

БОРТНИК Геннадій

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7083-2775>e-mail: bgen88@gmail.com

БОРТНИК Олександр

Вінницький національний технічний університет

e-mail: alex.bortnik.it@gmail.com

КИРИЛЮК Сергій

Вінницький національний технічний університет

e-mail: kso1996.08@gmail.com

СПЕКТРАЛЬНО-КОВАРІАЦІЙНИЙ МЕТОД КЛАСИФІКАЦІЇ РАДІОСИГНАЛІВ

У роботі запропоновано високоефективний метод класифікації радіосигналів на базі спектрально-коваріаційного оцінювання сигналів. При цьому здійснюється багаторічне оброблення перекривних підпоследовностей відліків досліджуваного радіосигналу у часовій і частотній області. Пропонується здійснювати оцінку параметрів радіосигналу на базі знайденої спектральної густини потужності досліджуваного сигналу.

Аналіз ефективності запропонованого методу підтвердив, що завдяки розробленому методу вдається підвищити продуктивність спектрально-коваріаційного оцінювання радіосигналів у $2,0\div 8,9$ разів залежно від обсягу аналізованої реалізації радіосигналу та числа перекривних підпоследовностей. Максимальний коефіцієнт продуктивності досягається за умови, коли початкова реалізація радіосигналу розбивається на 64 перекривні підпоследовності.

Ключові слова: спектральна густина потужності, швидке перетворення Фур'є, радіосигнали, продуктивність.

BORTNYK Gennadiy, BORTNYK Olexand, KYRYLYUK Sergiy

Vinnytsia National Technical University

SPECTRAL-COVARIATION METHOD OF CLASSIFICATION OF RADIO SIGNALS

The paper proposes a high-performance method of radiosignal classification based on spectral-covariance evaluation of signals. At the same time, multi-stage processing of overlapping subsequences of readings of the investigated radiosignal in the time and frequency domain is carried out. At the first stage, it is proposed to evaluate the parameters of the radiosignal based on the found power spectral density of the investigated signal.

To determine the spectral density of the radiosignal, subsequences of readings obtained from the array of input readings of the investigated signal are formed. The maximum shift between two adjacent subsequences is chosen, that is, the initial realization of the signal is presented in the form of overlapping subsequences. Taking into account that two adjacent subsequences have part of common processed readings, the paper proposes an expression that for each new subsequence of input readings would take into account the coefficients of the discrete Fourier transform, which were determined for the previous subsequence of the input signal. During the following stages, the shape of the spectrum of the analyzed radiosignal is compared with the spectrum samples specified by the operator of the radiocontrol system. Comparison of the spectrum of the investigated radiosignal and the spectral mask is based on the determined correlation coefficient.

The approximation of the value of the correlation coefficient to unity characterizes the degree of linear relationship between the spectrum of the signal and the mask. This makes it possible to determine the type and positions of radiochannels based on the obtained sequence of correlation coefficient values for different shifts of the spectral mask.

The analysis of the effectiveness of the proposed method confirmed that thanks to the developed method, it is possible to increase the productivity of the spectral-covariance evaluation of radio signals by $2.0\div 8.9$ times, depending on the volume of the analyzed implementation of the radiosignal and the number of overlapping subsequences. The maximum performance factor is achieved when the initial implementation of the radiosignal is divided into 64 overlapping subsequences. The proposed method can be used in automated radiotechnical control systems to monitor the radiosituation in real time.

Keywords: power spectral density, fast Fourier transform, radiosignals, productivity.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Особливістю теперішнього періоду є різке збільшення використання технологій радіозв'язку. Слід відмітити ряд чинників, що пов'язані з ускладненням радіоелектронної обстановки, а саме: застосування великого числа радіозасобів в обмеженому просторі, значне підвищення швидкості передачі інформації, використання цифрових пакетних радіосигналів, нерівномірний часовий розподіл роботи радіозасобів.

За таких умов зростає важливість виявлення випадків несанкційованого використання радіочастотного спектра та контролю відповідності параметрів реєструємих радіосигналів базі даних частотно-територіального плану. Такі задачі розв'язуються за допомогою автоматизованих систем радіоконтролю. При цьому однією з найбільш складних задач є класифікація радіосигналів та визначення їх приналежності до певного стандарту зв'язку. Сучасні засоби радіоконтролю функціонують на базі методів цифрового оброблення сигналів (ЦОС). На практиці виникає необхідність використання методів ЦОС у реальному масштабі часу. Проблематика ЦОС у реальному часі зумовлена обмеженою швидкодією програмно-апаратних засобів радіоконтролю [1].

Традиційний метод вирішення такої проблеми вимагає наявності потужних обчислювальних засобів, які здатні реалізувати алгоритми ЦОС з високою швидкістю. Але реалізація такого підходу

обмежує частотний діапазон аналізованих радіосигналів [2]. Тому, незважаючи на певні результати, досягнуті при застосуванні методів ЦОС, питання підвищення продуктивності засобів радіоконтролю для класифікації радіосигналів у реальному масштабі часу, як і раніше, залишається актуальним.

Аналіз досліджень та публікацій

Реальні показники засобів радіоконтролю не досягають своїх потенційно теоретичних можливостей внаслідок низької продуктивності методів ЦОС і це відображено у відповідних публікаціях [2, 3]. Для класифікації радіосигналів у спектральній області використовують процедури дискретного перетворення Фур'є (ДПФ). Запропоновано ряд способів швидкого визначення ДПФ, що дозволяють знизити обсяг обчислень порівняно з безпосереднім використанням ДПФ. Такі способи базуються на реалізації алгоритмів швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Але, як показали дослідження, резерв підвищення продуктивності методів ЦОС в засобах радіоконтролю існує [4].

Судячи з останніх публікацій [2–6], не дивлячись на багату передісторію використання методів ЦОС у системах радіоконтролю, розробка певних аспектів цифрового оброблення радіосигналів продовжується зараз і не може вважатись цілком завершеною.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є підвищення продуктивності процесу класифікації радіосигналів за рахунок зменшення числа операцій при реалізації алгоритмів спектрально-коваріаційного оцінювання радіосигналів.

Виклад основного матеріалу

Процес класифікації радіосигналів при виконанні радіоконтролю виконується за декілька етапів. На першому етапі пропонується здійснювати оцінку параметрів радіосигналу на базі знайденої спектральної густини потужності досліджуваного сигналу. Протягом наступних етапів виконується зіставлення форми спектра радіосигналу, що аналізується, зі зразками спектрів, що задаються оператором системи радіоконтролю.

Вираз для обчислення ДПФ заданої вибірки радіосигналу у часовій області $x(n)$ довжиною N , де $n = 0, 1, \dots, N-1$, має такий вигляд [7]

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk}, \quad (1)$$

де $W_N = e^{-j(2\pi/N)}$ – повертальні множники ДПФ.

Для визначення спектральної густини радіосигналу необхідно відповідним чином сформувати підпоследовності відліків, що отримані з масиву вхідних відліків досліджуваного сигналу. Обирається максимальний зсув між двома сусідніми підпоследовностями, тобто початкова реалізація сигналу представляється у вигляді перекривних підпоследовностей. При цьому зсув між двома сусідніми підпоследовностями менший довжини всієї реалізації. Потім в існуючих методах спектрального оцінювання виконується визначення коефіцієнтів ДПФ згідно з виразом (1) шляхом повторення ШПФ для кожної підпоследовності вхідної реалізації.

Враховуючи те, що дві сусідні підпоследовності мають частину спільних оброблюваних відліків, в роботі пропонується знайти вираз, який для кожної нової підпоследовності вхідних відліків враховував би коефіцієнти ДПФ, що були визначені для попередньої підпоследовності вхідного сигналу.

ДПФ першої підпоследовності $X_1(k)$ довжиною N вхідних відліків знаходиться за виразом (1). На базі відомого ДПФ (1) необхідно знайти ДПФ нової підпоследовності, що отримана шляхом подовження початкової підпоследовності на m відліків справа та вилученням її перших відліків. ДПФ сформованої таким чином підпоследовності можна знайти за виразом

$$X_2(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n+m) \cdot W_N^{nk}. \quad (2)$$

У виразі (2) потрібно домножити кожен доданок на повертальний множник W_N^{mk} , а всю суму для того, щоб вона залишилась незмінною, необхідно домножити на W_N^{-mk} :

$$X_2(k) = \left[\sum_{n=0}^{N-1} x(n+m) \cdot W_N^{k(n+m)} \right] \cdot W_N^{-mk}. \quad (3)$$

Аналізуючи вираз (3) можна стверджувати, що у квадратних дужках виразу знаходиться та ж сума, що й у правій частині виразу (1). Враховуючи це, а також взявши до уваги властивість періодичності повертальних множників ДПФ, вираз для знаходження $X_2(k)$ можна представити у наступному вигляді

$$X_2(k) = \left\{ X_1(k) + \sum_{n=0}^{m-1} [x(N+m) - x(n)] \cdot W_N^{nk} \right\} \cdot W_N^{-mk}. \quad (4)$$

В результаті отримано рекурентний вираз для визначення ДПФ підпоследовності, в якій обновляється m відліків. Цей вираз у загальному випадку для знаходження ДПФ r -підпоследовності можна записати таким чином

$$X_r(k) = \left\{ X_{r-1}(k) + \sum_{n=0}^{m-1} [x_r(n) - x_{r-1}(n)] \cdot W_N^{nk} \right\} \cdot W_N^{-mk}. \quad (5)$$

Наступним етапом оброблення є знаходження оцінки взаємної спектральної густини потужності:

$$\hat{S}_{XY}(k) = \frac{1}{K} \sum_{r=0}^{K-1} X_r(k) \cdot Y_r^*(k), \quad (6)$$

де $Y_r^*(k)$ – комплексно-спряжене значення ДПФ спектральної маски;

K – кількість оброблювальних підпоследовностей.

Слід зазначити, що статистична стійкість спектрального оцінювання радіосигналів згідно (6) буде покращуватись зі збільшенням кількості оброблювальних підпоследовностей K .

На завершальному етапі потрібно здійснити оцінювання взаємної коваріаційної функції шляхом виконання зворотного ДПФ послідовності $\hat{S}_{XY}(k)$:

$$\hat{R}_{XY}(m) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \hat{S}_{XY}(k) \cdot e^{j \frac{2\pi km}{N}}. \quad (7)$$

У виразі (7) використовується прямокутне вагове вікно, тобто $\omega(m) = 1$. Для зменшення дисперсії оцінки коваріаційної функції необхідно здійснити подальше оброблення за допомогою кореляційного вікна. Тобто, оцінка $\hat{R}_{XY}(m)$ зважується за допомогою кореляційної віконної функції $\omega_c(m)$. У результаті отримуємо зважену коваріаційну оцінку

$$\hat{R}_{(XY)\omega}(m) = \hat{R}_{XY}(m) \cdot \omega_c(m). \quad (8)$$

Кореляційне зважування дозволяє керувати рівнем бічних паразитних пелюсток спектра потужності досліджуваного радіосигналу. Зіставлення спектра досліджуваного радіосигналу та спектральної маски базується на визначенні коефіцієнта кореляції

$$\rho_{xy}(m) = \frac{\hat{R}_{(XY)\omega}(m)}{\sigma_S \cdot \sigma_M}, \quad (9)$$

де σ_S , σ_M – значення середньоквадратичного відхилення досліджуваного сигналу та маски.

Наближення значення коефіцієнта кореляції до одиниці характеризує ступінь лінійного взаємозв'язку спектра сигналу та маски. Це дозволяє за отриманою послідовністю значень коефіцієнта кореляції для різних зсувів спектральної маски визначити тип та позиції радіоканалів. Водночас існує ймовірність випадкової збіжності вузької спектральної маски з фрагментом спотвореного спектра широкосмугового сигналу. Для усунення таких помилок необхідно виконувати розрахунок коефіцієнта кореляції згідно (9) для набору масок послідовно, починаючи з широкосмугової маски.

Критерієм ефективності запропонованого методу є коефіцієнт продуктивності, який демонструє вигравш у кількості „довгих” операцій множення при застосуванні запропонованого методу на базі спектрально-коваріаційного оцінювання радіосигналів порівняно з методом на базі спектрального оцінювання [6]:

$$G_S = \frac{C_{DSE}}{C_{SCE}}, \quad (10)$$

де C_{DSE} – кількість операцій множення при спектральному оцінюванні радіосигналів;

C_{SCE} – кількість операцій множення при використанні запропонованого методу.

Класифікація радіосигналів на базі спектрального оцінювання вимагає $4K \cdot M \cdot \log_2 M$ операцій множення для реалізації алгоритмів стрибкоподібного ШПФ та зворотного ДПФ. Окрім того, для виконання

операції оброблення масиву за допомогою віконної функції необхідно $4K \cdot M$ множень [7].

Для реалізації запропонованого методу на базі спектрально-коваріаційного оцінювання радіосигналів використовується прямокутне вікно даних, при якому операції множення не виконуються. Алгоритм рекурентного ШПФ та зворотного ДПФ реалізуються за допомогою $2N \cdot \log_2 N$ операцій множення. Оброблення вихідної послідовності за допомогою кореляційної віконної функції реалізується з використанням N операцій множення. Тоді коефіцієнт продуктивності запропонованого методу дорівнює

$$G_S = \frac{4K \cdot M \cdot [\log_2 M + 1]}{N \cdot [2 \log_2 N + 1]} \quad (11)$$

Графік залежності коефіцієнта продуктивності від обсягу аналізованої реалізації радіосигналу для різного числа оброблювальних підпослідовностей наведено на рис. 1.

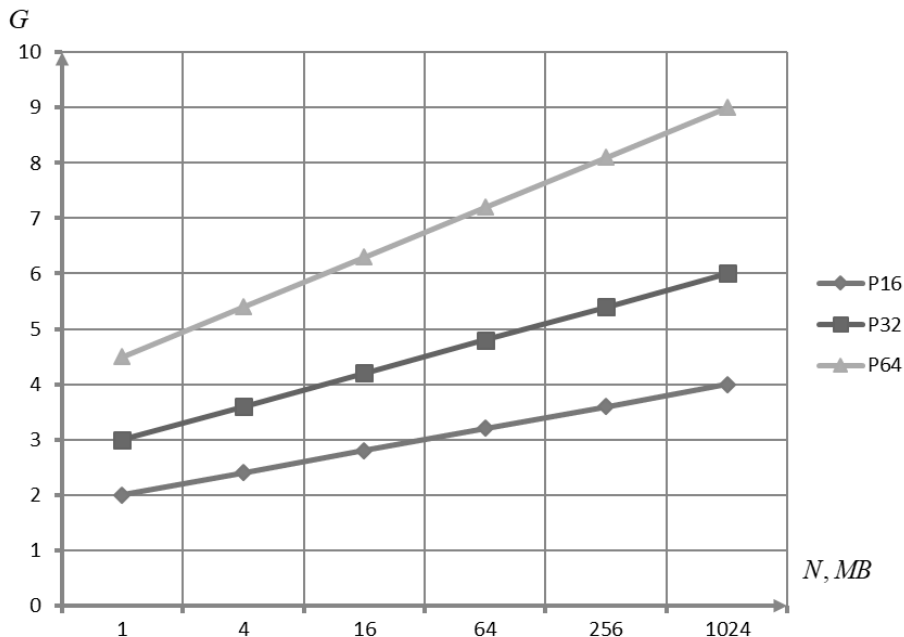


Рис. 1. Залежність коефіцієнта продуктивності від обсягу аналізованої реалізації радіосигналу N для різного числа оброблювальних підпослідовностей

Як видно з графіків, продуктивність запропонованого методу підвищується зі збільшенням обсягу вибірки. Нижня крива побудована для 16 оброблюваних підпослідовностей, а криві, що розташовані вище, відповідають кількості підпослідовностей 32 та 64. При збільшенні числа оброблюваних підпослідовностей коефіцієнт продуктивності зростає і знаходиться у межах $4,0 \div 8,9$ для максимального обсягу аналізованої реалізації радіосигналу $N = 1024$. Отже, використання у запропонованому методі комбінованого оброблення перекривних підпослідовностей у часовій і частотній області призводить до зменшення числа необхідних арифметичних операцій і як наслідок – до підвищення продуктивності процесу класифікації радіосигналів.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У роботі запропоновано високопродуктивний метод класифікації радіосигналів на базі спектрально-коваріаційного оцінювання сигналів. При цьому здійснюється багатоетапне оброблення перекривних підпослідовностей відліків досліджуваного радіосигналу у часовій і частотній області.

Аналіз ефективності запропонованого методу підтвердив, що завдяки розробленому методу вдається підвищити продуктивність спектрально-коваріаційного оцінювання радіосигналів у $2,0 \div 8,9$ разів залежно від обсягу аналізованої реалізації радіосигналу та числа перекривних підпослідовностей. Максимальний коефіцієнт продуктивності досягається за умови, коли початкова реалізація радіосигналу розбивається на 64 перекривні підпослідовності.

Запропонований метод можна використовувати в автоматизованих системах радіотехнічного контролю для моніторингу радіообстановки у реальному масштабі часу.

Література

1. Бортник Г. Г. Методи та засоби первинного цифрового оброблення радіосигналів: монографія / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, В. М. Кичак. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 168 с.
2. Бортник Г. Г. Методи та засоби цифрового оброблення високочастотних сигналів для систем безпеки та моніторингу : монографія / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, В. М. Кичак. – Вінниця : ВНТУ,

2020. – 126 с.

3. Rohde & Schwarz Radiomonitoring & Radiolocation Catalog, 2016. URL: https://cdn.rohdeschwarz.com/downloads_45/common_library_45/brochures_and_datasheets_45/Radiomonitoring_and_Radiolocation_Catalog.pdf.

4. Jagannath J., Poloskyz N., Jagannath A., Restucciay F. Machine Learning for Wireless Communications in the Internet of Things: A Comprehensive Survey. Ad Hoc Networks 93, 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1901.7947>.

5. Krizhevsky A., Sutskever I. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. Advances in Neural Information Processing Systems 25, 2012. URL: <http://www.cs.toronto.edu/imagenet.pdf>.

6. Бортник Г. Г. [Метод цифрового спектрального аналізу вузькосмугових сигналів](#) / Г. Г. Бортник, О. Г. Бортник, О. В. Стальченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 4. – С. 97–101.

7. Задирака В. К. Цифровая обработка сигналов / В. К. Задирака, С. С. Мельникова. – Київ : Наукова думка, 1993. – 295 с.

References

1. Bortnyk G. G. Metody ta zasoby pervynnoho tsyfrovoho obroblyennia radiosyhnaliv / G.G. Bortnyk, M.V.Vasylykivskiyi, V.M. Kychak. – Vinnytsia : VNTU, 2016. – 168 s.

2. Bortnyk G. G. Metody ta zasoby tsyfrovoho obroblyennia vysokochastotnykh syhnaliv dlia system bezpeky ta monitorynhu: monohrafiia / G. G. Bortnyk, M. V. Vasylykivskiyi, V. M. Kychak. – Vinnytsia : VNTU, 2020. – 126 s.

3. Rohde & Schwarz Radiomonitoring & Radiolocation Catalog, 2016. URL: https://cdn.rohdeschwarz.com/downloads_45/common_library_45/brochures_and_datasheets_45/Radiomonitoring_and_Radiolocation_Catalog.pdf.

4. Jagannath J., Poloskyz N., Jagannath A., Restucciay F. Machine Learning for Wireless Communications in the Internet of Things: A Comprehensive Survey. Ad Hoc Networks 93, 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1901.7947>.

5. Krizhevsky A., Sutskever I. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. Advances in Neural Information Processing Systems 25, 2012. URL: <http://www.cs.toronto.edu/imagenet.pdf>.

6. Bortnyk G.G. Metod tsyfrovoho spektralnoho analizu vuzkosmuhovykh syhnaliv / G.G. Bortnyk, O.G.Bortnyk, O.V. Stalchenko // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2016. – № 4. – S. 97-101.

7. Zadyraka V. K. Tsyfrovaia obrabotka syhnalov / V. K. Zadyraka, S. S. Melnykova. – Kyiv: Naukova dumka, 1993. – 295 s.