦВЗ при його вбудовуванні на якість зображення, однак сумарна похибка відхилення координат точок відносно оригіналу в деяких випадках є досить суттєвою.

В роботі [4] запропоновано метод, в якому для зменшення сумарної похибки відхилення координат точок від оригіналу пропонується використовувати перетворення над більшим масивом точок у вигляді двовимірного ДКП розміром 8×8 і при цьому змінювати координати ДКП таким чином, щоб вплив ЦВЗ на якість зображення був мінімальним при забезпеченні чіткого розпізнавання бітів ЦВЗ.

Однак, в деяких випадках максимальне відхилення точок досягає великих значень, яке може призвести до помітних спотворень окремих точок, що може бути неприпустимим для деяких зображень та додатків, що їх використовують.

В зв'язку з цим, актуальними є дослідження, спрямовані на зменшення значень максимальних відхилень координат точок зображення внаслідок вбудовування ЦВЗ.

II Метод вбудовування ЦВЗ у векторні зображення на основі двовимірного ДКП

З метою проведення досліджень щодо вирішення даної проблеми розглянемо метод [4] більш докладно.

Згідно з методом [4] зображення представляється у вигляді одновимірного масиву V , в якому елементами є точки векторного зображення V_l , де $l=1..N$, N – кількість точок в масиві. $V_l = (X_l, Y_l)$, де X_l, Y_l – значення координати точки V_l векторного зображення.

Далі формуються матриці розміром 8×8 (тобто розмірність матриці $n=8$) з кожних 64 координат точок масиву V , які позначено, як $C_i(x, y)$, де $i=1..t$, t – кількість сформованих матриць, x, y – позиції координат в цій матриці.

Для кожної матриці $C_i(x, y)$ проводиться пряме двовимірне ДКП, в результаті чого отримуються матриці коефіцієнтів $F(u, v)$, де u, v – позиції цих коефіцієнтів в матриці. ДКП в загальному вигляді для i -ої матриці $F_i(u, v)$ може бути представлено таким чином:

$$F_i(u, v) = \frac{c(u) \cdot c(v)}{\sqrt{2n}} \cdot \sum_{x=0}^{n-1} \sum_{y=0}^{n-1} C_i(x, y) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot u \cdot (2x+1)}{2n}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot v \cdot (2y+1)}{2n}\right), \quad (1)$$

де $c(v) = \frac{1}{\sqrt{2}}$, якщо $u = 0$, і $c(u) = 1$, якщо $u > 0$; $c(v) = \frac{1}{\sqrt{2}}$, якщо $v = 0$, і $c(v) = 1$, якщо $v > 0$.

Для вбудовування одного біту ЦВЗ змінюється значення одного високочастотного (ВЧ) коефіцієнта $F_i(u_1, v_1)$ матриці ДКП залежно від значень двох ВЧ-коефіцієнтів $F_i(u_2, v_2)$ та $F_i(u_3, v_3)$.

Вибір позицій коефіцієнтів матриці векторного зображення для приховування ЦВЗ може проводитись одразу, або за допомогою частини секретного стегоключа k . Наприклад, псевдовипадково генеруються три позиції (u_1, v_1) , (u_2, v_2) та (u_3, v_3) для відповідних коефіцієнтів.

Після вибору позицій трьох коефіцієнтів $F_i(u_1, v_1)$, $F_i(u_2, v_2)$ та $F_i(u_3, v_3)$ проводиться вбудовування бітів ЦВЗ.

ЦВЗ представляється у вигляді масиву бітів m розміром q . Кожен біт ЦВЗ m_j , $j = 1..q$, вбудовують послідовно по одному в кожну матрицю $F_i(u, v)$, $i = 1..t$.

Вбудовування бітів ЦВЗ m_j здійснюється таким чином. Якщо біт $m_j = 0$, то перевіряється умова:

$$F_i(u_1, v_1) < \frac{F_i(u_2, v_2) + F_i(u_3, v_3)}{2}. \quad (2)$$

Якщо умова (2) виконується, значення коефіцієнта $F_i(u_1, v_1)$ залишається без змін, тобто у матриці $F'_i(u, v)$ з вбудованим бітом ЦВЗ коефіцієнт $F'_i(u_1, v_1)$ буде дорівнювати значенню коефіцієнта $F_i(u_1, v_1)$, інакше значення $F'_i(u_1, v_1)$ отримується як середнє значення коефіцієнтів $F_i(u_2, v_2)$ та $F_i(u_3, v_3)$ зменшене на значення P , тобто:

$$F'_i(u_1, v_1) = \frac{F_i(u_2, v_2) + F_i(u_3, v_3)}{2} - P. \quad (3)$$

Величина P використовується для забезпечення чіткої ідентифікації бітів ЦВЗ при витягуванні.

Якщо при вбудовуванні біт ЦВЗ $m_j = 1$, то перевіряється виконання такої умови:

$$F_i(u_1, v_1) > \frac{F_i(u_2, v_2) + F_i(u_3, v_3)}{2}. \quad (4)$$

Якщо умова (4) виконується, то коефіцієнт $F'_i(u_1, v_1)$ буде дорівнювати значенню коефіцієнта $F_i(u_1, v_1)$, інакше:

$$F'_i(u_1, v_1) = \frac{F_i(u_2, v_2) + F_i(u_3, v_3)}{2} + P. \quad (5)$$

Після зміни коефіцієнтів проводиться обернене дискретне косинус-перетворення над матрицями змінених коефіцієнтів $F'_i(u, v)$ для перетворення векторного зображення з частотного представлення в просторове. В результаті отримуються матриці $S(x, y)$ зі значеннями координат точок векторного зображення. Обернене ДКП для i -ої матриці $F'_i(u, v)$ можна представити в такому вигляді:

$$S_i(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2n}} \cdot \sum_{u=0}^{n-1} \sum_{v=0}^{n-1} c(u)c(v)F'_i(u, v) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot u \cdot (2x+1)}{2n}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot v \cdot (2y+1)}{2n}\right). \quad (6)$$

Далі з отриманих матриць $S(x, y)$ формується одновимірний масив точок векторного зображення V' .

Для виявлення ЦВЗ не потрібно наявності оригіналу зображення чи самого ЦВЗ окрім секретного стегоключа k .

Витягування ЦВЗ з векторного зображення проводиться таким чином. Спочатку з масиву точок векторного зображення з вбудованим ЦВЗ V' формуються матриці $C'_i(x, y)$ розміром 8×8 , де $i' = 1..t'$, t' – кількість сформованих матриць.

Далі над матрицями $C'(x, y)$ проводиться пряме двовимірне ДКП згідно з формулою (1), після чого буде отримано матриці коефіцієнтів ДКП $F_i'(u, v)$, $i' = 1..f'$, з вбудованим ЦВЗ.

Після вибору позицій трьох ВЧ-коефіцієнтів $F_i'(u_1', v_1')$, $F_i'(u_2', v_2')$ та $F_i'(u_3', v_3')$ перевіряється виконання умов та визначається відповідне значення біту ЦВЗ $m_{j'}$:

$$\begin{cases} m_{j'} = 0, & \text{якщо } F_i'(u_1', v_1') < \frac{F_i'(u_2', v_2') + F_i'(u_3', v_3')}{2} \\ m_{j'} = 1, & \text{якщо } F_i'(u_1', v_1') > \frac{F_i'(u_2', v_2') + F_i'(u_3', v_3')}{2} \end{cases} \quad (7)$$

Далі витягнуті біти $m_{j'}$, $j' = 1..q'$, перетворюються у формат представлення ЦВЗ.

III Зменшення відхилень координат точок внаслідок вбудовування ЦВЗ

Значні відхилення окремих точок координат векторного зображення, які виникають при вбудовуванні ЦВЗ, можуть бути пов'язані зі зміною коефіцієнтів ДКП, яка проводиться для вбудовування бітів ЦВЗ. Проаналізуємо, в яких випадках можуть виникати такі відхилення.

Згідно з розглянутим методом, вбудовування бітів ЦВЗ забезпечується зміною коефіцієнтів $F_i(u_1, v_1)$ матриць ДКП. Тому причиною значного відхилення координат точок зображення може бути суттєва величина зміни коефіцієнта $F_i(u_1, v_1)$ i -ої матриці $F_i(u, v)$ порівняно з його початковим значенням.

Для зменшення відхилень координат точок можна в розглянутому методі вбудовування ЦВЗ вдосконалити процедуру вибору коефіцієнтів, що використовуються для вбудовування ЦВЗ.

Наприклад, оскільки згідно з формулами (3) та (5) зміна значення коефіцієнта $F_i(u_1, v_1)$ залежить від коефіцієнтів $F_i(u_2, v_2)$ та $F_i(u_3, v_3)$, можна послідовно підряд обирати позиції трьох ВЧ-коефіцієнтів $F_i(u_1, v_1)$, $F_i(u_2, v_2)$ та $F_i(u_3, v_3)$ відповідної їм i -ої матриці $F_i(u, v)$ і порівнювати їх значення між собою для визначення величини зміни коефіцієнта $F_i(u_1, v_1)$ після вбудовування біту ЦВЗ.

Тобто, якщо після вибору трьох коефіцієнтів значення $F_i(u_2, v_2)$ та $F_i(u_3, v_3)$ такі, що зміна коефіцієнта $F_i(u_1, v_1)$ буде значною, то вибрати інші ВЧ-коефіцієнти в межах цієї ж матриці $F_i(u, v)$. Вибір нових позицій коефіцієнтів та перевірку їх значень проводити доти, поки не буде визначено коефіцієнти з прийнятними значеннями.

Оскільки діапазон значень ВЧ-коефіцієнтів в межах однієї матриці може бути досить великим, можливі випадки, коли потрібно буде багато разів вибирати позиції коефіцієнтів для досягнення потрібного результату, що може ускладнити обчислювальну складність методу та збільшити час вбудовування ЦВЗ.

Крім того при реалізації таких вдосколень виникають проблеми визначення позицій коефіцієнтів в матрицях при витягуванні ЦВЗ.

Тому для того, щоб забезпечити зменшення значних відхилень координат точок зображення, і при цьому не ускладнювати процес вбудовування/витягування ЦВЗ, пропонується не використовувати ті матриці $F_i(u, v)$, в яких зміна значень коефіцієнтів призводить до значних відхилень. Тобто, непридатні матриці будуть пропускатися і не будуть брати участі у вбудовуванні бітів ЦВЗ.

Такий підхід зменшить максимально можливу кількість бітів ЦВЗ, які можна вбудувати у зображення, проте це забезпечить збереження якості векторного зображення після вбудовування ЦВЗ.

Виходячи з цього пропонується такий метод (заявка на корисну модель № u 2011 06640 від 27.05.2011 р., назва моделі "Спосіб захисту векторних зображень цифровими водяними знаками у вигляді електронного коду")

Для визначення матриць, які будуть використовуватись для вбудовування, тобто придатності кожної i -ої матриці $F_i(u, v)$, пропонується порівнювати в кожній матриці значення трьох коефіцієнтів $F_i(u_1, v_1)$, $F_i(u_2, v_2)$, $F_i(u_3, v_3)$ між собою, щоб визначити наскільки $F_i(u_2, v_2)$ та $F_i(u_3, v_3)$ відрізняються від $F_i(u_1, v_1)$.

Для цього будемо визначати різницю між $F_i(u_1, v_1)$ і $F_i(u_2, v_2)$, а також між $F_i(u_1, v_1)$ і $F_i(u_3, v_3)$, після чого порівнювати їх з деяким граничним значенням, яке буде визначати рівень придатності матриці для вбудовування. Позначимо це граничне значення як P_h . Граничне значення P_h буде встановлювати

максимальне значення зміни коефіцієнта $F_i(u_1, v_1)$ кожної i -ої матриці $F_i(u, v)$ і використовуватись як параметр при вбудовуванні/витягуванні ЦВЗ.

Оскільки граничне значення P_h використовується в частотному представленні зображення на рівні коефіцієнтів ДКП, його величина може бути різною для кожного конкретного зображення. Вона буде залежати від формату, типу та розміру векторного зображення та ЦВЗ, а також від поставлених вимог до збереження якості зображення після вбудовування ЦВЗ.

В загальному випадку пропонується визначити величину P_h як середнє арифметичне абсолютних значень ВЧ-коефіцієнтів з будь-якої матриці коефіцієнтів ДКП.

При цьому слід врахувати, що для забезпечення виконання умов (7) при витягуванні бітів ЦВЗ значення P_h має бути більшим за значення P .

Виходячи з вищесказаного, пропонується перевіряти такі умови:

$$|F_i(u_1, v_1) - F_i(u_2, v_2)| \leq P_h, \quad (8)$$

$$|F_i(u_1, v_1) - F_i(u_3, v_3)| \leq P_h. \quad (9)$$

Якщо хоч одна з цих умов не буде виконуватись, вибрані коефіцієнти не будуть використовуватись для вбудовування, а відповідна їм матриця $F_i(u, v)$ буде вважатися не придатною для вбудовування.

Далі вибирається наступна матриця $F_i(u, v)$ та виконується перевірка її придатності для вбудовування ЦВЗ. Такий аналіз проводиться для всіх матриць коефіцієнтів ДКП $F(u, v)$ і визначаються придатні матриці. Їх кількість буде визначати максимально можливий розмір ЦВЗ, який можна вбудувати у зображення.

Слід зазначити, що аналіз придатності матриць коефіцієнтів ДКП потрібно проводити до вбудовування бітів ЦВЗ, щоб в подальшому уникнути проведення повторно такого аналізу та вбудовування.

При виконанні процедури витягування ЦВЗ, матриці, в які було вбудовано біти ЦВЗ, будуть визначатися аналогічним чином, з використанням умов (8) та (9).

Якщо в результаті аналізу всього зображення виявиться, що кількість бітів ЦВЗ більша ніж кількість придатних для вбудовування матриць $F_i(u, v)$, то можна збільшити граничне значення P_h . Збільшення P_h може здійснюватись на певний відсоток, який можна визначити з відношення тієї кількості бітів ЦВЗ, для яких не вистачає матриць, до загальної кількості бітів ЦВЗ. Слід лише зазначити, що в цьому випадку виникає необхідність передавання P_h разом з маркованим векторним зображенням.

Якщо ж після збільшення величини P_h придатних матриць все одно не буде вистачати, можна збільшувати кількість придатних матриць для вбудовування таким чином.

Пропонується змінювати значення коефіцієнтів $F_i(u_1, v_1)$, $F_i(u_2, v_2)$ та $F_i(u_3, v_3)$ перед вбудовуванням так, щоб виконувались умови (8) та (9).

Якщо умови (8) та/або (9) не виконуються, то це означає, що різниця між коефіцієнтами $F_i(u_1, v_1)$ і $F_i(u_2, v_2)$, або між $F_i(u_1, v_1)$ і $F_i(u_3, v_3)$ більша, ніж величина P_h . Тому пропонується зменшити цю різницю між коефіцієнтами, щоб виконувались умови (8) та (9).

Цього можна досягти, наприклад, зрівнявши значення коефіцієнтів $F_i(u_1, v_1)$, $F_i(u_2, v_2)$ та $F_i(u_3, v_3)$ між собою. Для цього можна замінити значення кожного з цих коефіцієнтів на середнє арифметичне значення усіх трьох коефіцієнтів:

$$F_i(u_1, v_1) = F_i(u_2, v_2) = F_i(u_3, v_3) = \frac{F_i(u_1, v_1) + F_i(u_2, v_2) + F_i(u_3, v_3)}{3} \quad (10)$$

Зрівнявши значення коефіцієнтів $F_i(u_1, v_1)$, $F_i(u_2, v_2)$ та $F_i(u_3, v_3)$, умови (8) та (9) будуть виконуватись, що забезпечить придатність відповідної матриці $F_i(u, v)$. Однак слід врахувати те, що згідно з виразом (10) величина зміни для кожного з коефіцієнтів $F_i(u_1, v_1)$, $F_i(u_2, v_2)$ та $F_i(u_3, v_3)$ залежить від початкових значень цих коефіцієнтів і буде різною для кожного з них. Тому для того, щоб зміни коефіцієнтів не були значними, різниця між коефіцієнтами не має перевищувати певне значення. Для цього перед зміною коефіцієнтів згідно з виразом (10) потрібно порівняти значення коефіцієнтів.

Беручи до уваги те, що ми будемо змінювати значення коефіцієнтів, які не відповідають умовам (8) та/або (9), для визначення величини зміни проаналізуємо ці умови.

Оскільки згідно з виразом (10) значення нових коефіцієнтів залежить від усіх трьох коефіцієнтів, розрахуємо допустиму різницю ще й для пари коефіцієнтів $F_i(u_2, v_2)$ та $F_i(u_3, v_3)$ згідно з формулами (8) та (9):

$$|F_i(u_2, v_2) - F_i(u_3, v_3)| \leq 2P_h \quad (11)$$

Враховуючи вираз (11) можна припустити, що для того, щоб знайти більшу кількість матриць придатних для вбудовування, граничне значення різниці між початковими значеннями коефіцієнтів $F_i(u_1, v_1)$, $F_i(u_2, v_2)$ та $F_i(u_3, v_3)$ має бути більшим ніж $2P_h$. Враховуючи це, встановимо граничне значення на рівні $3P_h$. Тоді коефіцієнти $F_i(u_1, v_1)$, $F_i(u_2, v_2)$ та $F_i(u_3, v_3)$ мають відповідати таким умовам:

$$|F_i(u_1, v_1) - F_i(u_2, v_2)| \leq 3P_h, \quad (12)$$

$$|F_i(u_1, v_1) - F_i(u_3, v_3)| \leq 3P_h, \quad (13)$$

$$|F_i(u_2, v_2) - F_i(u_3, v_3)| \leq 3P_h. \quad (14)$$

Якщо умови (12) - (14) виконуються, то замінюємо значення коефіцієнтів $F_i(u_1, v_1)$, $F_i(u_2, v_2)$, $F_i(u_3, v_3)$ на середнє арифметичне цих трьох коефіцієнтів згідно з виразом (10). Після чого коефіцієнти $F_i(u_1, v_1)$, $F_i(u_2, v_2)$ та $F_i(u_3, v_3)$ будуть відповідати умовам (8) та (9) і максимальна зміна будь-якого з них не буде перевищувати величину $2P_h$. Вбудовування бітів ЦВЗ слід проводити згідно з розглянутим методом, використовуючи формули (3) та (5).

В іншому випадку, коли умови (12) - (14) не виконуються, матриця $F_i(u, v)$ вважається не придатною.

В результаті такий підхід забезпечить більшу кількість придатних матриць для вбудовування. При цьому дещо збільшиться рівень спотворення зображення, оскільки в таких матрицях змінюються усі три коефіцієнти $F_i(u_1, v_1)$, $F_i(u_2, v_2)$, $F_i(u_3, v_3)$ на величину до $2P_h$.

Оскільки після виконання виразу (10) коефіцієнти $F_i(u_1, v_1)$, $F_i(u_2, v_2)$ та $F_i(u_3, v_3)$ приймають однакове значення, це призведе до зменшення рівня стійкості запропонованого стеганографічного методу, так як злоумисник, не знаючи позиції коефіцієнтів $F_i'(u'_2, v'_2)$ та $F_i'(u'_3, v'_3)$, які брали участь у вбудовуванні бітів ЦВЗ, може визначити їх шляхом пошуку двох коефіцієнтів з однаковими значеннями, а позиції $F_i'(u'_1, v'_1)$ буде відповідати коефіцієнт, значення якого більше або менше на величину P від значення коефіцієнта $F_i'(u'_2, v'_2)$ або $F_i'(u'_3, v'_3)$.

Виходячи з цього, для збереження стеганографічної стійкості пропонується інший підхід до збільшення кількості придатних матриць для вбудовування, який базується на зміні всіх трьох коефіцієнтів $F_i(u_1, v_1)$, $F_i(u_2, v_2)$, $F_i(u_3, v_3)$ перед вбудовуванням ЦВЗ таким чином, щоб їх значення відрізнялися між собою.

Для забезпечення меншого рівня спотворення зображення пропонується перед вбудовуванням ЦВЗ змінювати значення цих коефіцієнтів на величину не більшу, ніж P_h . Якщо врахувати те, що, згідно з формулами (8) та (9), максимально допустимі абсолютні значення різниць між коефіцієнтами $F_i(u_1, v_1)$ і $F_i(u_2, v_2)$, а також між $F_i(u_1, v_1)$ і $F_i(u_3, v_3)$ не можуть бути більшими ніж P_h , то зміна значень коефіцієнтів на величину P_h може забезпечити виконання цих обох умов тоді, коли абсолютні значення різниць цих коефіцієнтів не будуть перевищувати величину $2P_h$, тобто:

$$|F_i(u_1, v_1) - F_i(u_2, v_2)| \leq 2P_h, \quad (15)$$

$$|F_i(u_1, v_1) - F_i(u_3, v_3)| \leq 2P_h. \quad (16)$$

В іншому випадку матриця буде вважатися непридатною і не буде використовуватись для вбудовування.

Якщо ж значення коефіцієнтів $F_i(u_1, v_1)$, $F_i(u_2, v_2)$ та $F_i(u_3, v_3)$ відповідають умовам (15) та (16), то відповідна їм матриця може стати придатною після зміни цих коефіцієнтів. При цьому можна змінювати як всі три коефіцієнти $F_i(u_1, v_1)$, $F_i(u_2, v_2)$, $F_i(u_3, v_3)$, так і лише два або один з них.

Для того, щоб збільшити кількість непридатних матриць придатними і при цьому забезпечити менший рівень спотворення зображення, пропонується змінювати мінімально можливу кількість коефіцієнтів для кожної конкретної матриці.

Зміну коефіцієнтів будемо проводити таким чином, щоб матриця, яка є непридатною згідно з умовами (8) та (9) і при цьому відповідає умовам (15) та (16), ставала придатною для вбудовування. Непридатність матриці згідно з умовами (8) та (9) буде відповідати таким умовам:

$$\left(|F_i(u_1, v_1) - F_i(u_2, v_2)| > P_h \right) \text{ та } \left(|F_i(u_1, v_1) - F_i(u_3, v_3)| > P_h \right), \quad (17)$$

$$\left(|F_i(u_1, v_1) - F_i(u_2, v_2)| \leq P_h \right) \text{ та } \left(|F_i(u_1, v_1) - F_i(u_3, v_3)| > P_h \right), \quad (18)$$

$$\left(|F_i(u_1, v_1) - F_i(u_2, v_2)| > P_h \right) \text{ та } \left(|F_i(u_1, v_1) - F_i(u_3, v_3)| \leq P_h \right). \quad (19)$$

З наведених умов видно, що для умови (18) та (19) два з трьох коефіцієнтів відповідають одній з умов придатності (8) або (9), тобто є випадки, коли достатньо змінювати меншу кількість коефіцієнтів, ніж за умовою (17). Будемо намагатись досягти зміни мінімальної кількості коефіцієнтів.

Отже, якщо матриця є непридатною, тобто значення її коефіцієнтів $F_i(u_1, v_1)$, $F_i(u_2, v_2)$, $F_i(u_3, v_3)$ відповідають умовам (17) - (19), але при цьому виконуються умови (15) та (16), то будемо робити матрицю придатною, змінюючи мінімальну кількість з цих коефіцієнтів на величину P_h .

Виходячи з вищесказаного, будемо робити матриці придатними змінюючи коефіцієнти таким чином:

$$\text{Якщо } \left[P_h < |F_i(u_1, v_1) - F_i(u_2, v_2)| \leq 2P_h \right] \text{ та } \left[P_h < |F_i(u_1, v_1) - F_i(u_3, v_3)| \leq 2P_h \right], \text{ то,} \quad (20)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{якщо } [F_i(u_1, v_1) > F_i(u_2, v_2)] \text{ та } [F_i(u_1, v_1) > F_i(u_3, v_3)], \text{ то зменшити } F_i(u_1, v_1) \text{ на } P_h; \\ \text{якщо } [F_i(u_1, v_1) < F_i(u_2, v_2)] \text{ та } [F_i(u_1, v_1) < F_i(u_3, v_3)], \text{ то збільшити } F_i(u_1, v_1) \text{ на } P_h; \\ \text{якщо } [F_i(u_1, v_1) > F_i(u_2, v_2)] \text{ та } [F_i(u_1, v_1) < F_i(u_3, v_3)], \text{ то збільшити } F_i(u_2, v_2) \text{ на } P_h \\ \hspace{15em} \text{та зменшити } F_i(u_3, v_3) \text{ на } P_h; \\ \text{якщо } [F_i(u_1, v_1) < F_i(u_2, v_2)] \text{ та } [F_i(u_1, v_1) > F_i(u_3, v_3)], \text{ то зменшити } F_i(u_2, v_2) \text{ на } P_h \\ \hspace{15em} \text{та збільшити } F_i(u_3, v_3) \text{ на } P_h. \end{array} \right.$$

$$\text{Якщо } \left[|F_i(u_1, v_1) - F_i(u_2, v_2)| \leq P_h \right] \text{ та } \left[P_h < |F_i(u_1, v_1) - F_i(u_3, v_3)| \leq 2P_h \right], \text{ то,} \quad (21)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{якщо } [F_i(u_1, v_1) > F_i(u_3, v_3)], \text{ то збільшити } F_i(u_3, v_3) \text{ на } P_h; \\ \text{якщо } [F_i(u_1, v_1) < F_i(u_3, v_3)], \text{ то зменшити } F_i(u_3, v_3) \text{ на } P_h. \end{array} \right.$$

$$\text{Якщо } \left[P_h < |F_i(u_1, v_1) - F_i(u_2, v_2)| \leq 2P_h \right] \text{ та } \left[|F_i(u_1, v_1) - F_i(u_3, v_3)| \leq P_h \right], \text{ то,} \quad (22)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{якщо } [F_i(u_1, v_1) > F_i(u_2, v_2)], \text{ то збільшити } F_i(u_2, v_2) \text{ на } P_h; \\ \text{якщо } [F_i(u_1, v_1) < F_i(u_2, v_2)], \text{ то зменшити } F_i(u_2, v_2) \text{ на } P_h. \end{array} \right.$$

Якщо значення коефіцієнтів $F_i(u_1, v_1)$, $F_i(u_2, v_2)$, $F_i(u_3, v_3)$ не відповідають жодній з умов (20), (21), (22), то відповідна їм матриця $F_i(u, v)$ вважається непридатною для вбудовування біту ЦВЗ.

Як видно з вищенаведених виразів, запропонований метод дозволяє збільшувати кількість придатних матриць змінюючи не всі три коефіцієнти $F_i(u_1, v_1)$, $F_i(u_2, v_2)$, $F_i(u_3, v_3)$, а лише один або два. Причому необхідність зміни одного коефіцієнта виникає у більшості випадків, і лише у двох випадках (згідно з виразом (20)) виникає необхідність зміни двох коефіцієнтів. При цьому зміна цих коефіцієнтів здійснюється на величину не більшу P_h .

Такий метод не зменшує стеганографічну стійкість самого методу вбудовування ЦВЗ, при цьому зміна не більше двох коефіцієнтів забезпечує в цілому зменшення спотворення зображення.

Слід зазначити таке. Якщо результати проведеного аналізу щодо придатності матриць для вбудовування бітів ЦВЗ показали, що кількість придатних матриць більша, ніж кількість бітів ЦВЗ, можна зменшити граничне значення P_h , що може забезпечити ще менший рівень спотворення значень координат точок зображення, проте це збільшить час вбудовування.

При витягуванні бітів ЦВЗ для визначення придатних матриць з коефіцієнтами перевіряються такі ж умови як і при вбудовуванні (8) та (9) з відповідним значенням P_h .

IV Аналіз запропонованого методу щодо зменшення відхилень координат точок

Аналіз запропонованого методу проведемо з точки зору впливу вбудовування ЦВЗ на якість векторного зображення. Для кращого уявлення переваг запропонованого методу проведемо його порівняльний аналіз з основним методом [4].

Для аналізу виконаємо вбудовування ЦВЗ у векторну географічну карту цими двома методами. Фрагмент обраної векторної карти зображено на рисунку 1.



Рисунок 1 – Фрагмент векторної географічної карти для вбудовування ЦВЗ

Вхідні дані для вбудовування ЦВЗ у векторне зображення для обох методів такі.

Географічний розмір карти: 10,32 на 6,49 км. Розмір файлу карти: в форматі *img* – 0,3 Мб, *mp* (польський) - 3 Мб. Кількість точок карти (з яких формуються полігони та полілінії): 74157. ЦВЗ (в текстовому форматі): «Власник: Карпинець Василь Васильович, м.Вінниця.». Розмір ЦВЗ: 384 біти. Величина $P = 0,00003$. Позиції коефіцієнтів: $F_i(7,7)$, $F_i(7,5)$ та $F_i(7,8)$.

Для запропонованого методу додатково визначаємо граничне значення $P_n = 0,0005$, при якому кількість придатних матриць коефіцієнтів ДКП у даній карті є достатньою для вбудовування обраного ЦВЗ. Тобто немає необхідності змінювати коефіцієнти перед вбудовуванням для забезпечення додаткової кількості придатних матриць.

Після вбудовування ЦВЗ у векторні карти двома методами отримано дві карти з вбудованим ЦВЗ з різними рівнями спотворення. Результат вбудовування бітів ЦВЗ у векторні карти зображено на рисунку 2.

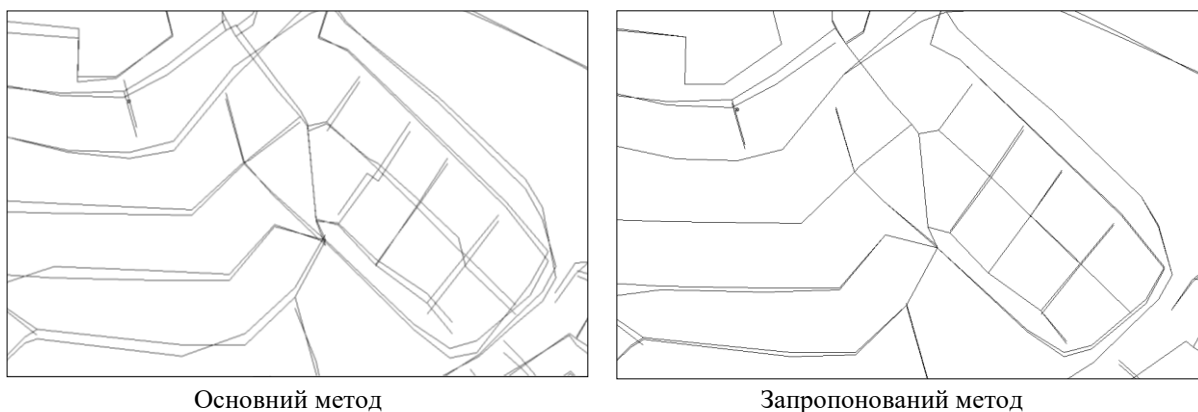


Рисунок 2 – Фрагменти векторних карт після вбудовування ЦВЗ сумішених з оригіналом за обома методами

Як видно з рис. 2, запропонований метод значно менше спотворює карту, оскільки забезпечує менший вплив на координати точок.

Для того, щоб повністю оцінити переваги запропонованого методу визначимо сумарну похибку, середнє та максимальнє відхилення точок векторної карти порівняно з оригіналом для обох методів, що аналізуються.

Результати показників рівня спотворення векторних карт внаслідок вбудовування ЦВЗ методами, що порівнюються, наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати спотворення векторних карт після вбудовування ЦВЗ за обома методами

Показники	Основний метод $P = 0,00003$		Запропонований метод $P = 0,00003$ $P_h = 0,0005$	
	Y	X	Y	X
Сумарна похибка, м	65760	41030	4300	2710
Середнє відхилення точок, м	2,68	1,67	0,17	0,11
Максимальне відхилення точок, м	1902	1202	82,80	48,77

З результатів таблиці 1 видно, що запропонований метод забезпечує менше спотворення зображення внаслідок вбудовування ЦВЗ за усіма показниками. Сумарна похибка та середнє відхилення точок для даного прикладу зменшились майже у 15 разів, а максимальне відхилення точок – більше ніж у 20 разів.

Таким чином, можна стверджувати, що запропонований метод забезпечує зменшення впливу ЦВЗ на якість векторних зображень.

Також було проведено аналіз рівня спотворення зображення у випадку, коли кількості придатних матриць з визначеним значення P_h не було достатньо для вбудовування ЦВЗ, при розмірі ЦВЗ в 3 рази більшому і решті вхідних даних аналогічних даному прикладу. В результаті чого було додатково забезпечено ще 752 придатні матриць згідно з умовами (20) - (22), що майже у два рази більше порівняно з 400 придатними матрицями у оригінальному зображенні. Результати аналізу для даного прикладу показали, що показники спотворення, що визначалися в табл. 1, збільшилися приблизно у два рази. Це може бути пояснено тим, що згідно з умовами (20) - (22) та змінами при вбудовуванні згідно формул (3) - (5) загальна величина зміни коефіцієнтів може досягати значення $2P_h$, що у два рази більше ніж у випадку, коли виконуються умови (8) та (9) в матрицях оригінального зображення.

V Висновки

В роботі запропоновано метод захисту векторних зображень цифровими водяними знаками із забезпеченням зменшення впливу його вбудовування на якість зображення. Особливістю методу є те, що вбудовування бітів ЦВЗ здійснюється лише у ті матриці коефіцієнтів ДКП, зміна яких не призводить до значних відхилень координат точок зображення. Для визначення придатних для вбудовування матриць запропоновано умови відбору з використанням граничного значення величини зміни коефіцієнтів внаслідок вбудовування ЦВЗ.

Також було запропоновано метод для збільшення кількості придатних матриць при однаковому граничному значенні. Метод дозволив збільшувати кількість придатних матриць зміною не більше двох коефіцієнтів, причому у більшості випадків лише одного.

Було проведено аналіз запропонованого методу та порівняння його з основним методом щодо впливу ЦВЗ на відхилення координат точок зображення. Результати аналізу показали, що запропонований метод в окремих випадках забезпечує зменшення максимального відхилення значень координат точок векторних зображень внаслідок вбудовування ЦВЗ більше ніж у 20 разів та їх рівномірне відхилення відносно точок оригіналу векторного зображення.

Література: 1. В. О. Хорошко, О. Д. Азаров, М. Є. Шелест, Ю. Є. Яремчук. *Основи комп'ютерної стеганографії. Навчальний посібник.* – Вінниця: ВДТУ. – 2003. – 143 с. 2. Liangbin Zheng, Yulu Jia, Qun Wang. *Research on Vector Map Digital Watermarking Technology // First International Workshop on Education Technology and Computer Science* – 2009. – P. 303-307. 3. M. Voigt, B. Yang and C. Busch. *Reversible watermarking of 2D vector data // ACM Multimedia and Security Workshop.* – 2004, – P. 160-165. 4. Карнінець В. В., Яремчук Ю. Є. *Вирішення проблеми погіршення якості векторних зображень при вбудовуванні цифрових водяних знаків // Правове, нормативне, та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні* – 2010. – № 1(20). – С.73-83.

?????