

DOI: 10.18372/2310-5461.57.17443

УДК 621.391

О. Ю. Лавриненко, канд. техн. наук
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0002-7738-161X
e-mail: oleksandrlavrynenko@gmail.com;

Д. І. Бахтіяров, канд. техн. наук
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0003-3298-4641
e-mail: bakhtiaroff@tks.nau.edu.ua;

О. Г. Голубничий, д-р техн. наук, доц.
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0001-5101-3862
e-mail: oleksii.holubnychyi@npp.nau.edu.ua;

О. В. Жарова, канд. пед. наук
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0002-4060-850X
e-mail: jarova@ukr.net

МЕТОД РЕКУРСИВНОЇ НИЗЬКОЧАСТОТНОЇ ІНТЕГРАЦІЇ ТЕКСТОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ В СТЕГАНОГРАФІЧНИЙ АУДИОКОНТЕЙНЕР НА ОСНОВІ ВЕЙВЛЕТ-ФІЛЬТРІВ ДОБЕШІ

Вступ

Для забезпечення ефективного приховування текстової інформації в аудіосигналі потрібно глибоке розуміння їх амплітудно-частотних характеристик, оскільки від правильного аналізу того, в яке місце амплітудно-частотної складової інтегрувати текстову інформацію, залежатиме дуже багато факторів, головні з яких – це ефективність самого приховування (маскування), а також стійкість стеганокодека до перекодування аудіоконтейнера [1]. Фундаментальне розуміння спектральних особливостей аудіосигналів дозволять балансувати між підвищенням ефективності приховування текстової інформації в аудіоконтейнері та стійкості до різних алгоритмів стиснення стеганографічного аудіофайлу [2], тобто виникає питання, чи збережеться секретна текстова інформація без спотворення при повторному перекодуванні стеганографічного аудіофайлу, і якщо так, то яке максимальне значення коефіцієнта стиснення при якому секретна інформація залишається цілісною? Зокрема, це питання з подвигло автора написати дану статтю, і розробити один із методів стеганографічного приховування текстової інформації в аудіосигналі, який дозволить відповісти на суперечності, що виникли, використовуючи при цьому сучасні методи

цифрової обробки аудіосигналів і методи спектрального аналізу [3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Поставлене завдання даного наукового дослідження ефективно вирішується за допомогою багаторівневого дискретного вейвлет-перетворення [4] на основі базису Добеші, що дозволяє текстову інформацію рекурсивно вбудовувати в низькочастотну складову аудіосигналу з подальшим скалярним добутком отриманих вейвлет-коефіцієнтів з вейвлет-фільтрами Добеші, що є новим підходом у галузі стеганографії та зробить стеганосистему більш стійкою до перекодування, за рахунок збільшення абсолютної спектральної потужності приховуваної текстової інформації на кожному наступному рівні вейвлет-розкладання [5]. Відмінність розробленого методу від існуючих полягає в тому, що в існуючих методах стеганографічного приховування текстової інформації в аудіосигналі на основі вейвлет-перетворення, текстова інформація зазвичай вбудовується у високочастотні вейвлет-коефіцієнти (ВЧВК) без скалярного добутку з вейвлет-фільтрами, а в розробленому методі пропонується використовувати рекурсивне вбудовування в низькочастотні вейвлет-коефіцієнти (НЧВК) з подальшим скалярним добутком з ортогональними вейвлет-фільтрами

Добеші низьких (ФНЧ) і високих (ФВЧ) частот, що дозволяє підвищити абсолютну спектральну потужність прихованої текстової інформації (рис. 1).

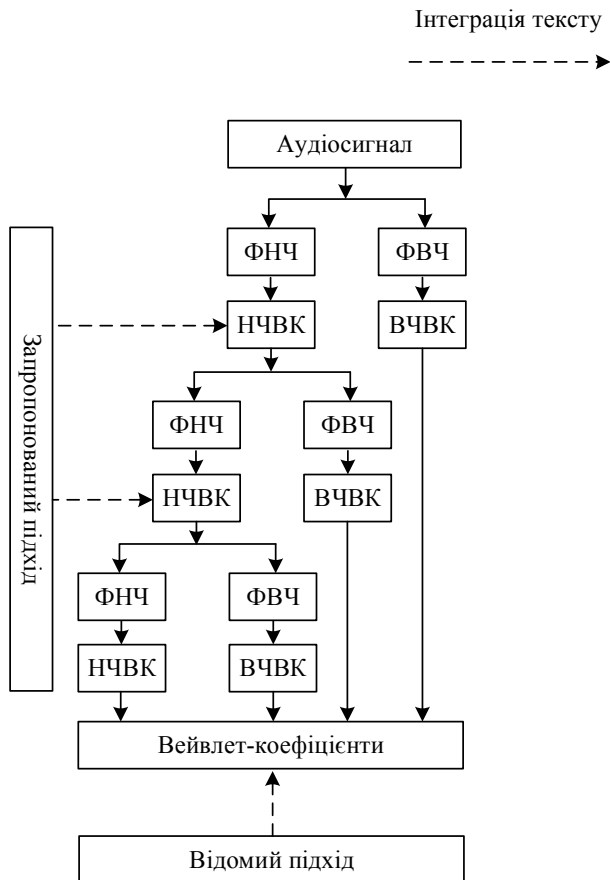


Рис. 1. Схематична ілюстрація відмінностей існуючого та запропонованого підходів для вирішення заявленої проблематики

Запропонований метод підвищує поріг критичного стиснення стеганокерованого аудіосигналу, при якому текст почне спотворюватися (передавальне повідомлення буде відрізнятися від прийнятого).

Таким чином, використовуючи розроблений метод, можна дозволити зловмиснику перекодувати аудіосигнал різними алгоритмами стиснення із втратами звучання, але при цьому текстова інформація, вбудована в аудіосигнал, залишається цілісною. Дане твердження ґрунтується на тому, що на сьогоднішній день все різноманіття існуючих алгоритмів стиснення [6, 7] працюють за одним і тим же принципом, а саме усунення малоінформативної надмірної складової аудіосигналу, а так як запропонований метод приховує текстову інформацію на середніх частотах та середніх амплітудах вейвлет-коефіцієнтів, і це його головна особливість, то він може суттєво підвищити стійкість стеганосистеми до стиснення аудіосигналів, враховуючи при цьому особливості психофізіологічної

моделі сприйняття звуку [8]. Винятком є лише ті випадки, коли йдеться про повне видалення аудіофайлу або застосування критичного стиснення з повною втратою осмисленої аудіо інформації. Кількісна оцінка порогових значень, при яких настає критичне стиснення, буде отримана в експериментальному дослідженні. Під критичним стисненням слід розуміти ступінь стиснення, при якому настає спотворення або повне видалення текстової інформації (порушення семантичних зв'язків) прихованої в аудіосигналі при суттєвому зменшенні надмірності (стисненні) [9].

Тоді головна оцінка ефективності запропонованої стеганосистеми є максимальний ступінь стиснення аудіосигналу та цілісність текстової інформації, тобто найбільший коефіцієнт стиснення при повній цілісності семантичних конструкцій тексту, що за своєю сутністю є основним завданням стеганографії, а саме: мінімізація спотворень, що вносяться стеганокером, і стійкість до атак пасивного зловмисника.

Постановка проблеми

Розроблений метод рекурсивної низькочастотної інтеграції текстової інформації в стеганографічний аудіоконтейнер на основі вейвлет-фільтрів Добеші [10, 11] набуває глибокого сенсу в умовах застосування зловмисником навмисних несанкціонованих маніпуляцій зі стеганокерованим аудіосигналом з метою спотворити вбудовану в нього текстову інформацію, тобто зробити її семантичні конструкції нерозбірливими. Головною з таких маніпуляцій є застосування різних алгоритмів стиснення аудіосигналу [12], але не з метою прибрати його малоінформативні складові, які відповідно до людської психофізіологічної моделі сприйняття звуку знаходяться за порогом чутності, а з метою видалити приховану в аудіосигналі текстову інформацію шляхом навмисного введення спотворень.

Таким чином, підвищення стійкості стеганосистеми до стиснення (зниження надмірності) стеганокерованого аудіосигналу за умови збереження цілісності текстової інформації (істинних семантичних конструкцій), враховуючи при цьому особливості психофізіологічної моделі сприйняття звуку (приховування самого факту передачі тексту маскуванням), є головним завданням даного наукового дослідження.

Запропонований метод

Структурні схеми розробленого методу рекурсивного інтегрування текстової інформації в стеганографічний аудіоконтейнер на основі

вейвлет-фільтрів Добеші представлені на рис. 2 на схемі, і формальне їх подання буде викладено та рис. 3. Детальне роз'яснення всіх блоків, що є далі.

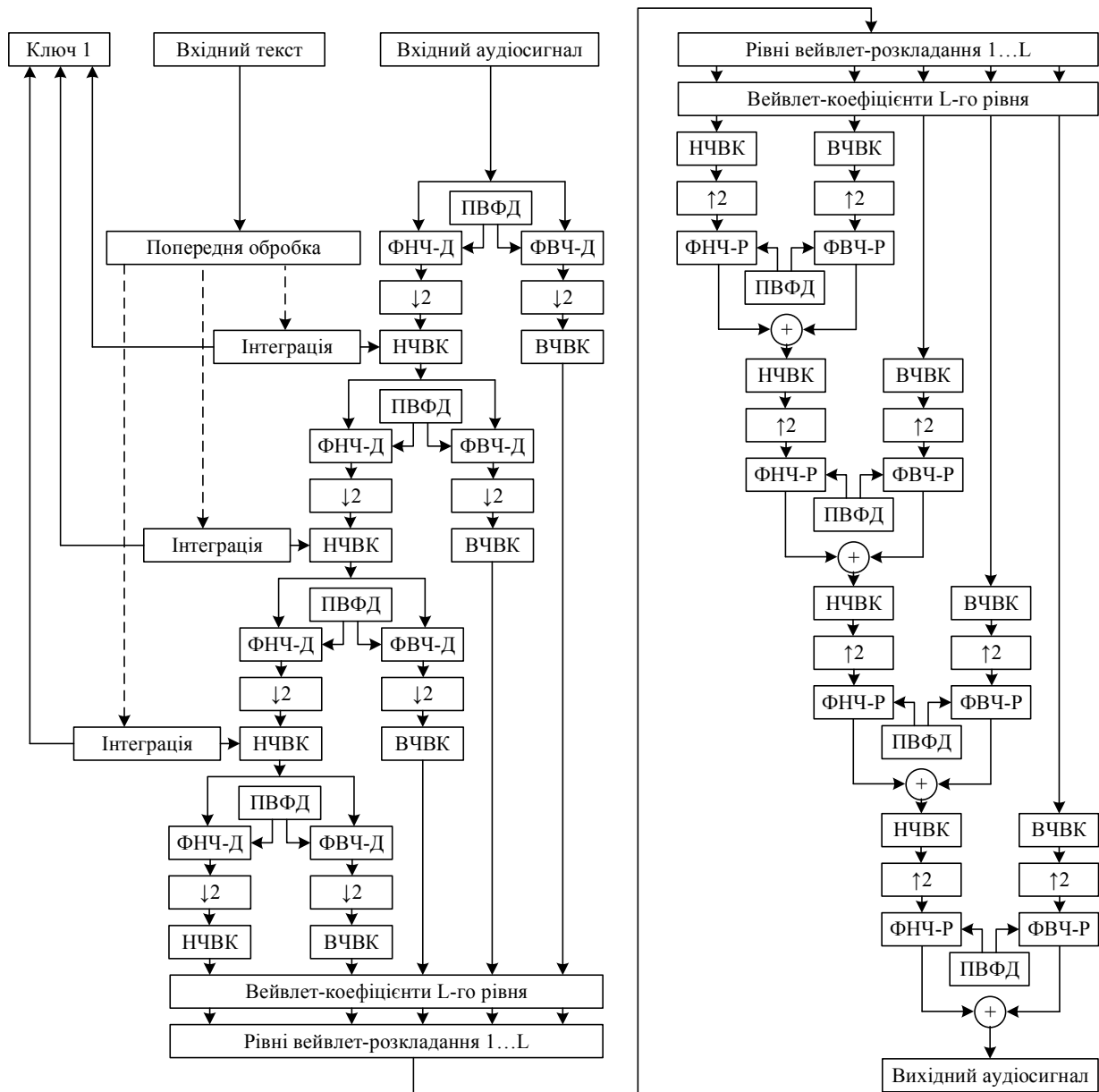


Рис. 2. Структурна схема інтеграції текстової інформації в аудіосигнал на основі вейвлет-фільтрів Добеші

Так, як інтегрування текстової інформації $Tbn_{1,...,b}$ відбувається не в сам аудіосигнал $An_{1,...,A}$, а в його низькочастотні вейвлет-коефіцієнти з подальшим їх скалярним добутком з низькочастотним і високочастотним ортогональними вейвлет-фільтрами Добеші на кожному $1, \dots, L-1$ рівнях вейвлет-розкладання, то потрібно зробити вейвлет-перетворення аудіосигналу $An_{1,...,A}$ та знайти низькочастотні та високочастотні вейвлет-коефіцієнти для кожного $1, \dots, L$ рівня вейвлет-розкладання відповідно до базису Добеші [13].

Щоб розрахувати коефіцієнти породжувального вейвлет-фільтра Добеші (ПВФД) n -го

порядку, необхідно задати лише кількість нульових моментів вейвлет-функції N , тобто порядок функції визначається кількістю нульових моментів, а отже $N = n$.

Тоді розрахунок вейвлет-фільтра Добеші обумовлюється пошуком коефіцієнтів многочлена

$$P_k = \frac{\prod_{i=-N+1}^N \left(\frac{1}{2} - i\right)}{\prod_{i=-N+1}^N (k - i)}, \quad k = 1, \dots, N,$$

які для всіх значень $k \neq i$ утворюють вектор

$$P = (P_N \ 0 \ P_{N-1} \ 0 \ \dots \ 0 \ P_1 \ 1 \ P_1 \ 0 \ P_2 \ 0 \ \dots \ 0 \ P_N),$$

довжиною $4N - 1$.

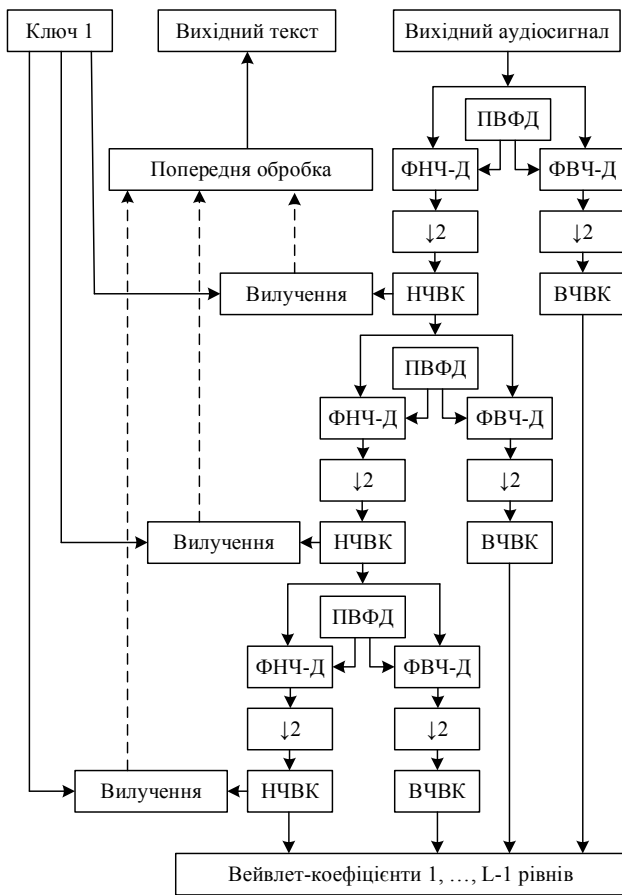


Рис. 3. Структурна схема вилучення текстової інформації із аудіосигналу на основі вейвлет-фільтрів Добеші

Тоді вектор коефіцієнтів многочлена P перетворюється на наступну форму

$$P = \begin{pmatrix} P_2 & P_3 & \dots & P_{4N-1} \\ P_1 & P_1 & \dots & P_1 \end{pmatrix},$$

довжиною $L = 4N - 2$.

Сформуємо квадратну матрицю A порядку L

$$A_L = \begin{pmatrix} -P_1 & -P_2 & \dots & -P_{L-1} & -P_L \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix},$$

де перший рядок матриці A_L визначає коефіцієнти характеристичного рівняння, що має вигляд

$$\lambda^L - P_1\lambda^{L-1} - P_2\lambda^{L-2} - \dots - P_{L-1}\lambda - P_L = 0,$$

де корені $\lambda_1, \dots, \lambda_L$ цього рівняння будуть власними значеннями матриці A_L . Порядок квадратної матриці A_L завжди кратний двом так як $L = 4N - 2$.

Вирішуючи дане рівняння одним із чисельних методів (методом половинного поділу, комбінованим, ітерацій та ін.), знаходимо корені

$\lambda_1, \dots, \lambda_L$ цього рівняння і таким чином утворюється вектор λ власних значень матриці A_L

$$\lambda = (\lambda_1 \dots \lambda_L).$$

Отже, маючи попередньо сформований вектор значень коренів $\lambda_1, \dots, \lambda_L$ многочлена, обчислимо вектор значень коефіцієнтів цього многочлена згідно виразу

$$P_k = P_k - \lambda_j P_i,$$

де у випадках, коли $j=1, \dots, J$, тоді $k=2, \dots, j+1$, $i=1, \dots, j$, а початкові значення коефіцієнтів відповідають вектору

$$P = (P_1 \ P_2 \ \dots \ P_{J+1}),$$

довжиною $J+1 = 2N$, де $P_1 = 1$, $P_2, \dots, P_{J+1} = 0$.

Нормування коефіцієнтів породжувального вейвлет-фільтра Добеші n -го порядку здійснюється наступним чином

$$P_k = S_p \frac{P_k}{\sum_{k=1}^{2N} P_k},$$

де $k=1, \dots, 2N$, формуючи результуючий вектор нормованих коефіцієнтів

$$P = (P_1 \ \dots \ P_{2N}),$$

таким чином, що сума коефіцієнтів $\sum_{k=1}^{2N} P_k$ дорівнюватиме S_p , тобто якщо $S_p = 1$, то $\sum_{k=1}^{2N} P_k = 1$.

Отже, на виході вищевикладених перетворень отримуємо вектор значень коефіцієнтів породжувального вейвлет-фільтра Добеші n -го порядку, де надалі застосовується процедура нормування [14].

Виходячи з проведеного аналізу існуючих публікацій, в якості похідних значень коефіцієнтів вейвлет-фільтра Добеші P , у завданні стеганографічної обробки аудіосигналів з метою приховання текстової інформації доцільно використовувати породжувальну вейвлет-функцію Добеші, не нижче 12-го порядку, тобто $N = 12$.

Нижче зображені знайдені за вищевикладеним алгоритмом коефіцієнти породжувального вейвлет-фільтра Добеші 16-го порядку та його кумулятивні суми квадратів коефіцієнтів (рис. 4).

Зверніть увагу, як швидко зростає кумулятивна сума фільтра Добеші (рис. 4б). Це тому, що його енергія зосереджена на малих абсцисах. Оскільки вейвлет Добеші має екстремальну фазу, кумулятивна сума його квадратів коефіцієнтів зростає зі стрімкою швидкістю, що робить дане сімейство вейвлет-фільтрів привабливим для його використання в задачах обробки сигналів [15].

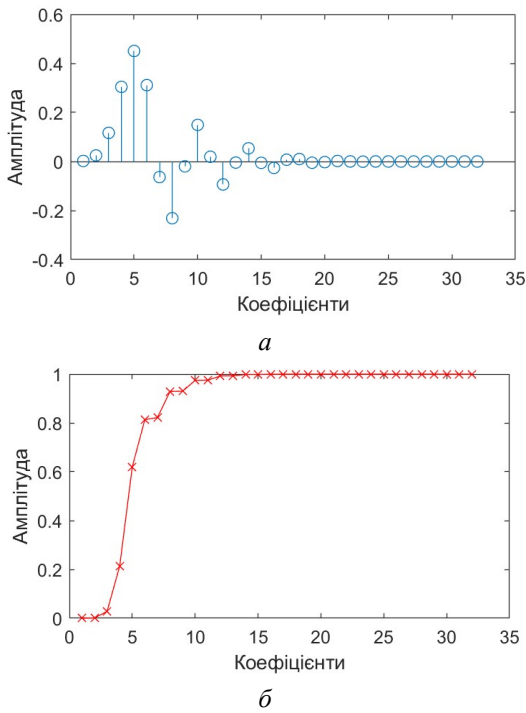
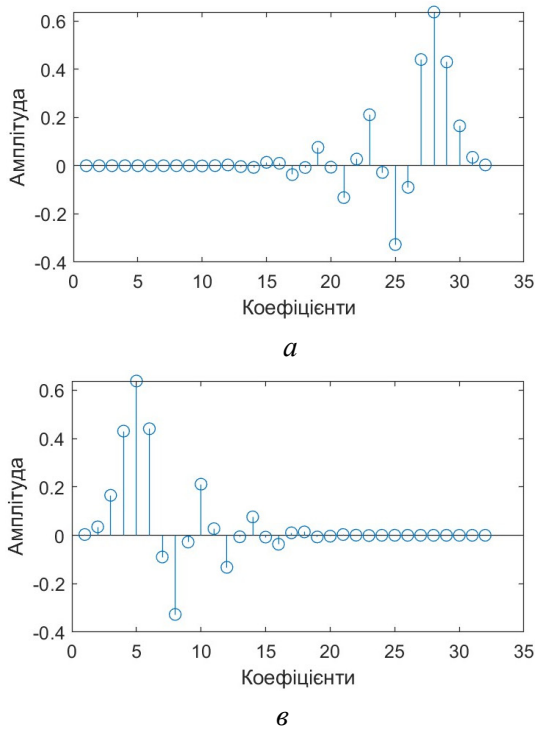


Рис. 4. Коефіцієнти породжувального вейвлет-фільтра Добеші 16-го порядку (а) та його кумулятивні суми квадратів коефіцієнтів (б)

Тоді розрахуємо коефіцієнти ортогональних вейвлет-фільтрів на базі значень коефіцієнтів породжувального вейвлет-фільтра Добеші n -го порядку, знайдених раніше.

Отже, коефіцієнти ортогонального вейвлет-фільтра Добеші низьких частот (ФНЧ-Р) для



оберненого дискретного вейвлет-перетворення визначаються таким чином

$$R = \sqrt{2} (P_1 \dots P_{2N}),$$

довжиною $2N$, тоді коефіцієнти ортогонального вейвлет-фільтра Добеші низьких частот (ФНЧ-Д) для прямого дискретного вейвлет-перетворення визначаються

$$D = (R_{2N} \dots R_1),$$

що відповідає інверсії коефіцієнтів R .

Коефіцієнти ортогонального вейвлет-фільтра Добеші високих частот (ФВЧ-Р) для оберненого дискретного вейвлет-перетворення визначаються обчисленням квадратурно-дзеркального фільтра наступним чином

$$W = (R_{2N} - R_{2N-1} \quad R_{2N-2} - R_{2N-3} \dots -R_4 \quad R_3 - R_2 \quad R_1),$$

тоді коефіцієнти ортогонального вейвлет-фільтра Добеші високих частот (ФВЧ-Д) для прямого дискретного вейвлет-перетворення визначаються

$$V = (W_{2N} \dots W_1),$$

що відповідає інверсії коефіцієнтів W .

Таким чином отримали вектори значень D і V , а також R і W , які відповідають коефіцієнтам ортогональних вейвлет-фільтрів Добеші низьких і високих частот для прямого та оберненого дискретного вейвлет-перетворення [16].

Як приклад зобразимо знайдені за вищевикладеним методом коефіцієнти ортогональних вейвлет-фільтрів на базі породжувального вейвлет-фільтра Добеші 16-го порядку (рис. 5).

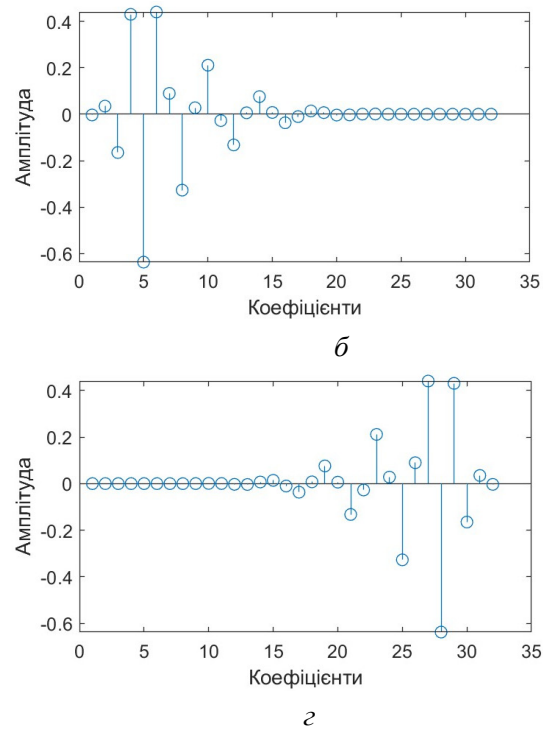


Рис. 5. Коефіцієнти ортогональних вейвлет-фільтрів Добеші 16-го порядку (а) – фільтр декомпозиції нижніх частот (ФНЧ-Д); (б) – фільтр декомпозиції високих частот (ФВЧ-Д), (в) – фільтр реконструкції нижніх частот (ФНЧ-Р), (г) – фільтр реконструкції високих частот (ФВЧ-Р)

Тоді пряме дискретне вейвлет-перетворення на основі базису Добеші є ні чим іншим як математичною згортою значень досліджуваного аудіосигналу A довжиною L , зі знайденими раніше векторами значень коефіцієнтів ортогональних вейвлет-фільтрів Добеші низьких і високих частот D і V , відповідно, з подальшим двократним проріджуванням $\downarrow 2$ коефіцієнтів отриманих після операції згортки, отримуючи таким чином вектор значень коефіцієнтів Z , що містить низькочастотну складову і вектор значень Y , який відповідає високочастотній складовій досліджуваного аудіосигналу A , де сформовані вектори значень коефіцієнтів Z , Y і є результатом цього перетворення [17].

Отже, операція математичної згортки значень досліджуваного аудіосигналу A зі значеннями коефіцієнтів ортогонального вейвлет-фільтра Добеші низьких та високих частот D і V відповідно, визначається наступними виразами

$$Z_k = \sum_{j=\max(1, k+1-2N)}^{\min(k, L)} A_j D_i,$$

$$Y_k = \sum_{j=\max(1, k+1-2N)}^{\min(k, L)} A_j V_i,$$

де $k=1, \dots, L+2N-1$, $i=k+1-j$.

Тоді розрахувавши значення коефіцієнтів згортки $Z_{1, \dots, K}$ і $Y_{1, \dots, K}$, потрібно провести операцію двократного прорідження $\downarrow 2$, згідно виразів

$$Z = (Z_2 \quad Z_4 \quad Z_6 \quad \dots \quad Z_K),$$

$$Y = (Y_2 \quad Y_4 \quad Y_6 \quad \dots \quad Y_K),$$

де $K = L + 2N - 1$.

Таким чином, знайдені вектора значень вейвлет-коефіцієнтів Z і Y визначають низькочастотну (НЧВК) та високочастотну (ВЧВК) складову прямого дискретного вейвлет-перетворення відповідно до базису Добеші досліджуваного аудіосигналу A .

Тоді вектора значень коефіцієнтів Z і Y є результатом одного рівня прямого дискретного вейвлет-перетворення на основі базису Добеші, що можна записати у такому вигляді

$$\Omega = (Z_1 \quad \dots \quad Z_Q \quad Y_1 \quad \dots \quad Y_Q),$$

де $Q = \frac{K}{2}$, тоді

$$\Omega = (\Omega_1 \quad \dots \quad \Omega_{2Q}),$$

довжиною $2Q$.

Щоб відтворити досліджуваний аудіосигнал A по значеннях вейвлет-коефіцієнтів $Z_{1, \dots, Q}$ і $Y_{1, \dots, Q}$, потрібно провести операцію двократного перевищення $\uparrow 2$ коефіцієнтів, відповідно до виразів

$$Z = (Z_1 \quad 0 \quad Z_2 \quad 0 \quad Z_3 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \quad Z_{2Q-1}),$$

$$Y = (Y_1 \quad 0 \quad Y_2 \quad 0 \quad Y_3 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \quad Y_{2Q-1}),$$

довжиною $2Q-1$.

Тоді обернене дискретне вейвлет-перетворення на основі базису Добеші визначається відповідно до виразу

$$A_k = \sum_{j=\max(1, k+1-2N)}^{\min(k, 2Q-1)} Z_j R_i + \sum_{j=\max(1, k+1-2N)}^{\min(k, 2Q-1)} Y_j W_i,$$

де $k=1, \dots, 2Q-1+2N-1$, $i=k+1-j$.

Даний вираз можна охарактеризувати як суму двох математичних згорток значень вейвлет-коефіцієнтів $Z_{1, \dots, 2Q-1}$ і $Y_{1, \dots, 2Q-1}$ з коефіцієнтами ортогональних вейвлет-фільтрів Добеші низьких та високих частот $R_{1, \dots, 2N}$ і $W_{1, \dots, 2N}$, відповідно [18].

Звідки визначимо значення $A_{1, \dots, L}$ згідно виразу:

$$A = (X_{2N-1} \quad \dots \quad X_{2N-2+L}),$$

тоді отримаємо вектор

$$A' = (X_1 \quad \dots \quad X_L),$$

довжиною L , який є результатом оберненого дискретного вейвлет-перетворення на основі базису Добеші, тобто значення вектора A' – результат процесу відтворення значень досліджуваного аудіосигналу A за значеннями вейвлет-коефіцієнтів $Z_{1, \dots, Q}$ і $Y_{1, \dots, Q}$.

Оскільки текстова інформація $Tbn_{1, \dots, b}$ має бути відсортована від мінімальних \min до максимальних \max значень відповідно до виразу

$$\left\{ \min(T_{Key1}), \dots, \dots, \dots, \max(T_{Key1}) \right\},$$

то для знаходження індексів значень (Ключ 1) низькочастотних вейвлет-коефіцієнтів $Z(1)_{1, \dots, K/2}$, які мають бути замінені

\rightarrow на відповідний блок текстової інформації Tbn_1 , також потрібно відсортувати

низькочастотні вейвлет-коефіцієнти $Z(1)_{1, \dots, K/2}$ від мінімальних \min до максимальних \max значень відповідно до виразу

$$\left\{ \min(|Z(1)_{1, \dots, K/2}|), \dots, \dots, \max(|Z(1)_{1, \dots, K/2}|) \right\},$$

та визначити індекси

$Key1_{1,\dots,l_b}$ абсолютних мінімальних значень $1, \dots, l_b$, що можна записати наступним чином

$$Key1_{1,\dots,l_b} = \left\{ \min \left(\left| Z(1)_{1,\dots,K/2} \right| \right), \dots, \max \left(\left| Z(1)_{1,\dots,K/2} \right| \right) \right\}_{1,\dots,l_b},$$

де l_b – кількість символів в одному блоці текстової інформації $Tbn_{1,\dots,b}$.

Тоді операції інтегрування \rightarrow текстової інформації Tbn_1 в низькочастотні вейвлет-коефіцієнти $Z(1)_{1,\dots,K/2}$ (рис. 2) та вилучення текстової інформації Tbn_1 з низькочастотних вейвлет-коефіцієнтів $Z(1)_{Tbn_1}$ (рис. 3) можна записати наступним чином

$$Z(1)_{Tbn_1} = Tbn_1 \rightarrow Z(1)_{1,\dots,K/2} (Key1_{1,\dots,b}),$$

$$Tbn_1 = Z(1)_{Tbn_1} (Key1_{1,\dots,b}),$$

де $Key1_{1,\dots,b}$ – послідовність індексів абсолютних мінімальних значень низькочастотних вейвлет-коефіцієнтів $Z(1)_{1,\dots,K/2}$, яка була сформована відповідно до умови $\left\{ \min \left(\left| Z(1)_{1,\dots,K/2} \right| \right), \dots, \max \left(\left| Z(1)_{1,\dots,K/2} \right| \right) \right\}_{1,\dots,b}$, що відповідає Ключу 1 на рис. 2 та рис. 3.

Ця операція потрібна для того, щоб відбувалася заміна \rightarrow абсолютних мінімальних значень низькочастотних вейвлет-коефіцієнтів $Z(1)_{1,\dots,l_b}$ на мінімальні значення текстової інформації Tbn_{1,\dots,l_b} , що можна формалізувати наступним співвідношенням

$$Z(1)_{Tbn_1} = \left\{ Tbn_{1,\dots,l_b} \rightarrow Z(1)_{1,\dots,l_b}, Z(1)_{l_b+1}, \dots, Z(1)_{K/2} \right\},$$

де

$$Z(1)_{1,\dots,K/2} = \left\{ \min \left(\left| Z(1)_{1,\dots,K/2} \right| \right), \dots, \max \left(\left| Z(1)_{1,\dots,K/2} \right| \right) \right\}_{1,\dots,K/2}.$$

Такий підхід дозволить забезпечити менше спотворення аудіосигналу An_{1,\dots,l_A} при його зворотному відновленні An'_{1,\dots,l_A} за вейвлет-коефіцієнтами $Z(1)_{1,\dots,K/2}$ і $Y(1)_{1,\dots,K/2}$, оскільки і аудіосигнал An_{1,\dots,l_A} і текстова інформація Tbn_{1,\dots,l_b} знаходяться в одній шкалі нормування, а саме від 0 до 1, що дозволяє співвіднести їхню абсолютну потужність.

Тоді операцію рекурсивного інтегрування \rightarrow всіх блоків текстової інформації $Tbn_{1,\dots,b}$ в низькочастотні вейвлет-коефіцієнти $Z(1, \dots, L-1)_{1,\dots,K/2}$ на всіх $1, \dots, L-1$ рівнях вейвлет-розкладання аудіосигналу An_{1,\dots,l_A} з подальшим їх скалярним добутком із

низькочастотним D_i та високочастотним V_i ортогональними вейвлет-фільтрами Добеші декомпозиції (рис. 2) можна записати наступним чином

$$Z(1)_{1,\dots,K/2} = \left(\sum_{j=\max(1, k+1-l_F)}^{\min(k, l_A)} (An_{1,\dots,l_A})_j D_i \right)_{1,\dots,K} \downarrow 2,$$

$$Y(1)_{1,\dots,K/2} = \left(\sum_{j=\max(1, k+1-l_F)}^{\min(k, l_A)} (An_{1,\dots,l_A})_j V_i \right)_{1,\dots,K} \downarrow 2,$$

де $K = l_A + l_F - 1$, $k = 1, \dots, K$, $i = k + 1 - j$,

$$Z(1, \dots, L-1)_{Tbn_{1,\dots,b}} = Tbn_{1,\dots,b} \rightarrow Z(1, \dots, L-1)_{1,\dots,K/2} (Key1_{1,\dots,b}),$$

$$Z(2, \dots, L)_{1,\dots,K/2} =$$

$$= \left(\sum_{j=\max(1, k+1-l_F)}^{\min(k, l_{Z(1,\dots,L-1)})} (Z(1, \dots, L-1)_{Tbn_{1,\dots,b}})_j D_i \right)_{1,\dots,K} \downarrow 2,$$

$$Y(2, \dots, L)_{1,\dots,K/2} =$$

$$= \left(\sum_{j=\max(1, k+1-l_F)}^{\min(k, l_{Z(1,\dots,L-1)})} (Z(1, \dots, L-1)_{Tbn_{1,\dots,b}})_j V_i \right)_{1,\dots,K} \downarrow 2,$$

де $K = l_{Z(1,\dots,L-1)} + l_F - 1$, $k = 1, \dots, K$, $i = k + 1 - j$,

$$Key1_{1,\dots,b} = \left\{ \min \left(\left| Z(1, \dots, L-1)_{1,\dots,K/2} \right| \right), \dots, \max \left(\left| Z(1, \dots, L-1)_{1,\dots,K/2} \right| \right) \right\}_{1,\dots,b l_b},$$

$Z(1, \dots, L)_{1,\dots,K/2}$ і $Y(1, \dots, L)_{1,\dots,K/2}$ – низькочастотні та високочастотні вейвлет-коефіцієнти для $1, \dots, L$ рівнів розкладання аудіосигналу An_{1,\dots,l_A} , $Z(1, \dots, L-1)_{Tbn_{1,\dots,b}}$ – низькочастотні вейвлет-коефіцієнти $1, \dots, L-1$ рівнів розкладання з інтегрованими \rightarrow блоками текстової інформації $Tbn_{1,\dots,b}$ відповідно до $Key1_{1,\dots,b} = \{Key1_1, Key1_2, \dots, Key1_b\}_{1,\dots,b l_b}$.

Тоді щоб реконструювати аудіосигнал An'_{1,\dots,l_A} з інтегрованим \rightarrow у нього текстом $Tbn_{1,\dots,b}$ (рис. 2), потрібно провести операцію двократного перевищення $\uparrow 2$ низькочастотних $Z(1, \dots, L-1)_{Tbn_{1,\dots,b}}$, $Z(L)_{1,\dots,K/2}$ та високочастотних $Y(1, \dots, L)_{1,\dots,K/2}$ вейвлет-коефіцієнтів з подальшою сумою результатів їх скалярних добутків з коефіцієнтами ортогональних вейвлет-фільтрів Добеші реконструкції низьких R та високих W частот для кожного $1, \dots, L$ рівня вейвлет-розкладання, згідно до виразу:

$$An'_{1,\dots,l_A} = \left(\left(\sum_{j=\max(1, k+1-l_F)}^{\min(k, 2l_{Z(1,\dots,L-1)}-1)} \left(Z(1,\dots,L-1)_{Tbn_{1,\dots,b}} \uparrow 2 \right)_j R_i \right)_{1,\dots,K} + \left(\sum_{j=\max(1, k+1-l_F)}^{\min(k, 2l_{Z(1,\dots,L-1)}-1)} \left(Y(1,\dots,L-1)_{1,\dots,K/2} \uparrow 2 \right)_j W_i \right)_{1,\dots,K} \right) + \left(\left(\sum_{j=\max(1, k+1-l_F)}^{\min(k, 2l_{Z(L)}-1)} \left(Z(L)_{1,\dots,K/2} \uparrow 2 \right)_j R_i \right)_{1,\dots,K} + \left(\sum_{j=\max(1, k+1-l_F)}^{\min(k, 2l_{Z(L)}-1)} \left(Y(L)_{1,\dots,K/2} \uparrow 2 \right)_j W_i \right)_{1,\dots,K} \right),$$

де $K = 2l_{Z(1,\dots,L)} - 1 + l_F - 1$, $k = 1, \dots, K$, $i = k + 1 - j$.

Тоді операцію рекурсивного вилучення всіх блоків текстової інформації $Tbn_{1,\dots,b}$ з низькочастотних вейвлет-коефіцієнтів $Z(1,\dots,L-1)_{Tbn_{1,\dots,b}}$ на всіх $1, \dots, L-1$ рівнях вейвлет розкладання аудіосигналу An'_{1,\dots,l_A} (рис. 3) можна представити наступним чином

$$Z(1)_{Tbn_1} = \left(\sum_{j=\max(1, k+1-l_F)}^{\min(k, l_A)} \left(An'_{1,\dots,l_A} \right)_j D_i \right)_{1,\dots,K} \downarrow 2,$$

де $K = l_A + l_F - 1$, $k = 1, \dots, K$, $i = k + 1 - j$,

$$Tbn_{1,\dots,b} = Z(1,\dots,L-1)_{Tbn_{1,\dots,b}} (Key1_{1,\dots,b}),$$

$$Z(2,\dots,L-1)_{Tbn_{2,\dots,b}} =$$

$$= \left(\sum_{j=\max(1, k+1-l_F)}^{\min(k, l_{Z(1,\dots,L-2)})} \left(Z(1,\dots,L-2)_{Tbn_{1,\dots,b-1}} \right)_j D_i \right)_{1,\dots,K} \downarrow 2,$$

де $K = l_{Z(1,\dots,L-2)} + l_F - 1$, $k = 1, \dots, K$, $i = k + 1 - j$,

$$Key1_{1,\dots,b} = \{Key1_1, Key1_2, \dots, Key1_b\}_{1,\dots,b_b}.$$

Висновки

Розроблений метод рекурсивної низькочастотної інтеграції текстової інформації в стеганографічний аудіоконтейнер на основі вейвлет-фільтрів Добеші підвищує стійкість стеганосистеми до стиснення стеганокодованого аудіосигналу за умови збереження цілісності текстової інформації, враховуючи при цьому особливості психофізіологічної моделі сприйняття звуку.

Отримані в цьому науковому дослідженні результати можуть бути використані для побудови систем приховування текстової інформації в аудіофайлі, але на відміну від існуючих методів, розроблений метод реалізує запропонований підхід скалярного добутку низькочастотного фільтра Добеші з вейвлет-коефіцієнтами, де вже інтегровані блоки текстової інформації, таким чином, відбувається збільшення середньої потужності низькочастотних вейвлет-коефіцієнтів та разом з ними збільшення потужності нормованих ASCII кодів текстової інформації.

Потрібно зауважити, що оптимальний вибір породжувальної вейвлет-функції і кількості

рівнів вейвлет-розкладання є не тривіальними завданнями, так як аудіосигнал є нестационарним процесом і передбачити зміни його спектральної складової в часі не представляється можливим. Тому на практиці рекомендується використовувати найбільш гладкі вейвлет-функції з великою кількістю нульових моментів (порядок функції) та якомога більше рівнів розкладання, максимальна кількість яких визначається через енергію досліджуваного сигналу та вейвлет-функції. Це дозволить зробити вейвлет-спектр аудіосигналу найбільш придатним для інтегрування текстової інформації.

Також слід зазначити, що такий підхід несе більше спотворень у сигнал, ніж існуючі, але якщо використовувати аудіосигнал з великим бітрейтом, то на виході ми отримаємо сигнал з невідмінною якістю від вхідного сигналу, і як було сказано вище, збільшимо стійкість до навмисного або ненавмисного стиснення вихідного аудіосигналу. Слід зазначити ще один недолік запропонованого методу, це те, що кількість інформації, яка може бути інтегрована з рівними показниками якості аудіосигналу, буде істотно меншою ніж у існуючих підходах, враховуючи той факт, що помилка зростатиме з кожним наступним рівнем вейвлет-розкладання. Тому потрібно підкреслити, що цей підхід буде дуже ефективний, якщо приховувати в аудіоконтейнері невеликий об'єм даних, тобто зі зростанням об'єму текстової інформації, яка має бути інтегрована в аудіосигнал, буде зменшуватися ефективність цього підходу. Але все ж таки, якщо потрібно приховати невеликий об'єм даних, то даних підхід буде в рази ефективніший за існуючі. Конкретну кількісну оцінку, при якій даний метод буде неефективним, автори планують розглянути в наступних наукових дослідженнях.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] P. N. Basu and T. Bhowmik, "On Embedding of Text in Audio A Case of Steganography," 2010 International Conference on Recent Trends in Information, Telecommunication and Computing, 2010, pp. 203-206, doi: 10.1109/ITC.2010.16.
- [2] S. B. Sadkhan, A. A. Mahdi and R. S. Mohammed, "Recent Audio Steganography Trails and its

- Quality Measures,” *2019 First International Conference of Computer and Applied Sciences (CAS)*, 2019, pp. 238–243, doi: 10.1109/CAS47993.2019.9075778.
- [3] S. Ahani, S. Ghaemmaghami and Z. J. Wang, “A Sparse Representation-Based Wavelet Domain Speech Steganography Method,” in *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 23, no. 1, pp. 80–91, Jan. 2015, doi: 10.1109/TASLP.2014.2372313.
- [4] Q. Liu, A. H. Sung and M. Qiao, “Temporal Derivative-Based Spectrum and Mel-Cepstrum Audio Steganalysis,” in *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 4, no. 3, pp. 359–368, Sept. 2009, doi: 10.1109/TIFS.2009.2024718.
- [5] M. Anwar, M. Sarosa and E. Rohadi, “Audio Steganography Using Lifting Wavelet Transform and Dynamic Key,” *2019 International Conference of Artificial Intelligence and Information Technology (ICAIT)*, 2019, pp. 133–137, doi: 10.1109/ICAIT.2019.8834579.
- [6] T. Narasimmalou and J. R. Allen, “Optimized discrete wavelet transform based steganography,” *2012 IEEE International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT)*, 2012, pp. 88–91, doi: 10.1109/ICACCCT.2012.6320747.
- [7] P. M. Kumar and K. Srinivas, “Real Time Implementation of Speech Steganography,” *2019 International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*, 2019, pp. 365–369, doi: 10.1109/ICSSIT46314.2019.8987785.
- [8] V. Varuikhin and A. Levina, “Steganographic Information Hiding Method Based on Double Wavelet Transform,” *2022 11th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, 2022, pp. 1–5, doi: 10.1109/MECO55406.2022.9797168.
- [9] E. Emad, A. Safey, A. Refaat, Z. Osama, E. Sayed and E. Mohamed, “A secure image steganography algorithm based on least significant bit and integer wavelet transform,” in *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 29, no. 3, pp. 639–649, June 2018, doi: 10.21629/JSEE.2018.03.21.
- [10] W. Jang and W. Lee, “Detecting Wireless Steganography With Wavelet Analysis,” in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 2, pp. 383–386, Feb. 2021, doi: 10.1109/LWC.2020.3032032.
- [11] K. Zhiweil, L. Jing and H. Yigang, “Steganography based on wavelet transform and modulus function,” in *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 18, no. 3, pp. 628–632, Sept. 2007, doi: 10.1016/S1004-4132(07)60139-X.
- [12] R. J. Mstafa, K. M. Elleithy and E. Abdelfattah, “A Robust and Secure Video Steganography Method in DWT-DCT Domains Based on Multiple Object Tracking and ECC,” in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 5354–5365, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2691581.
- [13] O. Lavrynenko, G. Konakhovych and D. Bakhtiarov, “Method of voice control functions of the UAV,” *2016 4th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*, 2016, pp. 47–50, doi: 10.1109/MSNMC.2016.7783103.
- [14] D. Bakhtiarov, G. Konakhovych and O. Lavrynenko, “Protected system of radio control of unmanned aerial vehicle,” *2016 4th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*, 2016, pp. 196–199, doi: 10.1109/MSNMC.2016.7783141.
- [15] D. I. Bakhtiarov, G. F. Konakhovych and O. Y. Lavrynenko, “An Approach to Modernization of the Hat and COST 231 Model for Improvement of Electromagnetic Compatibility in Premises for Navigation and Motion Control Equipment,” *2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*, 2018, pp. 271–274, doi: 10.1109/MSNMC.2018.8576260.
- [16] O. Lavrynenko, A. Taranenko, I. Machalin, Y. Gabrousenko, I. Terentyeva and D. Bakhtiarov, “Protected Voice Control System of UAV,” *2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*, 2019, pp. 295–298, doi: 10.1109/APUAVD47061.2019.8943926.
- [17] R. Odarchenko, O. Lavrynenko, D. Bakhtiarov, S. Dorozhynskyi and V. A. O. Zharova, “Empirical Wavelet Transform in Speech Signal Compression Problems,” *2021 IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, 2021, pp. 599–602, doi: 10.1109/PICST54195.2021.9772156.
- [18] O. Lavrynenko, R. Odarchenko, G. Konakhovych, A. Taranenko, D. Bakhtiarov and T. Dyka, “Method of Semantic Coding of Speech Signals based on Empirical Wavelet Transform,” *2021 IEEE 4th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, 2021, pp. 18–22, doi: 10.1109/AICT52120.2021.9628985.

Лавриненко О. Ю., Бахтіяров Д. І., Голубничий О. Г., Жарова О. В.

МЕТОД РЕКУРСИВНОЇ НИЗЬКОЧАСТОТНОЇ ІНТЕГРАЦІЇ ТЕКСТОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ В СТЕГANOГРАФІЧНИЙ АУДІОКОНТЕЙНЕР НА ОСНОВІ ВЕЙВЛЕТ-ФІЛЬТРІВ ДОБЕШІ

Розроблений метод рекурсивної низькочастотної інтеграції текстової інформації в стеганографічний аудіоконтейнер на основі вейвлет-фільтрів Добеші набуває глибокого сенсу в умовах застосування зловмисником навмисних несанкціонованих маніпуляцій зі стеганокодованим аудіосигналом з метою спотворити вбудовану в нього текстову інформацію, тобто зробити її семантичні конструкції незрозумілими. Головною з таких маніпуляцій є застосування різних алгоритмів стиснення аудіосигналу, але не з метою прибрати його малоінформативні складові, які відповідно до людської психофізіологічної моделі сприйняття звуку знаходяться за порогом чутності, а з метою видалити приховану в аудіосигналі текстову інформацію шляхом навмисного введення спотворень. Відмінність розробленого методу від існуючих полягає в тому, що в існуючих методах стеганографічного приховування інформації на основі вейвлет-перетворення, текстова інформація зазвичай інтегрується у високочастотні вейвлет-коефіцієнти без скалярного добутку з вейвлет-фільтрами, а в розробленому методі пропонується використовувати рекурсивне вбудовування в низькочастотні вейвлет-коефіцієнти з подальшим скалярним добутком з ортогональними вейвлет-фільтрами Добеші низьких і високих частот, що дозволяє підвищити абсолютну спектральну потужність прихованої текстової інформації. Подальші дослідження показали, що розроблений метод суттєво підвищує стійкість стеганосистеми до навмисних або пасивних втручань з метою перекодування з меншою швидкістю передачі інформації, але при цьому забезпечується стовідсоткова цілісність текстової інформації на етапі її вилучення з аудіосигналу, при достатньо високих показниках якості його звучання.

Ключові слова: стеганографія; текстова інформація; вейвлет-перетворення; аудіосигнал; вейвлет-коефіцієнти.

Lavrynenko O., Bakhtiarov D., Holubnychyi O., Zharova O.

A METHOD OF RECURSIVE LOW-FREQUENCY INTEGRATION OF TEXT INFORMATION INTO A STEGANOGRAPHIC AUDIO CONTAINER BASED ON DAUBECHIES WAVELET FILTERS

The developed method of recursive low-frequency integration of text information into a steganographic audio container based on Daubechies wavelet filters acquires a deep meaning in the conditions of an attacker's use of deliberate unauthorized manipulations with a steganocoded audio signal with the aim of distorting the text information embedded in it, i.e. making its semantic structures unintelligible. The main of such manipulations is the application of various audio signal compression algorithms, but not with the aim of removing its uninformative components, which, according to the human psychophysiological model of sound perception, are beyond the threshold of hearing, and with the aim of removing the text information hidden in the audio signal by deliberately introducing distortions. The difference between the developed method and the existing ones is that in the existing methods of steganographic information hiding based on the wavelet transform, text information is usually integrated into high-frequency wavelet coefficients without scalar product with wavelet filters, and in the developed method, it is proposed to use recursive embedding in low-frequency wavelet coefficients with subsequent scalar product with orthogonal wavelet Daubechies filters of low and high frequencies, which allows to increase the absolute spectral power of the hidden text information. Further studies showed that the developed method significantly increases the resistance of the steganosystem to intentional or passive interventions for the purpose of recoding with a lower information transfer rate, but at the same time, one hundred percent integrity of the text information is ensured at the stage of its extraction from the audio signal, with sufficiently high sound quality indicators.

Keywords: steganography; text information; wavelet-transform; audiosignal; wavelet coefficients.

Стаття надійшла до редакції 16.02.2023 р.

Прийнято до друку 12.04.2023 р.