

**АПАРАТНО-ПРОГРАМНИЙ ЗАСІБ ПЕРВИННОГО ОБРОБЛЕННЯ  
ВУЗЬКОСМУГОВИХ РАДІОСИГНАЛІВ**

*У роботі представлено метод спектрального аналізу вузькосмугових радіосигналів (РС) на базі багатоступового цифрового оброблення масиву вибірок досліджуваного сигналу. При цьому з'являється можливість суттєво скоротити час для визначення спектральних складових РС та забезпечити режим функціонування засобів первинного оброблення РС у реальному масштабі часу.*

*Розроблено структуру апаратно-програмного засобу первинного цифрового оброблення РС, який характеризується широкою смугою робочих частот, мінімальними апаратними затратами та функціонує в реальному масштабі часу.*

*Ключові слова: радіосигнали, цифрове оброблення сигналів, спектральний аналіз*

G.G. BORTNYK, A.V. KOVALENKO, A.V. TYSCHENKO  
Vinnitsa National Technical University, Ukraine

**HARDWARE AND SOFTWARE TOOL PRIMARY  
PROCESSING NARROWBAND RADIO SIGNALS**

*The paper presents a method of high-performance digital spectral analysis of narrowband radio signals is based on the multistage procedure of processing digital samples of the signal array.*

*Analysis of the effectiveness of the proposed method confirmed that due to the developed method can improve the performance of digital spectral analysis of narrowband radio signals in 12-22 times depending on the volume of the analyzed sample signal and the number of the investigated frequency components.*

*The structure of hardware and software of the primary digital processing of narrowband radio signals characterized broad band operating frequencies, minimal hardware cost and operates in real time.*

*Key words: radio signals, digital signal processing, spectral analysis*

**Вступ**

Існуючі засоби первинного оброблення радіосигналів (РС) базуються на використанні методів цифрового оброблення сигналів (ЦОС), а саме – алгоритмів на базі швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) [1]. Сучасні цифрові засоби первинного оброблення РС, що використовують ШПФ, характеризуються високою точністю та роздільною здатністю. Разом з тим, при розв'язанні задач, пов'язаних зі спектральним аналізом вузькосмугових РС у телекомунікаційних і радіотехнічних системах, що функціонують у реальному масштабі часу, продуктивність існуючих методів і засобів ЦОС виявляється недостатньою [2, 3].

Останнім часом запропоновано декілька модифікованих методів спектрального аналізу на базі алгоритмів ЦОС, які було розроблено для того, щоб послабити обмеження за продуктивністю, що властиві цифровим спектральним методом [4, 5]. У режимі роботи в реальному масштабі часу необхідно здійснювати оброблення вузькосмугових РС, при якому не відбувається втрат відліків аналізованих сигналів і водночас не відбувається зростаючого від реалізації до реалізації їх накопичення. Незважаючи на певні результати, досягнуті у зазначених вище публікаціях, питання підвищення продуктивності цифрового спектрального аналізу вузькосмугових РС як і раніше залишається актуальним.

Наведена аргументація підтверджує своєчасність та актуальність поставленої науково-практичної задачі, розв'язання якої потребує розвитку методів та практичних положень для побудови засобів первинного оброблення вузькосмугових РС, які базуються на теорії ЦОС.

**Метою роботи є підвищення продуктивності засобів первинного оброблення радіосигналів за рахунок багатоступового оброблення вибірок досліджуваного сигналу.**

Для досягнення заданої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- виконати розробку методу спектрального аналізу вузькосмугових РС;
- здійснити аналіз ефективності методу спектрального аналізу вузькосмугових РС;
- розробити структурну схему апаратно-програмного засобу первинного оброблення РС.

**Метод цифрового спектрального аналізу вузькосмугових радіосигналів**

Слід зазначити, що до класу вузькосмугових сигналів відносяться РС на базі амплітудної, балансної та односмугової модуляції, а також групові сигнали систем зв'язку з частотним розділенням каналів. Для вузькосмугових РС, 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, що 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 РС у реальному масштабі часу. При фіксованій швидкодії обчислювального блоку значення  $T_{FFT}$  визначається числом операцій, необхідних для реалізації алгоритмів цифрового спектрального аналізу сигналів [6].

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

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

де  $x(n)$  – відліки сигналу;  $\omega(n)$  – 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 РС необхідно знаходити спектральні складові [6]:

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

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  $e^{-j \frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot n}{N}}$ , тобто

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

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 (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  $m$ :

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

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

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

де  $n = 0, 1, \dots, m-1$ .

Як вагову функцію пропонується використовувати вікно Ханна [2]:

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

Вибір цієї функції зумовлений простотою її реалізації. Вона потребує для формування відліків лише операції множення на степені числа 2.

#### Аналіз ефективності методу цифрового спектрального аналізу вузькосмугових РС

Критерієм ефективності запропонованого методу є коефіцієнт продуктивності, який демонструє вираш у кількості операцій множення при застосуванні методу багатоетапного оброблення вибірок сигналу для знаходження його частотних складових відносно методу безпосередньому визначення спектра на базі алгоритмів ШПФ [7]:

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

де  $C_{FFT}$  – кількість „довгих” операцій множення при безпосередньому аналізі спектра сигналу на базі алгоритмів ШПФ;  $C_{DSA}$  – кількість операцій множення при застосуванні запропонованого методу.

Оцінимо обчислювальну складність методів цифрового спектрального аналізу за числом «довгих» операцій множення. Для реалізації запропонованого методу спектрального аналізу вузькосмугових РС 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 РС на базі безпосереднього виконання ШПФ вимагає  $2N \cdot \log_2 N$  операцій множення. Окрім того, алгоритму ШПФ та реалізації запропонованого методу обов'язково передують операція віконного зважування та формування масиву вхідних даних, яка виконується з використанням  $3N - 1$  мнужень [3]. Тоді коефіцієнт продуктивності запропонованого методу дорівнює

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

Графік залежності коефіцієнта продуктивності від об'єму аналізованої вибірки сигналу для різного числа частотних компонентів представлено на рис. 1.

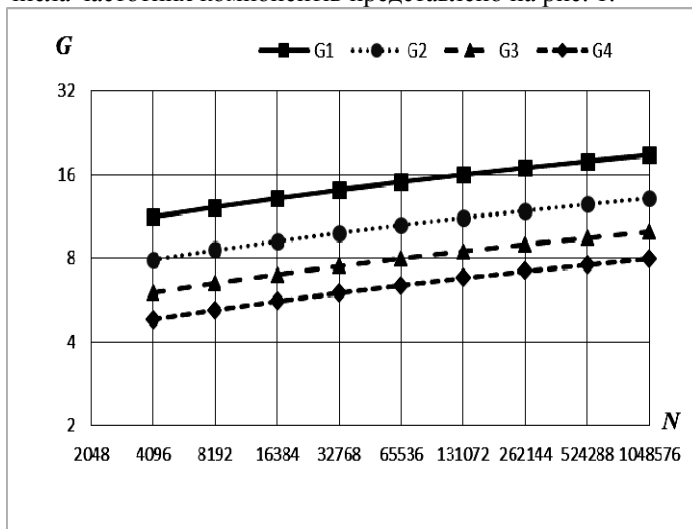


Рис.1. Залежність коефіцієнта продуктивності від об'єму аналізованої вибірки РС для різного числа частотних компонентів

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

Таким чином, запропонований метод дає можливість суттєво скоротити час для визначення спектральних складових РС та забезпечити режим роботи у реальному масштабі часу.

### Структура апаратно-програмного засобу первинного оброблення радіосигналів

Багатогранність цілей виконання досліджень РС, а також методів спектрального аналізу РС, зумовлюють формування великої кількості різних варіантів побудови засобів оброблення РС [4]. Найбільш раціональним способом реалізації засобів первинного цифрового оброблення вузькосмугових РС є апаратно-програмний. При цьому фіксування РС здійснюється в реальному часі без втрат інформації. А подальше передавання в ПК та їх оброблення здійснюється зі швидкостями, які визначаються потенціальними можливостями комп'ютерів. Структурна схема апаратно-програмного засобу первинного оброблення РС представлена на рис. 2.

Ця структура характеризується широкими функціональними можливостями і високою граничною частотою вхідного сигналу. Вхідний масив даних накопичується у буферному запам'ятовувальному пристрої (БЗП). Слід зазначити, що цикл запису БЗП не повинен перевищувати період дискретизації тракту аналого-цифрового перетворення (ТАЦП).

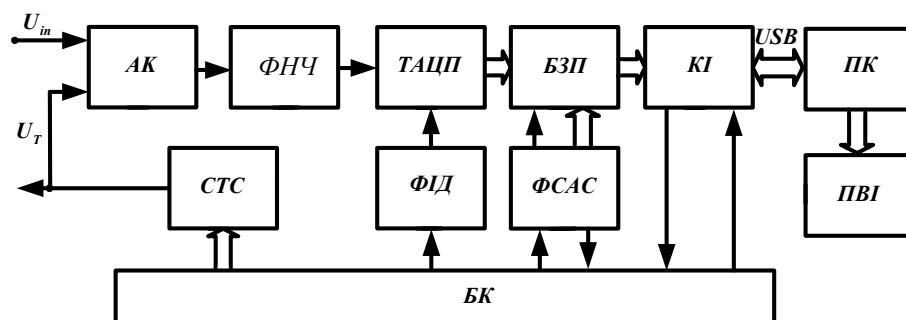


Рис.2. Структурна схема апаратно-програмного засобу первинного цифрового оброблення РС

Сигнал дискретизації надходить у ТАЦП з виходу формувача імпульсів дискретизації (ФІД). Сигнал синхронізації та адресні коди надходять на відповідні шини БЗП з виходу формувача сигналів адреси та синхронізації (ФСАС). Процес функціонування апаратно-програмного засобу складається з таких етапів: подача тестового сигналу на вхід пристрою, зняття вихідного сигналу та виділення РС, аналого-цифрове перетворення РС, накопичення масиву цифрових відліків РС, передавання їх у ПК, спектральний аналіз згідно запропонованого методу та отримання оцінок параметрів РС.

#### Висновки

Запропоновано метод спектрального аналізу вузькосмугових радіосигналів на базі багатоетапного цифрового оброблення масиву вибірок досліджуваного сигналу, що дає можливість суттєво скоротити час для визначення спектральних складових РС та забезпечити режим функціонування засобів первинного оброблення РС у реальному масштабі часу.

Розроблено структуру апаратно-програмного засобу первинного цифрового оброблення РС, який характеризується широкою смугою робочих частот, мінімальними апаратними затратами та функціонує в реальному масштабі часу.

#### Література

1. Рембовский А.М. Радиомониторинг – задачи, методы, средства / А.М. Рембовский, А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин. – М.: Телеком, 2010. – 624 с.
2. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов / Э. Айфичер, Б. Джервис. – М.: Вильямс, 2004. – 992 с.
3. Бортник Г.Г. Методи та засоби оцінювання параметрів абонентських ліній зв'язку / Г.Г. Бортник, В.М. Кичак, В.Ф. Яблонський. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 139 с.
4. Бортник Г.Г. Методи та засоби первинного цифрового оброблення радіосигналів / Г.Г. Бортник, М.В. Васильківський, В.М. Кичак. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – 168 с.
5. Бортник Г.Г. Метод оцінювання основних параметрів фазового дрижання в системах передавання даних / Г.Г. Бортник, М.В. Васильківський, О.В. Стальченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту.– 2010. – № 6. – С. 97-101.
6. Бортник Г.Г. Методи та засоби підвищення ефективності оцінювання фазового дрижання сигналів у телекомунікаційних системах / Г.Г. Бортник, М.В. Васильківський, В.М. Кичак. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 140 с.
7. Бортник Г.Г. Метод оцінювання детермінованих складових фазового дрижання у цифрових системах передавання/ Г.Г. Бортник, М.В. Васильківський, О.Г. Бортник. – Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.–2012, № 3.– С.45-48.

#### References

1. Rembovskiy A.M. Radiomonitoring – zadachi, metody, sredstva / A.M. Rembovskiy, A.V. Ashihmin, V.A. Kozmin. – M.: Telekom, 2010. – 624 s.
2. Ayficher E.S. Tsifrovay obrabotka signalov / E.S. Ayficher, B.W. Jervis. – M.: Williams, 2008. – 992 s.
3. Bortnyk G.G. Metody ta zasoby otsiniuvannia parametriv abonentskykh linii zviazku / G.G. Bortnyk, V.M. Kychak, V.F. Yablonskyi. – Vinnytsia : UNIVERSUM-Vinnytsia, 2006. – 139 s.
4. Bortnyk G.G. Metody ta zasoby pervinnogo tsifrovogo obroblyennya radiosignaliv / G.G. Bortnyk, M.V. Vasilkivskiy, V.M. Kychak. – Vinnitsya: VNTU, 2016. – 168 s.
5. Bortnyk G.G. Metod otsinyuvannya osnovnih parametriv fazovogo drizhannya v sistemah peredavannya danih / G.G. Bortnyk, M.V. Vasilkivskiy, O.V. Stalchenko // Visnik Vinnitskogo politechnichnogo institutu.– 2010. – № 6. – S. 97-101.
6. Bortnyk G.G. Metody ta zasoby pidvyshhennja efektyvnosti ocinjuvannya fazovogho dryzhannja syghnaliv u telekomunikacijnykh systemakh/ G.G. Bortnyk, M.V. Vasilkivskiy, V.M. Kychak. – Vinnitsya: VNTU, 2015. – 140 s.
7. Bortnyk G.G. Metod ocinjuvannya determinovanykh skladovykh fazovogho dryzhannja u cyfrovykh systemah peredavannya / G.G. Bortnyk, M.V. Vasilkivskiy, O.G. Bortnyk // Vymirjuvaljna ta obchysljuvaljna tekhnika v tekhnologichnykh procesakh.– 2012. – № 3. – S. 45-48.

Рецензія/Peer review : 19.5.2017 р.

Надрукована/Printed :20.6.2017 р.

Стаття рецензована редакційною колегією