

УДК 515.18 + 621.372.542

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ МЕТОД ЗБІЛЬШЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ПЕРЕДАВАННЯ ЦИФРОВИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

DOI: 10.33842/2313-125X-2026-29-168-174

Корчинський В.М., д-р. тех. наук,

korchins50k@i.ua, ORCID: 0000-0001-6621-0631

Груєнко А.С., аспірант *

gruenko96@gmail.com, ORCID: 0009-0006-2341-5083

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
(м. Дніпро, Україна)

Запропоновано метод збільшення достовірності передавання інформаційних сигналів по цифрових каналах зв'язку з адитивними завадами. Алгоритмічною основою пропонованого методу є подання сигналу у вигляді розкладу по одному з ортонормованих дискретних функціональних базисів (Уолша, Хартлі, дискретного косинусного, вейвлет) з наступним обмеженням кількості коефіцієнтів розкладу, оптимізованим за критеріями мінімізації інформаційної відстані між переданим та отриманим сигналами і максимізації відношення «сигнал/шум».

Реалізація пропонованого методу включає наступні етапи: діджиталізація (оцифрування) оброблюваного дискретизованого інформаційного сигналу з відліками, отриманими у послідовні моменти часу; обмеження кількості коефіцієнтів розкладу (компресія сигналу з частковою втратою інформативності) з наступною реконструкцією квантованого сигналу; фазова модуляція оцифрованим сигналом несучого синусоїдального сигналу із заданою частотою та швидкістю передачі.

Визначення порогів обмеження множини коефіцієнтів розкладів діджиталізованих сигналів сформульовано у вигляді оптимізаційної задачі досягнення наперед заданих значень інформаційної відстані між переданим та демодульованим сигналами й відношення сигнальних енергій демодульованого сигналу і залишкового шуму.

Для оцифрування використано алгоритм Ллойда, який забезпечує мінімізацію помилки діджиталізації.

Встановлено, що при збільшенні кількості цифрових рівнів діджиталізації оптимальні значення інформаційної відстані між переданим та демодульованим сигналами збільшується при зменшенні відношення «сигнал/шум».

* Науковий керівник – д-р техн. наук, професор Корчинський В.М.

Узагальнення методу на багатовимірні сигнали реалізована шляхом редукції вимірності на основі розгортки Пеано-Гільберта

Зіставлення різних дискретизованих функціональних базисів як основи для реалізації пропонованого методу показало найбільшу ефективність за зазначеними критеріями вейвдет-базису Daubechies четвертого порядку.

Ключові слова: дискретизований сигнал, ортонормований дискретний функціональний базис, багатоспектральне зображення, відношення «сигнал/шум».

Постановка проблеми. Необхідним елементом передавання сигналу по інформаційному каналу є модуляція (фазова, частотна тощо) цим сигналом несучого синусоїдального сигналу, для якої необхідне подання інформаційного сигналу у цифровій формі. Таке перетворення супроводжується неминучою помилкою, яка впливає на достовірність передачі. Іншими факторами, що визначають достовірність передачі, є частоти несучого сигналу та дискретизації інформаційного сигналу й швидкість передачі. У зв'язку з цим актуальна багатокритеріальна проблема максимізації достовірності передавання інформаційних сигналів довільної вимірності за умови збереження рівня інформативності, необхідного для їх достовірної інтерпретації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питанням збільшення достовірності передавання інформаційних сигналів по каналах зв'язку присвячена значна кількість досліджень (див. наприклад [1- 3]). Усі вони базуються на різних варіантах лінійної та нелінійної цифрової фільтрації сигналів. Відомі методи компресії інформаційних сигналів базуються на їх розкладі по одному з ортогональних дискретних функціональних базисів і розвинені лише для неоцифрованих сигналів [4, 5]. Питання, пов'язані з достовірністю передачі даних за такої компресії не розглядалися.

Формулювання цілей статті. Мета статті полягає у розробці методу збільшення достовірності передавання цифрових інформаційних сигналів (у тому числі багатовимірних), оптимального за критеріями мінімізації інформаційної відстані між вихідним та переданим сигналами і максимізації відношення «сигнал/шум».

Основна частина. Перший етап реалізації пропонованого методу полягає у діджиталізації (оцифрування) оброблюваного дискретизованого інформаційного сигналу $u(n)$ з відліками, отриманими у послідовні моменти часу. Для оцифрування використано алгоритм Ллойда [1], який забезпечує мінімізацію помилки діджиталізації з отриманням сигналу $U(n)$.

На наступному етапі здійснюється подання цифрового сигналу $U(n)$, відліки у вигляді розкладу по одному з ортонормованих дискретних функціональних базисів:

$$U(n) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k \cdot \varphi_k(n), \quad (1)$$

де N – кількість відліків; $\varphi_k(n)$ - базисні функції; c_k - коефіцієнти розкладу.

У випадку багатовимірного сигналу необхідна попередня редукція його розмірності шляхом лінійної розгортки Пеано-Гільберта [6].

Далі здійснюється обмеження кількості коефіцієнтів розкладу, починаючи з номеру K : $C_k = c_k$ при $k = 0, K$, $C_k = 0$ при $k \geq K$. Реконструкція цифрового сигналу за обмеженою кількістю коефіцієнтів розкладу реалізується оберненим перетворенням

$$\bar{U}(n) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} C_k \cdot \varphi_k(n). \quad (2)$$

Утвореним у такий спосіб сигналом $U(n)$ здійснюється фазова модуляція несучого синусоїдального сигналу із заданою частотою та швидкістю передачі.

Визначення порогу K обнуління коефіцієнтів розкладу (1) сформульовано як однопараметричну оптимізаційну задачу за критеріями мінімізації інформаційної відстані між переданим та отриманим після демодуляції сигналами і максимізації відношення «сигнал/шум», розв'язання якої отримано за алгоритмом `fgoalattain` [5].

За кількісну міру інформаційної відстані між інформаційними сигналами прийнято відносну ентропію Кульбака-Лейблера [4]

$$L(g \parallel g_r) = \int_X g(x) \cdot \log_2 \left[\frac{g(x)}{g_r(x)} \right] \cdot dx, \quad (3)$$

де $g(x)$, $g_r(x)$ - відповідно густини розподілів залежностей частот переданого $G(n)$ та отриманого демодульованого $G_r(n)$ сигналів.

Тестування запропонованого методу здійснювалося з використанням ортонормованих базисів Уолша, дискретного косинусного перетворення та вейвлет-базисів Daubechies.

На рис. 1 наведено динаміку демодульованого сигналу за використання вейвлет-базису Daubechies четвертого порядку при 32 рівнях діджиталізації та оптимальних значеннях відношення «сигнал/шум» 4.25 дБ та інформаційній відстані 3.87 біт.

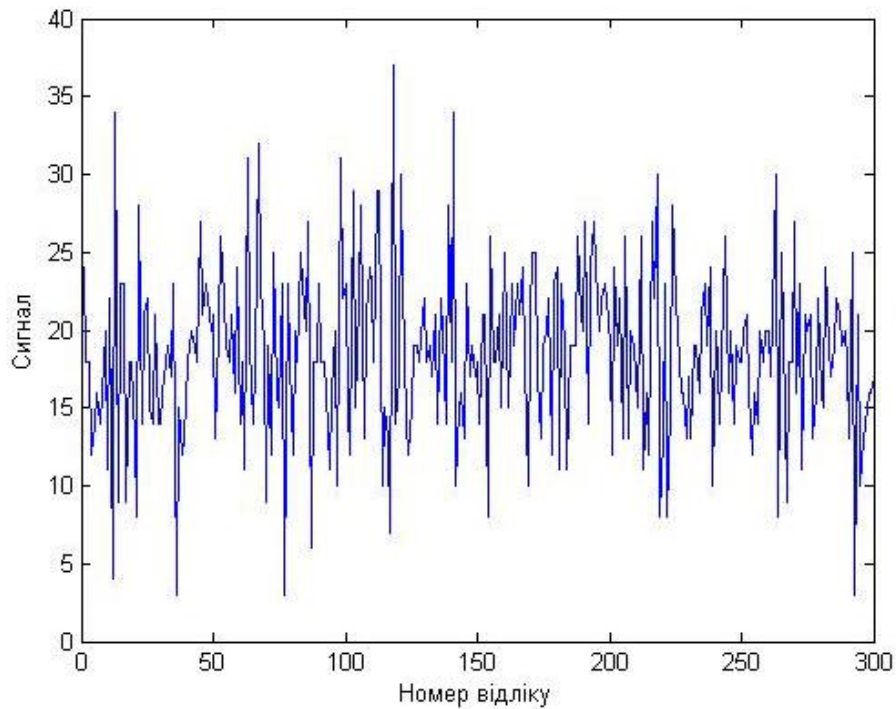


Рис. 1. Реконструйований сигнал з 32 рівнями квантування

На рис. 2-5 подані три зображення дистанційного зондування Землі, отримані у різних спектральних інтервалах проміння – носія видової інформації з суттєво різним просторовим розрізненням та адитивним гаусівським шумом.

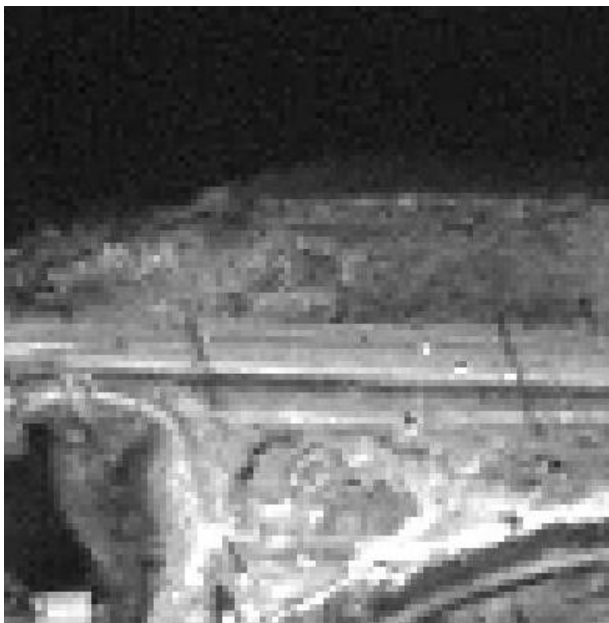


Рис. 2. Зображення спектрального каналу 0.45 мкм – 0.53 мкм

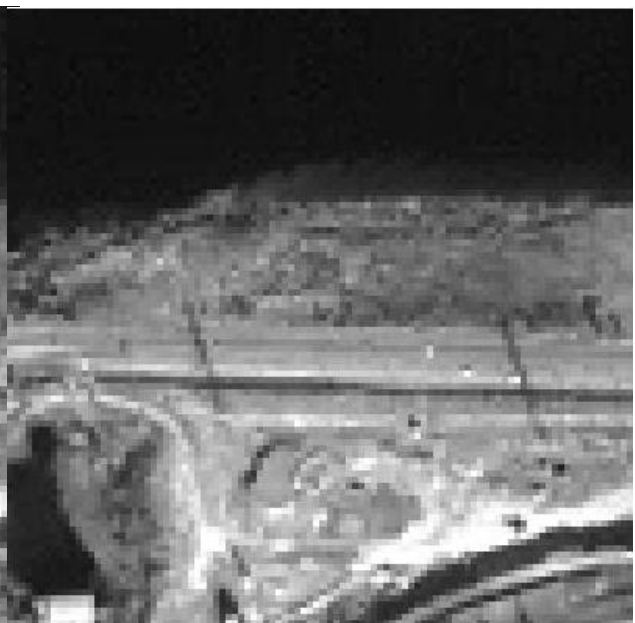


Рис.3. Зображення спектрального каналу 0.52 мкм – 0.61 мкм

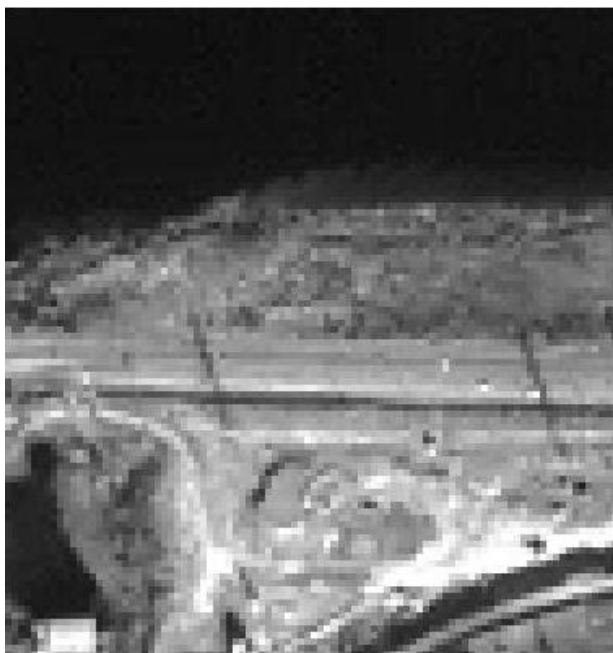


Рис. 4. Зображення спектрального каналу 0.64 мкм – 0.72 мкм

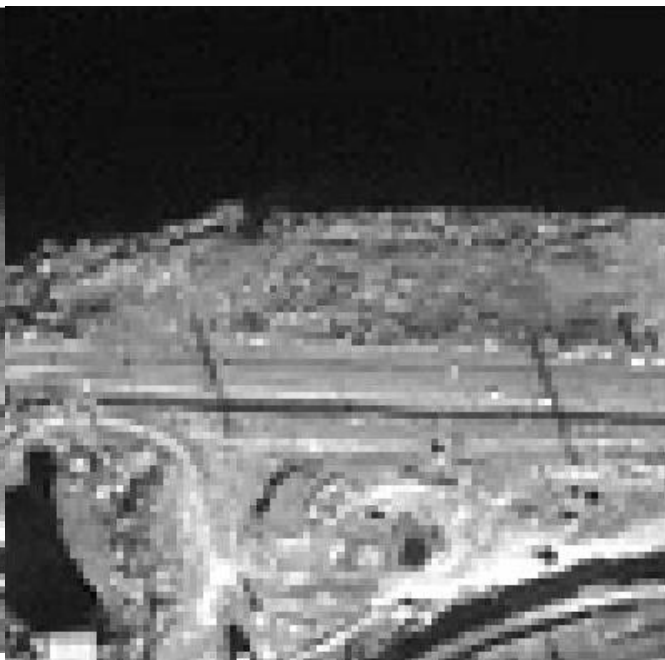


Рис.5. Зображення спектрального каналу 0.77 мкм – 0.88 мкм

На рис. 6 наведено реконструйоване зображення демодульованого двовимірного сигналу за використання вейвлет-базису Daubechies четвертого порядку при 256 рівнях діджиталізації та оптимальних значеннях відношення «сигнал/шум» 5.27 дБ та інформаційній відстані 1.25 біт.

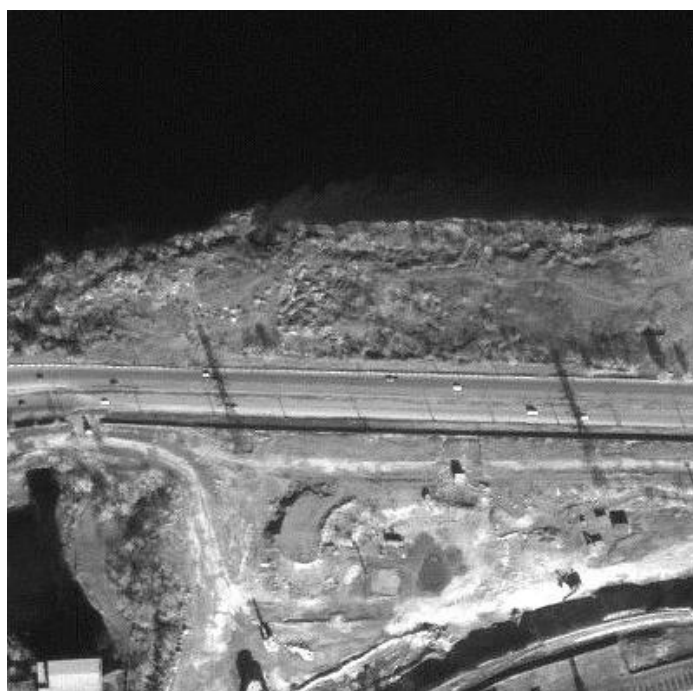


Рис. 6. Реконструйований двовимірний сигнал з 256 рівнями квантування

Слід відмітити, що на рівні візуального сприйняття відмінність зображень, утворених з використанням базисів Уолша, Хартлі та дискретного косинусного перетворення, несуттєва. Однак, в інформаційному відношенні та за характеристиками пригнічення шуму (збільшення SNR) найбільш ефективним виявилось перетворення Daubechies четвертого порядку.

Висновки. Запропоновано новий метод підвищення достовірності передавання цифрових інформаційних сигналів (у тому числі багатовимірних), оптимального за критеріями мінімізації інформаційної відстані між вихідним та переданим сигналами і максимізації відношення «сигнал/шум». Подальші дослідження за проблематикою статті будуть спрямовані на ідентифікацію інформаційних сигналів у системах електронних комунікацій.

Література

1. Sklar B. Digital Communications. Fundamentals and Applications. New Jersey: Prentice Hall PTR, 2009. 1074 p.
2. Корчинський В. Фільтрація завад багатоспектральних цифрових сигналів: оптимізаційний підхід. *Прикладні питання математичного моделювання*, 2023. Том 6, № 4. С. 93-99. <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2023-6-1-10>.
3. Корчинський В. Оптимізація пропускної здатності інформаційних каналів передачі растрових зображень. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського*. Серія: Технічні науки. 2024. Том 35(74). № 4. С. 33 -37. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/06>
4. Cover T.M., Thomas J.A. Elements of information theory. N.-Y.: John Wiley & Sons. 1991. 320 p.
5. Steur R.E. Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application. N.-Y.: John Wiley&Sons Inc., 1986. 546 p.
6. Sagan K. Space-Filling Curves. N.-Y.: Springer-Verlag. 1994. 352 p.

MULTI-CRITERION METHOD FOR INCREASING THE RELIABILITY OF TRANSMISSION OF DIGITAL INFORMATION SIGNALS

Volodymyr Korchynskyi, Artem Gruenko

A method for increasing the reliability of information signal transmission over digital communication channels with additive interference is proposed. The algorithmic basis of the proposed method is to represent the signal in the form of a decomposition according to one of the orthonormal discrete functional bases (Walsh, Hartley, discrete cosine, wavelet) with the subsequent limitation of the number of decomposition coefficients, optimized according to the criteria of minimizing the information distance between the transmitted and received signals and maximizing the signal/noise ratio.

The implementation of the proposed method includes the following stages: digitization (digitization) of the processed sampled information signal with samples obtained at consecutive points in time; limitation of the number of expansion coefficients (signal compression with partial loss of information content) with subsequent reconstruction of the quantized signal; phase modulation by the digitized signal of the carrier sinusoidal signal with a given frequency and transmission rate.

The determination of the thresholds for limiting the set of coefficients of the expansions of digitized signals is formulated as an optimization problem of achieving predetermined values of the information distance between the transmitted and demodulated signals and the ratio of the signal energies of the demodulated signal and the residual noise.

The Lloyds algorithm was used for digitization, which ensures minimization of the digitization error.

It is established that with an increase in the number of digital levels of digitization, the optimal values of the information distance between the transmitted and demodulated signals increase with a decrease in the signal-to-noise ratio.

The generalization of the method to multidimensional signals is implemented by reducing the dimensionality based on the Peano-Hilbert sweep

Comparison of various discretized functional bases as a basis for implementing the proposed method showed the greatest efficiency according to the specified criteria of the fourth-order Daubechies wavelet basis.

Keywords: discretized signal, orthonormalized discrete functional basis, multispectral image, signal-to-noise ratio.

References

1. Sklar, B. (2009). Digital communications: Fundamentals and applications. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1074 p. [In English].
2. Korchynskyi, V. (2023). Noise filtering of multispectral digital signals: an optimization approach. Prykladni pytannia matematychnoho modeliuвання, 6(4), 93–99. DOI: <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2023-6-1-10> [In Ukrainian].
3. Korchynskyi, V. (2024). Optimization of information channel throughput for raster image transmission. Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V. I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky, 35(74)(4), 33–37. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/06> [In Ukrainian].
4. Cover, T. M., & Thomas, J. A. (1991). Elements of information theory. New York: John Wiley & Sons, 320 p. [In English].
5. Steuer, R. E. (1986). Multiple criteria optimization: Theory, computation and application. New York: John Wiley & Sons Inc., 546 p. [In English].
6. Sagan, H. (1994). Space-filling curves. New York: Springer-Verlag, 352 p. [In English].

Матеріал надійшов до редакції 29.04.2026

Прийнято до друку 13.05.2026 р.