

ФІЛЬТРАЦІЯ ЗАВАД БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ ЦИФРОВИХ СИГНАЛІВ: ОПТИМІЗАЦІЙНИЙ ПІДХІД

У статті пропонується метод пригнічення адитивних завад на цифрових растрових зображеннях, отриманих у довільній кількості спектральних інтервалів проміння – носія видової інформації. Метод базується на компресії кодів яскравості зображень, оптимізованих за двома критеріями: 1) мінімізація відносної інформаційної ентропії скомпресованого зображення стосовно первинного (безпосередньо зафіксованого) зображення; 2) максимізація відношення сигнальної енергії інформативного сигналу, збереженої в скомпресованому зображенні, до сигнальної енергії завади (відношення «сигнал/шум»).

Реалізація пропонованого методу включає такі етапи: подання множини зображень спектральних каналів єдиним багатовимірним геометричним об'єктом (БГО) у вигляді масиву даних, упорядкованих за растром і спектральними інтервалами; розгортка Пеано-Гільберта БГО з отриманням одновимірного цифрового сигналу; компресія цифрових значень розгортки за зазначеними критеріями; реконструкція кодів яскравості скомпресованих зображень спектральних каналів функціональним перетворенням, оберненим стосовно використаного за компресії.

Фільтрація завад з одночасною компресією цифрових кодів яскравості зображень реалізована на основі розкладів цих кодів по дискретних ортонормованих функціональних базисах, обнуління частин коефіцієнтів розкладу й наступної реконструкції розподілів яскравості зображень. Визначення порогів обнуління коефіцієнтів розкладів цифрових рівнів яскравості сформульовано у вигляді двокритеріальної оптимізаційної задачі мінімізації відхилень відносної інформаційної ентропії скомпресованого зображення стосовно вихідного зображення та відношення «сигнал/шум» у скомпресованому зображенні від наперед заданих значень.

Пропонований метод забезпечує компроміс між вимогами збільшення відношення «сигнал/шум» і збереження інформативності синтезованих зображень стосовно первинних видових даних.

Зіставлення різних дискретизованих функціональних базисів як основи для компресії розподілів яскравості показало найбільшу ефективність за зазначеними критеріями базису Хартлі.

Ключові слова: багатоспектральне зображення, інформаційна відстань, відношення «сигнал/шум», розгортка Пеано-Гільберта, дискретне ортонормоване перетворення.

NOISE FILTERING OF MULTISPECTRAL DIGITAL SIGNALS: OPTIMIZATION APPROACH

The article proposes a method of filtering additive noise on digital raster images obtained in an arbitrary number of spectral intervals of radiation – the carrier of species information. The method is based on compression of image brightness codes, optimized according to two criteria: 1) minimization of the relative information entropy of the compressed image relative to the primary (directly fixed) image; 2) maximizing the ratio of the signal energy of the informative signal stored in the compressed image to the signal interference energy (signal-to-noise ratio).

The implementation of the proposed method includes the following steps: representation of a set of images of spectral bands by a single multidimensional geometric object (MGO) in the form of a data array, ordered by raster and spectral intervals; Peano-Hilbert reamer of MGO with obtaining a one-dimensional digital signal; compression of reamer values according to the specified criteria; reconstruction of brightness codes of compressed images of spectral bands by functional transformation inverse to that used by compression.

Noise filtering with simultaneous compression of digital brightness codes of images is implemented on the basis of decompositions of these codes on discrete orthonormalized functional bases, zeroing the part of the decomposition coefficients and subsequent reconstruction of image brightness distributions. Determination of thresholds for zeroing coefficients of schedules of digital brightness levels is formulated in the form of a two-criteria optimization problem of minimizing the deviations of the relative information entropy of the compressed image with respect to the original image and the signal-to-noise ratio in the compressed image from predetermined values.

The proposed method provides a compromise between the requirements of increasing the signal-to-noise ratio and preserving the informativeness of the synthesized images in relation to the primary species data.

Comparison of different discretized functional bases as the basis for compression of brightness distributions showed the greatest efficiency according to the specified criteria of the Hartley basis.

Key words: multispectral image, information distance, signal-to-noise ratio, Peano-Hilbert reamer, discrete orthogonal transformation.

Постановка проблеми

Розглядаються цифрові растрові зображення, зафіксовані водночас у декількох спектральних діапазонах електромагнітного проміння – носія видової інформації. З позицій тематичного аналізу таких зображень їх найважливішим інформаційним показником є розрізнявальна здатність, яка збільшується зі зменшенням довжини хвилі проміння. Фіксація таких багатоспектральних зображень неминуче супроводжується формуванням на них графічних завад, зумовлених нестабільностями середовища поширення проміння, наявністю яких утруднює тематичний аналіз та інтерпретацію зображень. Велика розмірність растру, забезпечувана сучасними засобами дистанційного зондування, потребує значних обчислювальних ресурсів для їх автоматизованого аналізу. У зв'язку з цим актуальна двоєдина проблема фільтрації графічних завад на таких зображеннях у поєднанні з компресією (стисненням) зображень за умови збереження рівня інформативності, необхідного для їх достовірного тематичного аналізу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питанням пригнічення фільтрації графічних завад на растрових зображеннях і компресії таких зображень присвячена значна кількість досліджень, у яких ці питання розглядаються окремо – без їх зв'язку. Численні алгоритми фільтрації графічних завад базуються на різних варіантах лінійної та нелінійної обробки кодів яскравості зображень без зв'язку з компресією цифрових зображень (див., наприклад монографію [1]). Більшість відомих методів компресії цифрових сигналів базується на їх розкладі по одному з ортогональних дискретних функціональних базисів [2–4]. Питання, пов'язані з перетворенням рівня завад за такої компресії, не розглядалися.

Мета дослідження

Мета статті полягає в розробленні методу пригнічення графічних завад (шумів) на растрових цифрових зображеннях, зафіксованих у довільній кількості спектральних інтервалів проміння – носія видової інформації, оптимального за критеріями максимізації відношення «сигнал/шум» (SNR) і мінімізації інформаційної відмінності вихідних і синтезованих зображень шляхом компресії вихідних зображень із контрольованим рівнем збереження їх інформативності.

Виклад основного матеріалу дослідження

Сукупність растрових зображень, поданих на растрі розміром $N \times M$ пікселів і зафіксованих у k спектральних інтервалах, подаємо масивом $D_{N \cdot M \times k}$ стовпці якого отримані розгорткою растру спектральних інтервалів уздовж його рядків. Для редукції вимірності $D_{N \cdot M \times k}$ використовуємо його розгортку $V(x)$, отриману за алгоритмом Пеано [5].

Здійснюємо розклад отриманої розгортки по заданому дискретному ортонормованому базису (використовувалися базиси Уолша, Хартлі й дискретне косинусне перетворення [2]):

$$V(x) = \sum_{n=1}^L c_n \cdot u_n(x), \quad (1)$$

де $u_n(x)$ – базисні функції; c_n – коефіцієнти розкладу; L – довжина розгортки.

Здійснимо перетворення множини коефіцієнтів розкладу (1): $C_n = c_n$ при $n = \overline{1, T}$; $C_n = 0$ при $n \geq T$. Компресія здійснюється оберненим перетворенням:

$$V_c(x) = \sum_{k=1}^L C_k \cdot u_k(x). \quad (2)$$

За міру інформаційної відмінності скомпресованого сигналу з розподілом частот його елементів $p(x)$ від первинного сигналу з розподілом частот $q(x)$ прийнято відносну ентропію Кульбака-Лейблера [6]:

$$L(p \parallel q) = \int_x p(x) \cdot \log_2 \left[\frac{p(x)}{q(x)} \right] \cdot dx, \quad (3)$$

де $p(x)$, $q(x)$ – відповідно, густини розподілів залежностей $V(x)$ і $V_c(x)$.

Визначення порогу T обнуління коефіцієнтів розкладу (1) формулюємо як оптимізаційну задачу за критеріями мінімізації відхилень від наперед заданих значень відносної інформаційної ентропії та SNR результуючого зображення стосовно вихідного зображення.

Реконструкція перетворених зображень спектральних каналів здійснюється оберненим відображенням Пеано з наступним перетворенням, зворотнім до перетворення (1).

Тестування запропонованого методу здійснювалося з використанням ортонормованих базисів Уолша, Хартлі й дискретного косинусного перетворення.

На рисунках 1–4 подані зображення чотирьох спектральних каналів та адитивного гаусівського шуму з різними дисперсіями.

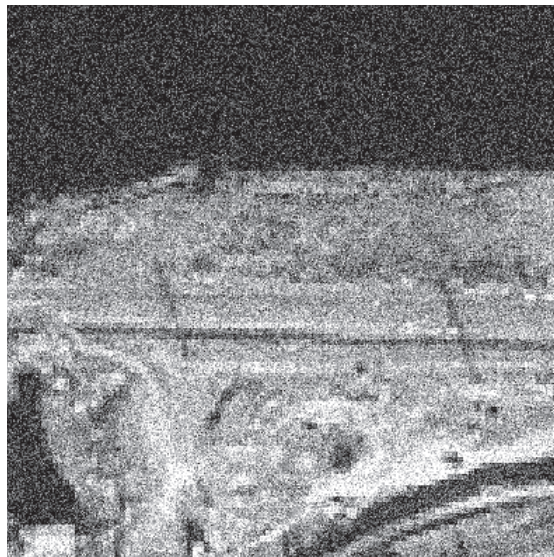


Рис. 1. Зображення спектрального каналу 0,77 мкм – 0,88 мкм, дисперсія шуму 0,04

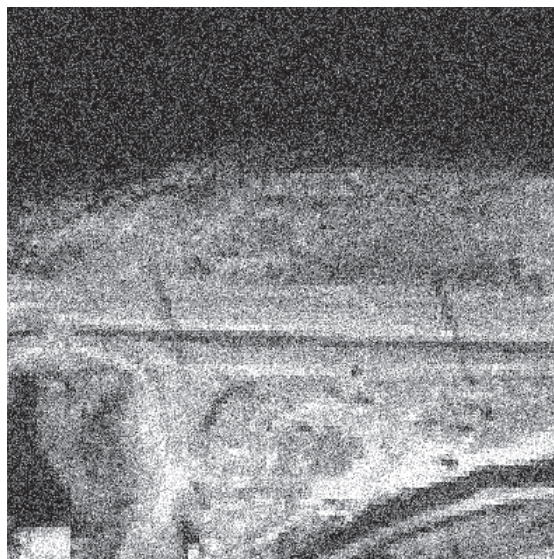


Рис. 2. Зображення спектрального каналу 0,64 мкм – 0,72 мкм, дисперсія шуму 0,04

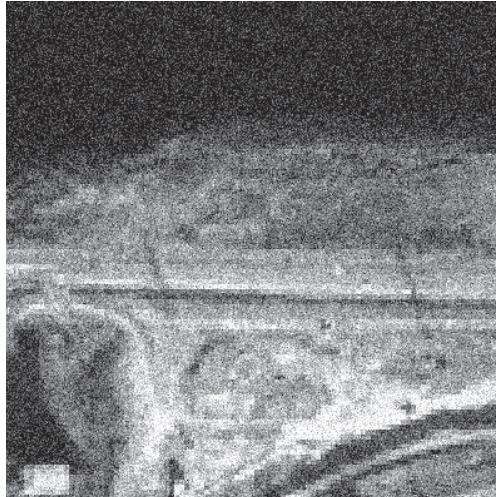


Рис. 3. Зображення спектрального каналу 0,52 мкм – 0,61 мкм, дисперсія шуму 0,0225

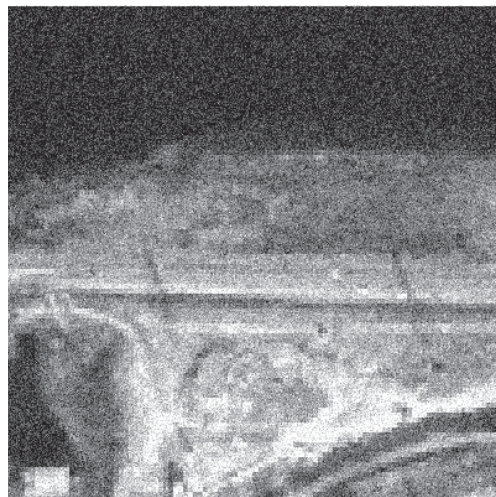


Рис. 4. Зображення спектрального каналу 0,45 мкм – 0,53 мкм, дисперсія шуму 0,0169

На рисунках 5–8 наведені зображення, відтворені за використання ортонормованого базису Хартлі з порогом обнуління коефіцієнтів розкладу, що забезпечує SNR на менше за 6,9771 дБ та відносну інформаційну ентропію $L(p \parallel q)$ не більше ніж 0,4917 біт.

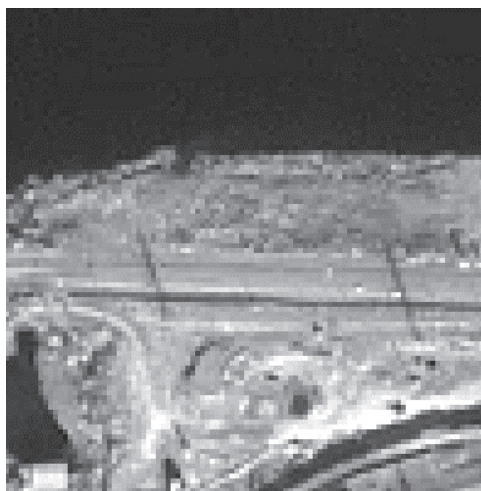


Рис. 5. Відновлене зображення спектрального каналу 0,77 мкм – 0,88 мкм

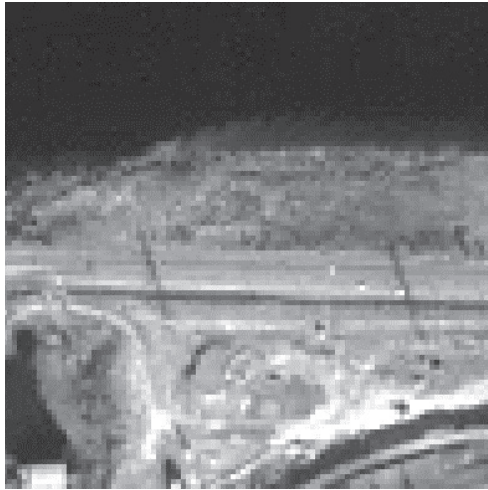


Рис. 6. Відновлене зображення спектрального каналу 0,64 мкм – 0,72 мкм

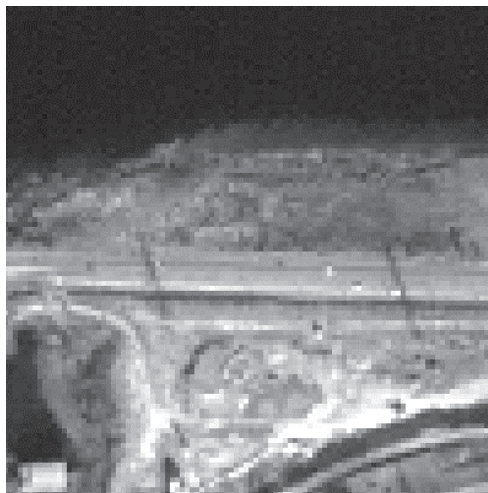


Рис. 7. Відновлене зображення спектрального каналу 0,77 мкм – 0,88 мкм

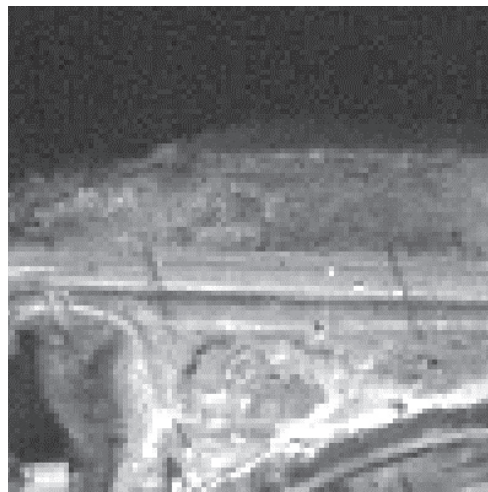


Рис. 8. Відновлене зображення спектрального каналу 0,77 мкм – 0,88 мкм

Як випливає з наведеної процедури компресії, у разі збільшення порогу обнуління коефіцієнтів розкладу розгортки Пеано-Гільберта зменшуються як потужність залишкового шуму, так і відстань Кульбака-Лейблера між вихідним і відновленим зображеннями. Із цього випливає, що між

SNR і цією відстанню існує обернена залежність. На рисунку 9 ця залежність показана стосовно дискретних функціональних базисів Уолша, Хартлі та дискретного косинусного перетворення.

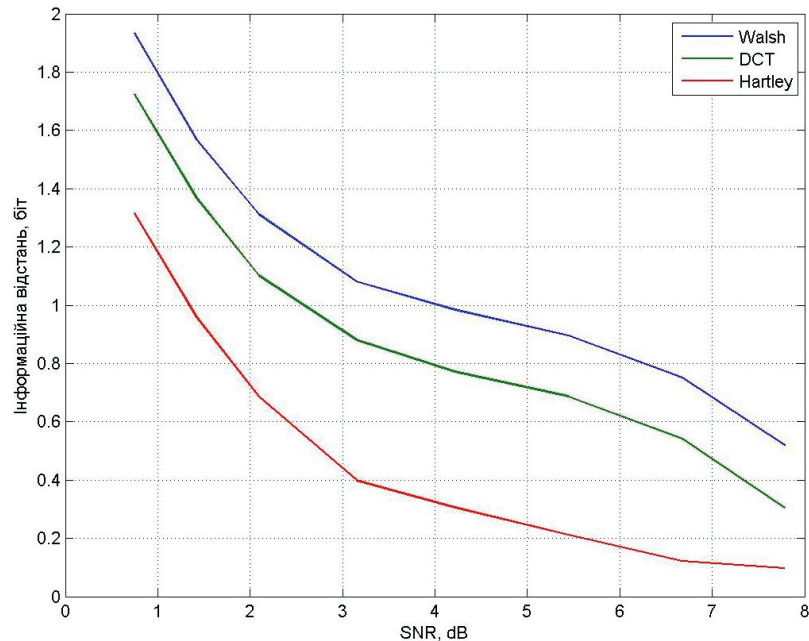


Рис. 9. Залежність інформаційної відстані від відношення SNR у відновлених зображеннях

Запропонований метод забезпечує оптимальний компроміс між вимогами мінімізації інформаційної відмінності вихідного та відновленого зображень і досягнення заданого значення відношення SNR.

Висновки

Запропоновано новий метод пригнічення графічних завад на багатоспектральних цифрових зображеннях, оптимізований за інформаційним та енергетичним критеріями. Водночас забезпечується економія обчислювальних ресурсів, необхідних для автоматизованого тематичного аналізу багатоспектральних цифрових зображень. Подальші дослідження за проблематикою статті будуть спрямовані на збільшення пропускну здатності інформаційних каналів передачі багатоспектральних цифрових зображень дистанційного зондування.

Список використаної літератури

1. Showengerdt R.A. Remote Sensing Models and Methods for Image Processing. N.-Y. : ELSEVIER, 2007. 560 p.
2. Ahmed N., Rao K.K. Orthogonal Transforms for Digital Signal Processing. Berlin-Heidelberg : Springer-Verlag, 1975, 248 p.
3. Корчинський В.М., Свиarenко Д.М. Оптимізаційний метод компресії багатоспектральних цифрових зображень проєкційної природи. *Сучасні проблеми моделювання*. 2022. Вип. 24. С. 119–126.
4. Voloshin V.I., Korchinsky V.M., Kharitonov M.M. A Novel Method For Correction of Distortions and Improvement of Information Content in Sattelite-Acquired Multispectral Images. *Advances and Challengers in Multisensor Data and Information Processing*. Amsterdam : IOS Press, 2007. P. 315–323.
5. Sagan K. Space-Filling Curves. N.-Y. : Springer-Verlag, 1994. 194 p.
6. Cover T.M., Thomas J.A. Elements of information theory. N.-Y. : John Wiley & Sons, 1991. 320 p.

References

1. Showengerdt, R. (2007). Remote Sensing Models and Methods for Image Processing. N.-Y. : ELSEVIER. [in English]
2. Ahmed, N. & Rao, K. (1975). Orthogonal Transforms for Digital Signal Processing. Berlin-Heidelberg : Springer-Verlag. [in English]
3. Korchynskyi V. & Svyarenko D. (2022). Optymizatsiinyi metod kompresii bahatospektralnykh tsyfrovyykh zobrazhen proektsiinoi pryrody – [Optimization method of compression of multispectral digital images of projection nature]. *Suchasni problemy modeliuвання*. Vol. 24. P. 119–126. doi: 10.33842/2313125X-2022-24-108-115
4. Voloshin V. I., Korchinsky V.M. & Kharitonov M.M. (2007). A Novel Method For Correction of Distortions and Improvement of Information Content in Sattelite-Acquired Multispectral Images. *Advances and Challengers in Multispectral Data and Information Processing*. Amsterdam : IOS Press. P. 315–323. [in English]
5. Sagan K. (1994). Space-Filling Curves. N.-Y. : Springer-Verlag. [in English]
6. Cover, T.M. & Thomas, J.A. (1991). Elements of information theory. N.-Y. : John Wiley & Sons.

Корчинський Володимир Михайлович – д.т.н., професор, завідувач кафедри телекомунікаційних систем та мереж Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, e-mail: korchins50k@i.ua, ORCID: 0000-0001-6621-0631.

Korchynskyi Volodymyr Mykhailovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Telecommunication Systems and Networks of Oles Honchar Dnipro National University, e-mail: korchins50k@i.ua, ORCID: 0000-0001-6621-0631.