

Корчинський В.М.

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНИХ КАНАЛІВ ПЕРЕДАЧІ РАСТРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

У статті пропонується метод визначення пропускної здатності телекомунікаційних каналів з адитивним шумом при передачі растрових зображень, зафіксованих засобами дистанційного зондування у довільній кількості спектральних інтервалів електромагнітного проміння, оптимальної за інформаційним та енергетичним критеріями. Метод базується на компресії даних, оптимізованій за критеріями: 1) мінімізація інформаційної відстані Кульбака-Лейблера (Kullback-Leibler) між скомпресованим та вихідним сигналами; 2) максимізація відношення сигнальної енергії інформативного сигналу, збереженої у скомпресованому зображенні, до сигнальної енергії залишкового шуму (відношення «сигнал/шум»).

Компресія сигналів реалізована на основі розкладів їх розгортки Пеано-Гільберта по одному з дискретних ортогональних вейвлет-базисів та обнуленні частини коефіцієнтів розкладу.

Встановлено, що при збільшенні порогу обнулення відношення «сигнал/шум» зростає, а інформаційна відстань Кульбака-Лейблера між вихідним та скомпресованим інформаційними сигналами зменшується.

Визначення порогів обнулення, яке забезпечує компроміс між вимогами збільшення відношення «сигнал/шум» та мінімізації відстані Кульбака-Лейблера між вихідним та скомпресованим інформаційними сигналами сформульовано у вигляді двокритеріальної оптимізаційної задачі мінімізації відхилень відстані Кульбака-Лейблера скомпресованого інформаційного сигналу стосовно вихідного сигналу та відношення «сигнал/шум» у скомпресованому сигналі від наперед заданих значень. Використано метод розв'язання оптимізаційної задачі, який забезпечує можливість завдання коефіцієнтів значущості різних критеріїв оптимізації.

Показано, що за використання ортогональних вейвлет-базисів збільшення рівня вейвлет-декомпозиції веде до зростання як відношення «сигнал/шум» у реконструйованому сигналі, так й інформаційної відстані між ним та вихідним сигналом.

Встановлено, що при збільшенні порогу обнулення коефіцієнтів вейвлет-розкладів зростає пропускна здатність інформаційного каналу з обмеженою частотною смугою.

Ключові слова: пропускна здатність, інформаційна відстань, відношення «сигнал/шум», дискретний ортогональний вейвлет-базис, інформаційна відстань.

Постановка проблеми. Розглядаються процеси передавання зображень матеріальних об'єктів, отриманих засобами дистанційного зондування (ДЗ) у низці спектральних інтервалів електромагнітного проміння – носія видової інформації. Інформаційними сигналами ДЗ є розподіли власної яскравості візуалізованих об'єктів (або їхні відбивальні здатності) у відповідних спектральних інтервалах. На даний час найбільш поширеним способом отримання видових даних ДЗ є сканерний спосіб, за якого зображення фіксуються рядок за рядком лінійними масивами сенсорних елементів у різних інтервалах електромагнітного спектру в процесі руху цих, причому зв'язок між власною яскравістю об'єктів та розподілом яскравості отриманого зображення є лінійним [1, с. 142]. Після діджиталізації отриманих сигналів, формується множина растрових зображень у різних спектраль-

них інтервалах проміння, кожне з яких має окрему інформаційну значущість для тематичного аналізу власної яскравості як подання характеристик візуалізованих об'єктів. Ефективність передачі таких даних по інформаційному каналу з обмеженою частотною смугою за наявності каналних шумів суттєво залежить від обсягу даних, що передаються. Зазначимо, що з позицій прикладного тематичного аналізу отриманих видових даних використання множини зображень, отриманих в усій множині спектральних інтервалів, є надлишковим. Це зумовлює постановку двоєдиної проблеми оптимізації пропускної здатності каналу шляхом компресії вихідних багатоспектральних даних за критеріями мінімізації відмінності вихідного та отриманого сигналів й залишкового шуму за умови збереження рівня інформативності, достатнього для достовірного тематичного аналізу видових даних.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Основним шляхом зменшення інформаційної надлишковості первинних (вихідних) даних є їхня компресія. Питанням компресії інформаційних сигналів та пригнічення адитивних шумів на них присвячена значна кількість досліджень, у яких ці аспекти проблеми розглядалися окремо. Численні алгоритми фільтрації шумів базуються на різних варіантах лінійної та нелінійної обробки сигналів без зв'язку з їх компресією (див., наприклад [2, с. 614–724]).

Усі відомі методи компресії цифрових сигналів базуються на їх розкладі по одному з повних дискретних функціональних базисів [3, с. 120–172] або ортогональних вейвлет-базисів [4, с. 183–187]. Питання, пов'язані з перетворенням рівня завад за такої компресії не розглядалися.

Постановка завдання. Метою статті є розробка методу визначення пропускної здатності інформаційних каналів з адитивним шумом, оптимізованої за інформаційними та енергетичними критеріями.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сукупність растрових зображень, заданих на растрі розмірністю $n \times m$ пікселів та зафіксованих у s спектральних інтервалах, подаємо тривимірним масивом $\mathbf{P}_{n \times m \times s}$. Для редукації його розмірності використаємо метод, запропонований у роботі [5], який включає послідовно: 1) конкатенацію рядків $\mathbf{P}_{n \times m \times s}$, у результаті чого формується двовимірний масив $\mathbf{Q}_{n \times m \times s}$; 2) розгортку Пеано-Гільберта масиву $\mathbf{Q}_{n \times m \times s}$ з утворенням одновимірного дискретизованого масиву даних $G(n)$, $n = 0, N-1$, який розглядаємо як сигнал, який передається по інформаційному каналу з адитивним гаусівським шумом.

Використаємо його подання сигналу $G(n)$ у вигляді розкладу по одному з ортогональних вейвлет-базисів на j -му рівні декомпозиції:

$$G^{(j)}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k^{(j)} \cdot \phi_k^{(j)}(n) + \sum_{s=1}^{j-1} \sum_{k=0}^{N-1} d_k^{(s)} \cdot \psi_k^{(s)}(n), \quad (1)$$

де $\phi_k^{(j)}(n)$, $\psi_k^{(j)}(n)$ – відповідно масштабуючі та деталізуючі базисні функції вейвлет-базису.

Здійснимо обнуління частини деталізуючих коефіцієнтів розкладу (1), починаючи з номеру K : $D_k^{(s)} = d_k^{(s)}$ при $k = 0, K$, $D_k^{(s)} = 0$ при $k \geq K$. Відновлення скомпресованого сигналу здійснюється перетворенням, оберненим до (1).

Проблему відновлення інформаційних сигналів ДЗ розглядаємо у контексті інформаційної теорії вимірювань [6, с. 221–231].

Представимо формування розгортки Пеано-Гільберта отриманого сигналу в операторній формі:

$$\mathbf{P} = \mathbf{M} \cdot \Psi + \zeta, \quad (2)$$

де \mathbf{P} – вектор-стовпець відліків зафіксованого сигналу; Ψ – вектор-стовпець відліків скомпресованого первинного сигналу; \mathbf{M} – матриця, яка подає

оператор формування зафіксованого сигналу; ζ – вектор-стовпець відліків каналного шуму.

Здійснимо лінійне перетворення співвідношення (2) з матрицею \mathbf{R} розмірності $N \times N$, елементи якої задовольняють умові $\mathbf{P} \cdot \mathbf{M} = \mathbf{E}$, де \mathbf{E} – одинична матриця. У результаті отримуємо:

$$\mathbf{R} \cdot \Psi = \Psi + \mathbf{R} \cdot \zeta \quad (3)$$

тобто відновлюється розгортка Пеано-Гільберта первинного сигналу, на яку накладено залишковий шум $\mathbf{R} \cdot \zeta$.

Реконструкція інформаційного сигналу $G_r(n)$ (власної яскравості об'єктів, візуалізованих на зображенні) здійснюється перетворенням, оберненим до (1) з наступним оберненим відображенням Пеано-Гільберта.

За варіювання порогу обнуління коефіцієнтів вейвлет-розкладу K згідно з виразом (1) змінюються як пропускна здатність каналу передачі внаслідок зміни відношення «сигнал/шум» (SNR), так й інформаційна відмінність між відновленим та вихідним інформаційними сигналами, за міру якої приймаємо відстань (відносну ентропію) Кульбака-Лейблера [7]

$$L(g \parallel g_r) = \int_x g(x) \cdot \log_2 \left[\frac{g(x)}{g_r(x)} \right] \cdot dx, \quad (4)$$

де $g(x)$, $g_r(x)$ – відповідно густини розподілів залежностей частот первинного $G(n)$ та реконструйованого $G_r(n)$ сигналів.

Визначення порогу обнуління K формулюємо як однопараметричну двокритеріальну оптимізаційну задачу досягнення мети з цільовими функціями $F_1(K)$ – залежність від K відстані Кульбака-Лейблера між вихідним та відновленим сигналами; $F_2(K)$ – залежність від K відношення «сигнал/шум» у відновленому сигналі. Мета оптимізації: G_1 , G_2 – задані значення відстані Кульбака-Лейблера та нормованої пропускної здатності відповідно.

Для розв'язання поставленої оптимізаційної задачі використовуємо «goal attain method» [7, с. 322–348], який у наведеній постановці зводиться до визначення порогу обнуління K , за якого мінімізується параметр γ за обмежень

$$F_1(K) - w_1 \cdot \gamma \leq G_1; \quad F_2(K) - w_2 \cdot \gamma \leq G_2, \quad (5)$$

де w_1, w_2 – вагові коефіцієнти значущості критеріїв, які належать інтервалу $[0, 1]$.

Нормована пропускна здатність інформаційного каналу визначалася за співвідношенням Шеннона-Хартлі $\frac{C}{W} = \log_2(1 + \text{SNR})$, де C – пропускна здатність, W – ширина частотної смуги пропускання каналу [2, с. 327].

З означення процедури компресії випливає, що інформаційні відстані Кульбака-Лейблера та SNR відновленого сигналу збільшуються при збільшенні порогу обнуління внаслідок чого вимоги

максимізації SNR та мінімізації інформаційної відстані між первинним та відновленим сигналами протилежні. Запропонований метод забезпечує оптимальний компроміс між цими вимогами.

Нижче наведені результати тестування запропонованого методу стосовно багатоспектральних ДЗ земної поверхні.

На рисунках 1, 2 подані RGB-зображення ділянки земної поверхні, зафіксовані у спектральних інтервалах 0.78 мкм – 0.86 мкм (канал R), 0.63 мкм – 0.69 мкм (канал G), 0.52 мкм – 0.60 мкм (канал B) з різним рівнем білого гаусівського шуму.



Рис. 1. Первинне RGB-зображення з гаусівським шумом (дисперсія шуму 0.02)

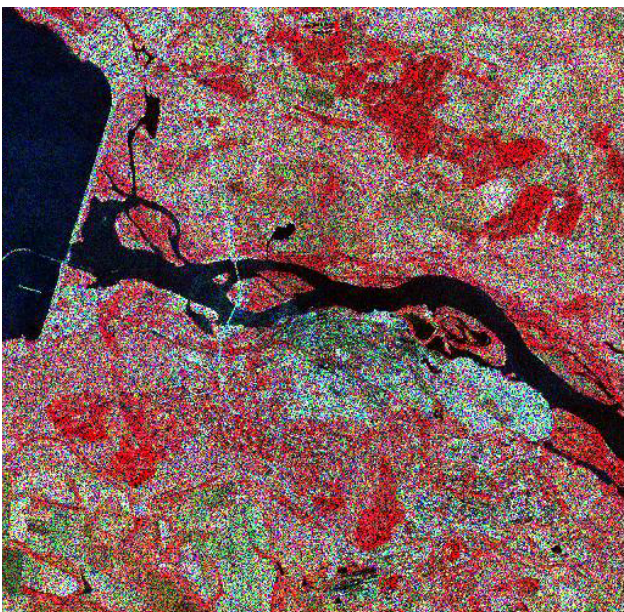


Рис. 2. Первинне RGB-зображення з гаусівським шумом (дисперсія шуму 0.05)

На рисунках 3, 4 наведені зображення, отримані запропонованим методом за використання вейвлет-базису Хаара на першому рівні декомпозиції при однаковій значущості критеріїв оптимізації ($w_1 = 1, w_2 = 1$ у виразі (5)) за оптимальних значень відстані Кульбака-Лейблера та нормованої пропускної здатності (відповідно 0.252 та 2.871).



Рис. 3. Відновлене зображення з гаусівським шумом (дисперсія шуму 0.02)



Рис. 4. Відновлене зображення з гаусівським шумом (дисперсія шуму 0.05)

Залежність оптимальних значень пропускної здатності, відстані Кульбака-Лейблера та SNR від рівня вейвлет-декомпозиції в умовах наведеного прикладу ілюструється даними таблиці 1.

Таблиця 1

Рівень декомпозиції	Відстань Кульбака-Лейблера	SNR (дБ)	Нормована пропускна здатність (біт/сек/Гц)
1	0.252	6.941	2.871
2	0.296	7.352	2.728
3	0.329	7.943	2.588
4	0.376	8.173	2.451
5	0.412	8.257	2.316

Як впливає з даних таблиці, при збільшенні рівня вейвлет-декомпозиції зростають оптимальні значення відстані Кульбака-Лейблера та SNR при одночасному зменшенні нормованої пропускної здатності.

При реалізації пропонованого методу отримано типову залежність нормованої пропускної здатності від SNR, наведену на рис. 5 за оптимального значення відстані Кульбака-Лейблера між вихідним та відновленим інформаційними сигналами (пунктирна лінія відповідає вихідному сигналу).

Як впливає з наведеної залежності, максимального значення 2.871 біт/сек/Гц нормована пропускна здатність інформаційного каналу набуває при оптимальному значенні відношення «сигнал/шум» 6.941 дБ.

Висновки. У статті запропоновано метод визначення пропускної здатності передачі багато-

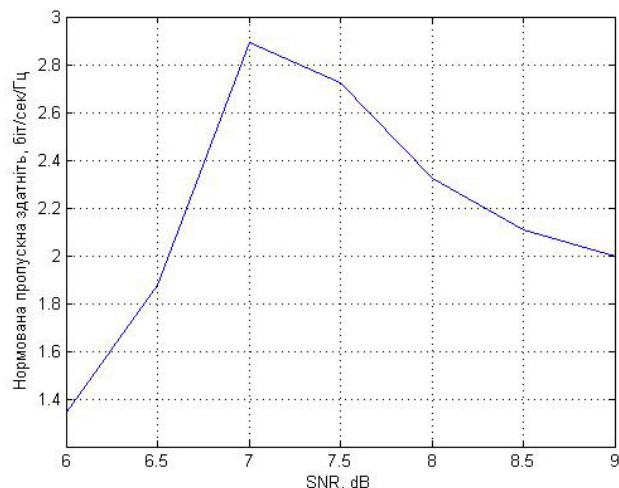


Рис. 5. Залежність нормованої пропускної здатності від відношення «сигнал/шум»

спектральних растрових зображень ДЗ по телекомунікаційних каналах з адитивним шумом на основі компресії сигналів, оптимізованої за критеріями мінімізації інформаційної відмінності вихідного та відновленого сигналів та досягнення заданого значення відношення «сигнал/шум». В основу компресії сигналів покладено їх подання в ортогональних вейвлет-базисах. Перспективи подальших досліджень за проблематикою статті пов'язані з оптимізацією достовірності передачі видових даних ДЗ шляхом їх завадостійкого кодування.

Список літератури:

- Showengerdt R.A. Remote Sensing Models and Methods for Image Processing . N.-Y.: Academic Press, 2007. 560 p.
- Proakis J.G., Manolakis D. Digital Signal Processing. Principles, Algorithms and Application. London: Prentice-Hall International, 2007. 948 p.
- Ahmed N., Rao K.K. Orthogonal Transforms for Digital Signal Processing. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1975. 248 p.
- Chui C.K. An Introduction to Wavelets. San Diego, N.-Y., Boston, London: Academic Press. 1992, 264 p.
- 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>
- Sage A.P., Melse J.I. Estimation Theory with Application to Communication and Control. N.-Y.: McGraw-Hill, 1992. 396 p.
- Cover T.M., Thomas J.A. Elements of information theory. N.-Y.: John Wiley & Sons. 1991. 320 p.
- Steur R.E. Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application. New York: John Wiley & Sons Inc., 1986. 546 p.

Korchynskiy V.M. OPTIMIZATION OF THE BANDWIDTH OF RASTER IMAGE TRANSMISSION CHANNELS

The article proposes a method for determining the bandwidth of telecommunication channels with additive noise in the transmission of raster images recorded by means of remote sensing, optimal in terms of information and energy criteria. The method is based on data compression optimized according to the following criteria: 1) minimization of the Kullback-Leibler information distance between the compressed and output signals;

2) maximizing the ratio of the signal energy of the informative signal stored in the compressed image to the signal energy of the residual noise (signal-to-noise ratio).

Compression of signals is implemented on the basis of the expansions of their Peano-Hilbert sweeps on one of the discrete orthogonal wavelet bases and the zeroing of a part of the decomposition coefficients.

It was found that with an increase in the zeroing threshold, the signal-to-noise ratio increases, and the Kullback-Leibler information distance between the original and compressed information signals decreases.

The definition of zeroing thresholds, which provides a compromise between the requirements of increasing the signal-to-noise ratio and minimizing the Kullback-Leibler distance between the output and compressed information signals, is formulated in the form of a two-criteria optimization problem for minimizing deviations of the Kullback-Leibler distance of the compressed information signal relative to the output signal and the signal-to-noise ratio in the compressed signal from predetermined values. The method of solving the optimization problem is used, which provides the possibility of setting the coefficients of significance of various optimization criteria.

It is shown that with the use of orthogonal wavelet bases, an increase in the level of wavelet decomposition leads to an increase in both the signal-to-noise ratio in the reconstructed signal and the information distance between it and the primary signal.

It has been found that with an increase in the threshold of zeroing of the wavelet decomposition coefficients, the bandwidth of the information channel with a limited frequency band increases.

Key words: bandwidth, information distance, signal-to-noise ratio, discrete orthogonal wavelet basis, information distance.