

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК 621.372

Г. Г. Бортник¹
О. Г. Бортник¹
О. В. Стальченко¹

МЕТОД ЦИФРОВОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ВУЗЬКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ

¹Вінницький національний технічний університет

Запропоновано метод цифрового спектрального аналізу вузькосмугових сигналів на базі алгоритмів швидкого перетворення Фур'є. Перевагою методу є висока продуктивність, що дає змогу виконувати спектральний аналіз сигналів у реальному масштабі часу.

Ключові слова: цифровий спектральний аналіз, вузькосмугові сигнали, продуктивність, дискретне перетворення Фур'є, реальний масштаб часу.

Вступ

Цифровий спектральний аналіз сигналів знаходить широке використання в галузі телекомунікацій та радіотехніки і це знаходить відображення у відповідних публікаціях [1—3]. Існуючі методи спектрального аналізу базуються на використанні алгоритмів цифрового оброблення сигналів (ЦОС), а саме — алгоритмів швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) [2, 3]. Сучасні цифрові спектроаналізатори, що використовують ШПФ, характеризуються високою точністю та роздільною здатністю. Разом з тим, при розв'язанні задач, пов'язаних зі спектральним аналізом вузькосмугових сигналів у телекомунікаційних і радіотехнічних системах, що функціонують у реальному масштабі часу, продуктивність існуючих методів і засобів ЦОС виявляється недостатньою.

Останнім часом запропоновано декілька модифікованих методів спектрального аналізу на базі алгоритмів ЦОС, які розроблено для того, щоб послабити обмеження за продуктивністю, що властиві цифровим спектральним методом [3—5]. У режимі роботи в реальному масштабі часу необхідно здійснювати оброблення вузькосмугових сигналів, в якому не відбувається втрат відліків аналізованих сигналів і водночас не відбувається зростаючого від реалізації до реалізації їх накопичення. Незважаючи на отримані певні результати, досягнуті у вищезазначених публікаціях, питання підвищення продуктивності цифрового спектрального аналізу вузькосмугових сигналів як і раніше залишається актуальним.

Мета та задачі дослідження

Метою роботи є підвищення продуктивності цифрового спектрального аналізу вузькосмугових сигналів за рахунок багатоетапного цифрового оброблення масиву вибірок досліджуваного сигналу.

Задачами дослідження є:

- обґрунтування особливостей цифрового оброблення вузькосмугових сигналів у реальному масштабі часу;
- розробка швидкої процедури багатоетапного цифрового оброблення масиву вибірок досліджуваного сигналу;
- аналіз продуктивності запропонованого методу цифрового спектрального аналізу.

Особливості цифрового оброблення вузькосмугових сигналів у реальному масштабі часу

Слід зазначити, що до класу вузькосмугових сигналів відносяться радіосигнали на базі амплітудної, балансної та односмугової модуляції, а також групові сигнали систем зв'язку з частотним

розділенням каналів. Для вузькосмугових сигналів, спектр яких розміщено у частотному діапазоні $f_1 \dots f_2$, справедливий вираз

$$\frac{\Delta f}{f_0} \ll 1, \quad (1)$$

де $f_0 = \frac{f_1 + f_2}{2}$ — центральна частота вузькосмугового сигналу; $\Delta f = f_2 - f_1$ — смуга частот, яку займає досліджуваний сигнал.

У реальному масштабі часу кінцевий результат спектрального аналізу T_{FFT} має бути отриманий за час, що не перевищує тривалість T_R оброблюваної реалізації вузькосмугового сигналу. Тобто, для усієї сукупності, що містить m визначених спектральних складових сигналу

$$T_{FFT} < T_R. \quad (2)$$

Якщо умова (2) виконується, то можна здійснювати спектральний аналіз вузькосмугових сигналів у реальному масштабі часу. При фіксованій швидкодії обчислювального пристрою спектроаналізатора значення T_{FFT} визначається числом операцій, необхідних для реалізації алгоритмів цифрового спектрального аналізу сигналів [6].

Багатоетапний процес цифрового оброблення вибірок досліджуваного сигналу

Спектр сигналу, що знаходиться на базі ДПФ з ваговим обробленням дорівнює [2]

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \omega(n) \cdot e^{-j \frac{2\pi n k}{N}}, \quad (3)$$

де $x(n)$ — відліки сигналу у часовій області; $\omega(n)$ — вагова функція; k — номер відліку у частотній області.

Для реалізації ДПФ з використанням алгоритмів ШПФ обсяг вибірки $N = 2^l$. При цифровому спектральному аналізі вузькосмугових сигналів необхідно знаходити спектральні складові [7]:

$$Y_{aq} = [Y_a, Y_{a+q}, Y_{a+2q}, \dots, Y_{a+(m-1)q}], \quad (4)$$

де a — номер першої спектральної складової; q — дискретний інтервал між двома сусідніми складовими ДПФ.

На першому етапі оброблення сформований вхідний масив даних переноситься по осі частот на величину a . Для цього здійснюється множення відліків вхідного сигналу на відповідні відліки дискретної експоненти $e^{-j \frac{2\pi a n}{N}}$, тобто

$$x_a(n) = x(n) \cdot e^{-j \frac{2\pi a n}{N}}. \quad (5)$$

Наступним етапом оброблення є створення масиву даних, що формується з елементів, отриманих за виразом

$$x_{aq}(n) = x_a(n) + x_a\left(n + \frac{N}{q}\right) + x_a\left(n + 2\frac{N}{q}\right) + \dots + x_a\left(n + (m-1)\frac{N}{q}\right). \quad (6)$$

Результати розрахунків згідно з (6) можна записати у вигляді двовимірного масиву, що містить $\frac{N}{m \cdot q}$ стовпців і m рядків. У подальшому, стовпці цього масиву обробляються з використанням алгоритму ШПФ за основою m

$$X(n) = \sum_{n=0}^{(m-1)\frac{N}{q}} x_{aq}(n) \cdot e^{-j \frac{2\pi k n}{(m-1)\frac{N}{q}}}. \quad (7)$$

На базі отриманої послідовності можна знайти спектр вузькосмугового сигналу, що зважений віконною функцією

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \omega_c(n) \cdot X(n) \cdot e^{-j \frac{2\pi \cdot n \cdot k}{N}}, \quad (8)$$

де $n = 0, 1, \dots, m-1$.

Як вагову функцію пропонується використовувати вікно Ханна [1]

$$\omega_c(n) = 0,5 - 0,5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right). \quad (9)$$

Вибір цієї функції зумовлений простотою її реалізації. Вона потребує для формування відліків лише операції множення на степені числа 2 і водночас забезпечує рівень паразитних складових сигналу — 31,5 дБ.

Дослідження ефективності цифрового методу спектрального аналізу

Критерієм ефективності запропонованого методу, який зручно оцінювати за числом операцій множення, є продуктивність. Узагальненням цього критерію є коефіцієнт продуктивності, який демонструє виграв у кількості необхідних «довгих» операцій множення у разі застосування методу багатоступового оброблення вибірок сигналу для знаходження його частотних складових відносно методу безпосереднього визначення спектра на базі алгоритмів ШПФ [8]:

$$G_S = \frac{C_{FFT}}{C_{DSA}}, \quad (10)$$

де C_{FFT} — кількість «довгих» операцій множення в безпосередньому аналізі спектра сигналу на базі алгоритмів ШПФ; C_{DSA} — кількість операцій множення в разі застосування запропонованого методу.

Оцінимо обчислювальну складність методів цифрового спектрального аналізу за числом «довгих» операцій множення. Для реалізації запропонованого методу спектрального аналізу вузькосмугових сигналів максимально необхідне число операцій множення дорівнює

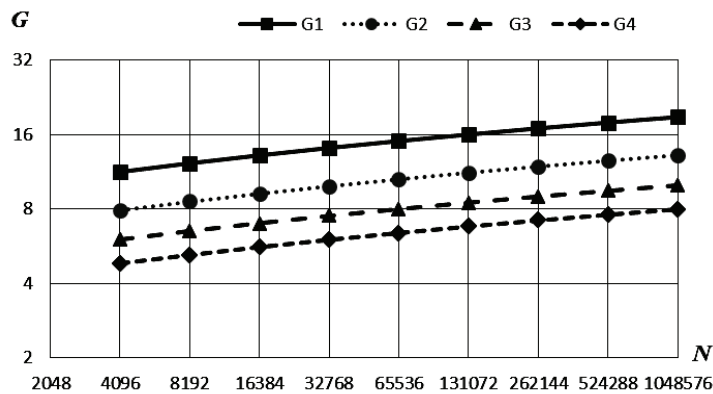
$$C_{DSA} = \frac{N}{2 \cdot q} \cdot \log_2 m + \frac{2N}{m \cdot q}. \quad (11)$$

Спектральний аналіз вузькосмугових сигналів на базі безпосереднього виконання ШПФ вимагає $2N \cdot \log_2 N$ операцій множення [3]. Окрім того, алгоритму ШПФ та реалізації запропонованого методу обов'язково передусє операція віконного зважування та формування масиву вхідних даних, яка виконується з використанням $3N-1$ мнужень [5]. Тоді коефіцієнт продуктивності запропонованого методу дорівнюватиме

$$G = \frac{q \cdot \log_2 N}{0,25 \cdot \log_2 m + \frac{1}{m}}. \quad (12)$$

Графік залежності коефіцієнта продуктивності від об'єму аналізованої вибірки сигналу для різного числа частотних компонентів показано на рисунку.

Верхня крива побудована для значення $m = 16$, а криві, що розташовані нижче, відповідають кількості частотних компонентів 64, 256 та 1024. Як випливає з графіків, продуктивність запропонованого методу підвищується зі збільшенням обсягу вибірки і дорівнює 5...8 для максимальної кількості досліджуваних частотних компонентів $m = 1024$. Зі зменшенням кількості досліджуваних складових спектра до 16 коефіцієнт продуктивності досягає максимальних значень, а саме дорівнює 12...22 залежно від об'єму аналізованої вибірки сигналу.



Залежність коефіцієнта продуктивності від об'єму аналізованої вибірки сигналу N для різної кількості частотних компонентів спектра

Таким чином, запропонований спектральний метод на базі багатоетапного цифрового оброблення масиву вибірок досліджуваного сигналу дає можливість суттєво скоротити час для визначення спектральних складових сигналу та забезпечити режим роботи спектроаналізатора у реальному масштабі часу.

Висновки

Запропоновано високопродуктивний метод цифрового спектрального аналізу вузькосмугових сигналів, який базується на процедурі багатоетапного цифрового оброблення масиву вибірок досліджуваного сигналу.

Аналіз ефективності цього методу підтвердив, що завдяки йому вдається підвищити продуктивність цифрового спектрального аналізу вузькосмугових сигналів у 5...22 рази залежно від об'єму аналізованої вибірки сигналу та числа досліджуваних частотних складових.

Метод можна використовувати у телекомунікаційних і радіотехнічних системах для спектрального аналізу вузькосмугових сигналів у режимі реального масштабу часу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения : пер. с англ. / С. Л. Марпл-мл. — М. : Мир, 1990. — 584 с. — ISBN 5-03-001191-9.
2. Рабинер Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов : пер. с англ. / Л. Рабинер, Б. Гоулд. — М. : Мир, 1978. — 848 с.
3. Оппенгейм А. Цифровая обработка сигналов : пер. с англ. / А. Оппенгейм, Р. Шафер. — М. : Техносфера, 2006. — 856 с. — ISBN 5-94836-077-6.
4. Бортник Г. Г. Цифровий метод спектрального оцінювання випадкових сигналів / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, О. В. Стальченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2014. — № 2. — С. 108—114.
5. Бортник Г. Г. Методи та засоби обробки високочастотних сигналів : моногр. / Г. Г. Бортник, В. М. Кичак. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998. — 132 с. — ISBN 966-7199-23-1.
6. Бортник Г. Г. Методи та засоби аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів : моногр. / Г. Г. Бортник, О. Г. Бортник, В. М. Кичак. — Вінниця : ВНТУ, 2013. — 128 с. — ISBN 978-966-641-537-3.
7. Бортник Г. Г. Методи та засоби підвищення ефективності оцінювання фазового дрижання сигналів у телекомунікаційних системах : моногр. / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, В. М. Кичак. — Вінниця : ВНТУ, 2015. — 140 с. — ISBN 978-966-641-621-9.
8. Бортник Г. Г. Методи та пристрої оцінювання характеристик імпульсно-кодових модуляторів широкосмугових сигналів: моногр. / Г. Г. Бортник, В. М. Кичак, Н. О. Пунченко. — Вінниця : ВНТУ, 2014. — 147 с. — ISBN 978-966-641-581-6.

Рекомендована кафедрою телекомунікаційних систем та телебачення ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 22.03.2016

Бортник Геннадій Григорович — канд. техн. наук, професор, професор кафедри телекомунікаційних систем і телебачення, e-mail: bgen88@gmail.com;

Бортник Олександр Геннадійович — аспірант кафедри телекомунікаційних систем і телебачення;

Стальченко Олександр Володимирович — канд. техн. наук, старший викладач кафедри телекомунікаційних систем і телебачення, e-mail: stal1978@mail.ru.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

G. G. Bortnyk¹
O. G. Bortnyk¹
O. V. Stalchenko¹

Method of Digital Spectral Analysis of Narrowband Signals

¹Vinnytsia National Technical University

There has been proposed the method for spectral analysis of digital narrowband signals based on Fast Fourier transformation. The advantage of this method is the high performance that enables spectral analysis in real time.

Keywords: digital spectral analysis, narrowband signals, performance, discrete Fourier transformation, real time.

Bortnyk Gennadii G. — Cand. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Telecommunication Systems and Television, e-mail: bgen88@gmail.com;

Bortnyk Olexandr G. — Post-Graduate Student of the Chair of Telecommunication Systems and Television;

Stalchenko Oleksandr V. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Telecommunication Systems and Television, e-mail: stal1978@mail.ru

Г. Г. Бортник¹
А. Г. Бортник¹
А. В. Стальченко¹

Метод цифрового спектрального анализа узкополосных сигналов

¹Винницкий национальный технический университет

Предложен метод цифрового спектрального анализа узкополосных сигналов на основе алгоритмов преобразования Фурье. Преимуществом метода является высокая производительность, дающая возможность выполнять спектральный анализ сигналов в реальном масштабе времени.

Ключевые слова: цифровой спектральный анализ, узкополосные сигналы, производительность, дискретное преобразование Фурье, реальный масштаб времени.

Бортник Геннадий Григорьевич — канд. техн. наук, профессор, профессор кафедры телекоммуникационных систем и телевидения, e-mail: bgen88@gmail.com;

Бортник Александр Геннадьевич — аспирант кафедры телекоммуникационных систем и телевидения;

Стальченко Александр Владимирович — канд техн. наук, старший преподаватель кафедры телекоммуникационных систем и телевидения, e-mail: stal1978@mail.ru