

Вибір стійких трансформант перетворення Уолша-Адамара для аудіостеганографічних методів

Михайло Валерійович Хименко^{1,†}, Артем Вікторович Соколов^{2,†}

¹Національний університет «Одеська політехніка», Україна, Одеса, 65044, проспект Шевченка, 1

²Національний університет «Одеська юридична академія», Україна, Одеса, 65009, Фонтанська дорога, 23

Анотація

Сучасний розвиток мультимедійних технологій актуалізує потребу у створенні стеганографічних методів, здатних забезпечити високу стійкість до атак та невиявність прихованої інформації. Особливу складність становить використання аудіосигналів як контейнерів, оскільки повторне кодування у форматах із втратами, зокрема MPEG3, призводить до значних спотворень вбудованих повідомлень. У роботі запропоновано підхід до визначення стійких компонент спектру на основі перетворення Уолша-Адамара, які мінімально змінюються в умовах компресії та можуть бути використані для прихованого вбудовування. Підхід ґрунтується на порівняльному аналізі трансформант аудіофайлів у форматі FLAC та їхніх закодованих варіантів із різними бітрейтами. На основі накопиченої статистики побудовано гістограми, що дозволило виділити найбільш стійкі позиції. Результати експериментів показали, що при довжині блоку $N=16$, трансформанти з індексами 8 та 12 є стабільними незалежно від параметрів кодування, а додатково при бітрейті 192 Кбіт/с стійкість демонструють індекси 0 та 4. Запропонований підхід формує теоретичну основу для розробки аудіостеганографічних методів із кодовим управлінням, які поєднуюватимуть високу надійність сприйняття, стійкість до компресії та обчислювальну ефективність.

Ключові слова

аудіостеганографія, кодове управління, перетворення Уолша-Адамара, стеганоповідомлення, стійкість до стиснення, MPEG3-компресія, трансформанти, інформаційна безпека

1. Вступ і постановка задачі

Сучасне розмаїття мультимедійного контенту відкриває широкі можливості для використання його як контейнера у стеганографічних системах. Разом із тим, ефективність таких систем визначається здатністю одночасно задовольняти низку обов'язкових і допоміжних вимог [1]. Ключовими серед них є надійність сприйняття (відсутність візуально чи акустично помітних змін контейнера, що могли б вказувати на наявність прихованої інформації) та стійкість до атак (неможливість вилучення чи модифікації повідомлення навіть за умов застосування спеціалізованих методів аналізу).

Проведений аналіз сучасних підходів виявив низку обмежень, притаманних як класичним, так і новітнім методам. Так, у [2] показано, що навіть незначні модифікації контейнера призводять до відчутних спотворень, що практично унеможлиблює застосування методу в умовах повторного стиснення мультимедійних даних при передаванні мережею. У [3] демонструється висока прихованість інформації, однак її досягнення потребує значних обчислювальних ресурсів, що обмежує практичне впровадження. Запропонований у [4] підхід сегментації аудіофайлів покращує ефективність вбудовування, проте вимагає індивідуального налаштування під конкретні сигнали, що знижує його універсальність. Метод [5], попри високу стійкість до спотворень, характеризується підвищеною ресурсомісткістю, що робить його малопридатним для мобільних і вбудованих систем.

*Corresponding author.

[†]These authors contributed equally.

✉ khymenko.6751259@stud.op.edu.ua (М. В. Хименко); radiosquid@gmail.com (А. В. Соколов)

🆔 0009-0004-2194-0488 (М. В. Хименко); 0000-0003-0283-7229 (А. В. Соколов)

Таким чином, жоден із проаналізованих методів не задовольняє в повному обсязі вимогам до сучасних стеганографічних систем, що актуалізує потребу у розробці нових підходів, орієнтованих на стійкість до стиснення та обчислювальну ефективність.

У стеганографії для цифрових зображень концепція кодового управління довела свою високу ефективність [6]: вона забезпечує надійність сприйняття, стійкість до стеганоаналізу та характеризується низькими обчислювальними витратами. Це робить метод надзвичайно привабливим і для аудіоконтейнерів, які широко використовуються у практиці прихованого передавання даних. Водночас на сьогодні бракує теоретичного підґрунтя для його адаптації до аудіосигналів: відсутні дослідження, які б визначали, у які саме компоненти спектру доцільно здійснювати вбудовування з урахуванням стійкості до атак.

Ключовим викликом є компресія з втратами, зокрема MPEG3, що суттєво спотворює вбудовані дані. Тому необхідним першим кроком є визначення трансформант перетворення Уолша-Адамара [7], які мінімально змінюються під час стиснення й можуть слугувати надійною основою для кодового управління. Формування такої бази відкриває можливості для створення адаптивних алгоритмів аудіостеганографії нового покоління, здатних поєднувати стійкість, невиявність і обчислювальну ефективність.

Метою даної роботи є визначення трансформант перетворення Уолша-Адамара, що забезпечуватимуть найбільшу стійкість до атак проти вбудованого повідомлення у аудіофайлах.

2. Алгоритм досліджень

Запропонований підхід ґрунтується на порівняльному аналізі спектральних представлень аудіосигналів до та після стиснення у форматі MPEG3. Для цього аудіоконтейнери у форматі без втрат розбиваються на блоки, до яких послідовно застосовується перетворення Уолша-Адамара. Ті самі блоки після компресії також піддаються перетворенню Уолша-Адамара, що дозволяє співставити отримані спектральні коефіцієнти. Подальший аналіз відхилень між вихідними та стисненими трансформантами дає змогу статистично оцінити, які саме компоненти сигналу є найбільш стійкими до впливу компресії. Акумуляування цих результатів упродовж усього набору даних та їх узагальнення у вигляді гістограм дозволяє виокремити пріоритетні трансформанти для вбудовування прихованої інформації. Таким чином, ідея методу полягає не у безпосередньому створенні нового алгоритму приховування, а у формуванні обґрунтованої бази стійких спектральних компонент, що можуть стати фундаментом для подальшої розробки аудіостеганографічних методів з кодовим управлінням.

Схема запропонованого алгоритму дослідження трансформант перетворення Уолша-Адамара показана на рис. 1.

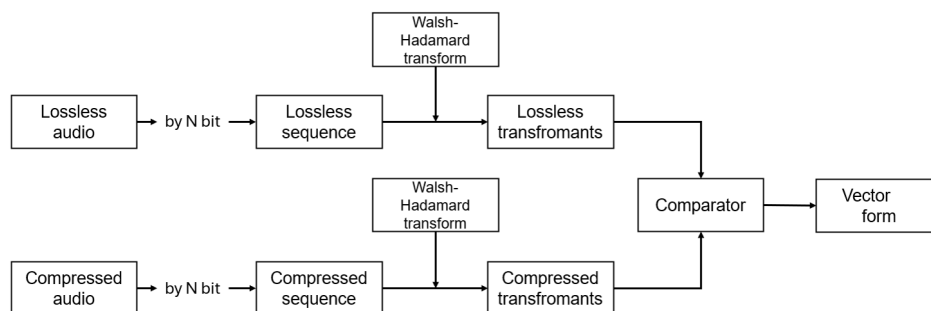


Рисунок 1: Схема розробленого алгоритму пошуку трансформант перетворення Уолша-Адамара, що зазнають найбільшого спотворення через стиснення.

3. Отримані результати дослідження

У проведеному дослідженні була реалізована поетапна процедура аналізу стійкості трансформант перетворення Уолша-Адамара до стиснення MPEG3 [8]. Для експериментів використовувалися оригінальні аудіофайли у форматі FLAC, які після цього піддавалися кодуванню у формат MPEG3 з різними бітрейтами. Далі обидва варіанти сигналів розбивалися на блоки фіксованої довжини, для яких обчислювалося перетворення Уолша-Адамара. На основі порівняння трансформант у вихідному та стисненому сигналах визначалися позиції, що зазнають найменших змін. Накопичена статистика узагальнювалася у вигляді гістограм, що відображають стійкість окремих трансформант до втрат під час компресії.

Як приклад, на рис. 2 представлено гістограму змін трансформант перетворення Уолша-Адамара для випадку стиснення з бітрейтом 192 Кбіт/с для довжини блоку $N=16$. Така візуалізація дозволяє наочно виділити індекси трансформант, які найменше пошкоджуються при компресії й можуть вважатися пріоритетними для прихованого вбудовування даних у задачах аудіостеганографії.

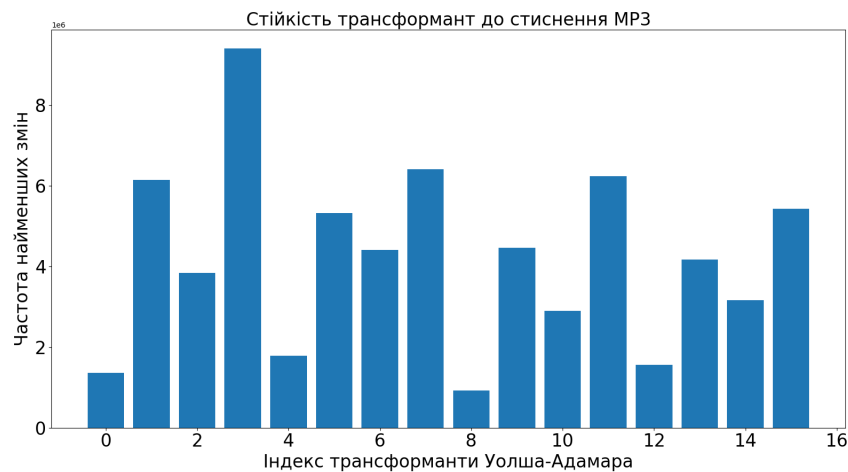


Рисунок 2: Зміни трансформант перетворення Уолша-Адамара у аудіофайлах при стисненні MPEG3 з бітрейтом 192 Кбіт/с для довжини блоку $N=16$

Аналіз даних рис. 2 показує, що найбільш стійкими до впливу стиснення MPEG3 трансформантами є позиції з індексами 8 та 12, які зберігають мінімальні зміни незалежно від параметрів кодування. Додатково, при зниженні бітрейту до 192 Кбіт/с достатню стабільність також демонструють трансформанти 0 та 4, що розширює можливості вибору для вбудовування прихованої інформації. Таким чином, саме ці трансформанти можуть вважатися оптимальними для практичного застосування у задачах аудіостеганографії.

4. Висновки

Відзначимо основні результати проведених досліджень:

1. Проведено системний аналіз стійкості трансформант перетворення Уолша-Адамара до стиснення MPEG3, що дозволило кількісно оцінити їхню придатність для завдань аудіостеганографії.

2. Встановлено, що найбільш стійкими незалежно від параметрів компресії є трансформанти з індексами 8 та 12, які зберігають мінімальні спотворення під час повторного кодування.

3. Додатково показано, що при зниженні бітрейту до 192 Кбіт/с стабільність зберігають також трансформанти 0 та 4, що розширює спектр можливих областей для прихованого вбудовування інформації.

4. Запропонований підхід формує теоретичну базу вибору стійких спектральних компонент, яка може стати фундаментом для побудови нових методів із кодовим управлінням.

5. Отримані результати створюють передумови для розробки адаптивних аудіостеганографічних систем нового покоління, що поєднують невиявність, стійкість до атак та обчислювальну ефективність.

Список джерел

- [1] А.А. Кобозева, В.А. Хорошко, Анализ информационной безопасности, К.: Изд. ГУИКТ, 2010.
- [2] K. Gopalan, Audio steganography using bit modification, in: Proceedings of International Conference on Multimedia and Expo, ICME'03, IEEE, 2003. Vol. 1. pp. I-629. doi: 10.1109/icme.2003.1220996
- [3] J. Li, K. Wang, X. Jia, A coverless audio steganography based on generative adversarial networks, Electronics 12,5 (2023) 1253. doi: 10.3390/electronics12051253
- [4] J. Wang, K. Wang, A novel audio steganography based on the segmentation of the foreground and background of audio, Computers and Electrical Engineering 123 (2025) 110026. doi: 10.1016/j.compeleceng.2024.110026
- [5] W. Su et al, Efficient audio steganography using generalized audio intrinsic energy with micro-amplitude modification suppression, IEEE Transactions on Information Forensics and Security 19 (2024) 6559-6572. doi: 10.1109/tifs.2024.3417268
- [6] A.A. Kobozeva, A.V. Sokolov, Robust Steganographic Method with Code-Controlled Information Embedding, Problemele energeticii regionale 4,52 (2021) 115-130. doi: 10.52254/1857-0070.2021.4-52.11
- [7] N. Ahmed, K. R. Rao, Walsh-Hadamard transform, Orthogonal transforms for digital signal processing (1975) 99-152.
- [8] S. Shlien, Guide to MPEG-1 audio standard, IEEE Transactions on Broadcasting 40, 4 (2002) 206-218.