

ЦИФРОВИЙ АНАЛІЗАТОР СПЕКТРА РАДІОСИГНАЛІВ

У роботі представлено метод спектрального аналізу радіосигналів на базі попереднього цифрового оброблення масиву вибірок досліджуваного сигналу. При цьому з'являється можливість суттєво підвищити розрізняльну здатність визначення спектральних складових радіосигналів та забезпечити режим функціонування засобів спектрального аналізу радіосигналів в умовно-реальному масштабі часу.

Розроблено структуру цифрового аналізатора спектра радіосигналів, який побудовано на базі апаратно-програмної реалізації та характеризується високою частотною роздільною здатністю і мінімальними апаратними затратами.

Ключові слова: радіосигнали, цифрове оброблення сигналів, спектральний аналіз, роздільна здатність

G.G. BORTNYK, A.V. KOVALENKO, S.O. BOLDINYUK

Vinnitsa National Technical University, Ukraine

DIGITAL ANALYZER OF THE RADIO SIGNALS SPECTRUM

In the paper, in order to increase the frequency separation of spectra of radio signals, it is proposed to use the partition of the input sequence to be studied in a number of segments. As a result of such an operation, the spectrum of the processed subsequence moves from the high-frequency range to the region of low frequencies. Preliminary processing of the signal makes it possible to reduce the volume of the processed sample of the signal in b times. The spectrum of the received signal realization is found by executing a discrete Fourier transformation (DFT). This transformation is repeated for each of the sub sequences of the radio signal. Finding the power spectrum by splitting the input signal into a series of subsequences with subsequent processing by means of a DFT increases the frequency resolution. It is proved that the frequency resolution of the spectral analysis of radio signals according to the proposed method depends on the size of the sample of the formed data sequences.

In order to improve the technical and economic indicators, the digital spectrum analyzer is implemented as an automated software and hardware complex based on a personal computer. Highly efficient processing algorithms are laid in the program part of the complex, and then they are executed with the help of a computer. The hardware approach is implemented with the help of high-speed blocks of pre-processing of radio signals.

The incoming radio signal under investigation through a broadband amplifier and a low pass filter, through which the formation of the characteristics necessary for further transformation, enters the fast-acting analog-to-digital converter (ADC). From the output of the ADC, the digital equivalent of the incoming radio signal is cleared and memorized in the buffer memory block, which is intended to temporarily reconcile the output of the converter with the following blocks of the complex. The algorithm for separating the spectrum of a signal into a series of narrowband implementations occurs in a digital filter unit.

Finishing procedures are performed using the digital spectrum calculator. The resulting data arrays are transmitted through the standard USB-3 interface to a computer where final processing and display of radio signal analysis results are performed. Such an automated software and hardware complex operates in a conditionally real time scale. That is, the input realization of the investigated radio signal is converted by means of ADC and is memorized in the buffer memory block without loss of information within the processing sample. Then the spectrum analyzer enters the mode of autonomous processing of the data array and the output of the obtained results. The developed digital spectrum analyzer is characterized by high frequency resolution and minimal hardware costs.

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

Вступ

Сучасні цифрові аналізатори спектра базуються на використанні методів цифрового оброблення сигналів, а саме – алгоритмів на базі дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) [1]. Цифрові спектроаналізатори, що використовують ДПФ, характеризуються високою точністю та широкими функціональними можливостями. Разом з тим, при розв'язанні задач, пов'язаних зі спектральним аналізом радіосигналів у телекомунікаційних і радіотехнічних системах, роздільна частотна здатність існуючих методів і засобів спектрального аналізу виявляється недостатньою [2].

Останнім часом запропоновано декілька модифікованих методів спектрального аналізу на базі алгоритмів ДПФ, які було розроблено для того, щоб послабити обмеження за роздільною здатністю по частоті [1, 3, 4]. Незважаючи на певні результати, досягнуті у зазначених вище публікаціях, питання покращення роздільної здатності цифрового спектрального аналізу радіосигналів 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 цифрового спектрального аналізу радіосигналів.

Метою роботи є підвищення частотної роздільної здатності засобів спектрального аналізу радіосигналів за рахунок попереднього оброблення вибірок досліджуваних сигналів.

Для досягнення заданої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- виконати розробку методу спектрального аналізу радіосигналів;
- здійснити дослідження роздільної здатності методу спектрального аналізу радіосигналів;
- розробити структурну схему цифрового аналізатора спектра радіосигналів;

Метод цифрового спектрального аналізу радіосигналів

Основною задачею спектрального аналізу радіосигналів є знаходження та подальше дослідження параметрів спектрів потужності часових реалізацій. Розвиток цифрових засобів обробки сигналів дав

поштовх до створення цифрових аналізаторів спектра, які за сукупністю вхідних вибірок N дають можливість оцінити спектри потужності радіосигналів на основі використання алгоритму ДПФ [1]

$$S(k) = \left| \sum_{n=1}^N x(n) W_N^{kn} \right|^2, \quad (1)$$

де $x(n)$ – дискретне значення сигналу в часовій області;

$$W_N^{kn} = e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} - \text{повертаючі множники.}$$

Реалізація алгоритмів цифрового спектрального аналізу радіосигналів обмежується низькою частотною роздільною здатністю f_L . Тобто, для досягнення малих значень f_L у випадку $f_M \gg f_L$, де f_M – максимальна частотна складова спектра досліджуваного сигналу, необхідно обробляти великі об'єми даних N , які відповідають одній часовій реалізації сигналу [2]. В цифрових спектроаналізаторах радіосигналів використовуються швидкодіючі буферні запам'ятовуючі пристрої з обмеженим об'ємом записуваної інформації, тому досягнення високої точності вимірювання параметрів частотних відліків згідно виразу (1) утруднюється [3].

З метою підвищення частотного розрізнення спектрів радіосигналів пропонується використовувати розбиття вхідної досліджуваної послідовності на ряд сегментів. Для цього вхідний сигнал за допомогою лінійки смугових фільтрів потрібно розділити на вузькосмугові підпослідовності. Операцію вузькосмугової фільтрації можна виконати за допомогою високодобротних аналогових фільтрів. Але для отримання заданих характеристик досліджуваних сигналів необхідно ускладнювати блоки попереднього оброблення аналізаторів спектра. Окрім того, аналогові фільтри мають нестабільні у часі характеристики, параметри яких в значній мірі залежать від впливу зовнішніх чинників [4].

У теперішній час в цифрових засобах оброблення радіосигналів використовують швидкодіючі аналого-цифрові перетворювачі [5, 6]. Використання швидкодіючих перетворювачів дозволяє виконувати безпосередньо дискретизацію радіосигналів, не застосовуючи аналогових пристроїв попереднього оброблення. Отриману після аналого-цифрового перетворення послідовність даних $x(n)$, де $n = 1, 2, \dots, N$, можна обробити за допомогою алгоритмів цифрової фільтрації так, що на виході цифрового фільтра формується послідовність $x(m)$, де $m = 1, 2, \dots, M$. Нехай вхідний сигнал розташований у такій смузі частот (рис. 1,а):

$$f_L \leq f \leq f_M, \quad (2)$$

де f_L – мінімальна частотна складова спектра.

Тоді після попереднього цифрового оброблення частотний діапазон оброблюваної послідовності лежить у смузі (рис 1,б)

$$\frac{a_1}{N} f_p \leq f_i \leq \frac{a_2}{N} f_p, \quad (3)$$

де f_p – частота перетворення сигналу;

a_1, a_2 – коефіцієнти, які залежать від числа оброблюваних сегментів даних.

Для заданих значень коефіцієнтів a_1, a_2 , число отриманих підпослідовностей сигналу можна обчислити як

$$b = \frac{a_2}{a_2 - a_1}. \quad (4)$$

Далі необхідно виконати перенесення спектрів оброблюваних підпослідовностей даних, які займають смугу частот, обчислену згідно (3).

Перенесення спектра по осі частот на величину L проводиться шляхом множення відліків сигналу

$$x(m) \text{ на відліки дискретної експоненти } e^{-j \frac{2\pi mL}{M}}, \text{ тобто}$$

$$y_i(m) = x(m) e^{-j \frac{2\pi mL}{M}}. \quad (5)$$

В результаті виконання такої операції спектр оброблюваної підпослідовності пересувається з високочастотного діапазону в область низьких частот (рис. 1,в).

Попередня обробка сигналу дає можливість зменшити об'єм оброблюваної вибірки сигналу в b разів. Спектр отриманої реалізації сигналу знаходиться шляхом виконання дискретного перетворення Фур'є

$$x_i(k) = b \sum_{m=1}^M y_i(m) e^{-j \frac{2\pi mL}{M}} W_M^{mk}. \quad (6)$$

Це перетворення повторюється для кожної з n_b підпоследовностей радіосигналу. Спектр потужності такого сигналу з урахуванням (1) дорівнює

$$S(k) = \frac{1}{n_b} \sum_{i=1}^{n_b} |x_i(k)|^2. \quad (7)$$

Таким чином, результуючий спектр сигналу має в досліджуваному частотному діапазоні згідно (3) таке розрізнення по частоті

$$f_I = \frac{f_p}{Mb}. \quad (8)$$

При цьому індекс n змінюється в межах від ba_1 до ba_2 .

У разі безпосереднього оброблення радіосигналу для оцінювання спектра потужності розрізняльна здатність по частоті для сталого об'єму вибірки N дорівнює

$$f_I \geq \frac{2f_M}{N}. \quad (9)$$

Знаходження спектра потужності шляхом розбиття вхідного радіосигналу на ряд підпоследовностей з подальшою їх обробкою згідно (5) – (7) дає таку частотну розрізняльну здатність

$$f_I \geq \frac{2f_M}{bM}. \quad (10)$$

Таким чином, частотна розрізняльна здатність спектрального аналізу радіосигналів згідно запропонованого методу залежить від обсягу вибірки сформованої підпоследовності даних.

Структура цифрового аналізатора спектра радіосигналів

Структурна схема цифрового аналізатора спектра радіосигналів на базі комп'ютера, який реалізує запропонований метод обробки, наведена на рис. 2. З метою покращення техніко-економічних показників цифровий спектроаналізатор реалізовано як автоматизований програмно-апаратний комплекс на базі персонального комп'ютера [6]. В програмну частину комплексу закладено високопродуктивні алгоритми обробки з подальшим їх виконанням за допомогою комп'ютера. Апаратний підхід реалізовано за допомогою швидкодіючих блоків попередньої обробки радіосигналів.

Вхідний досліджуваний радіосигнал через широкосмуговий підсилювач (ШСП) та фільтр нижніх частот (ФНЧ), за допомогою яких виконується формування необхідних для подальшого перетворення характеристик, надходить до швидкодіючого аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

З виходу АЦП знімається цифровий еквівалент вхідного радіосигналу та запам'ятовується в блоці буферної пам'яті (ББП), який призначено для часового узгодження виходу перетворювача з наступними блоками комплексу.

Безпосередня передача даних з АЦП на блоки цифрового оброблення сигналів неможлива, тому що останні функціонують зі швидкістю, яка в десятки разів нижча від частоти дискретизації АЦП [6]. Алгоритм розділення спектра сигналу на ряд вузькосмугових реалізацій відбувається в блоці цифрової фільтрації (БЦФ).

Процедури оброблення згідно виразів (6) та (7) виконуються за допомогою цифрового обчислювача спектрів (ЦОС). Отримані масиви даних з ЦОС завдяки адаптеру зв'язку (АЗ) передаються через стандартний інтерфейс USB-3 в комп'ютер, де виконується кінцеве оброблення та відображення результатів аналізу радіосигналів. Для синхронізації та забезпечення нормального функціонування всіх блоків та вузлів

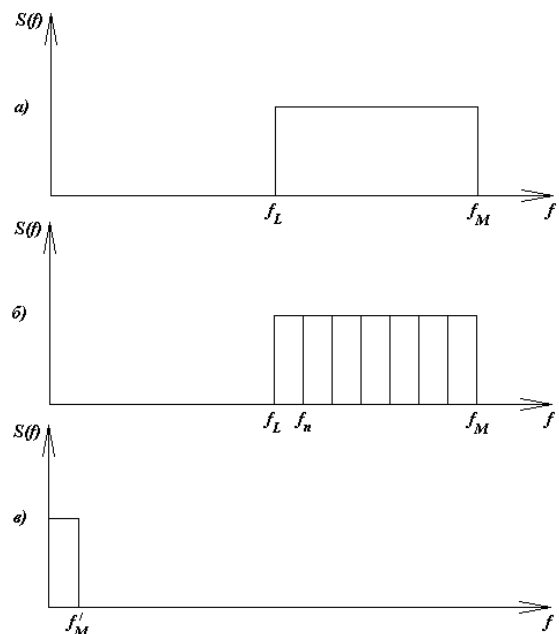


Рис. 1. Процедури попередньої обробки спектра досліджуваного радіосигналу

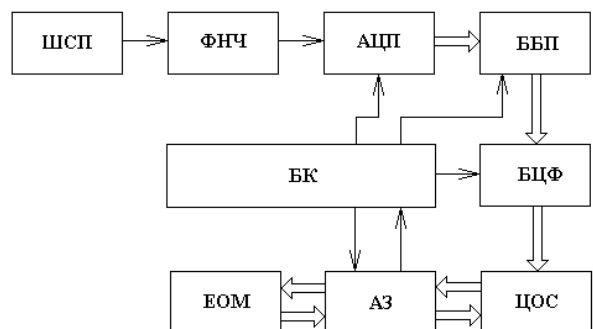


Рис. 2. Структурна схема цифрового спектроаналізатора на базі комп'ютера

цифрового спектроаналізатора служить блок керування (БК), який через АЗ виконує обмін керуючими сигналами з комп'ютером.

Такий автоматизований програмно-апаратний комплекс функціонує в умовно-реальному масштабі часу. Тобто, вхідна реалізація досліджуваного радіосигналу перетворюється за допомогою АЦП та запам'ятовується в ББП без втрати інформації у межах оброблюваної вибірки. Потім спектроаналізатор переходить в режим автономного оброблення масиву даних та видачі отриманих результатів.

Висновки

Запропонований метод цифрового аналізу спектрів радіосигналів дає можливість підвищити розділювальну здатність оцінювання частотних складових спектра за рахунок попереднього оброблення досліджуваних сигналів в часовій області без ускладнення буферних запам'ятовуючих пристроїв спектроаналізаторів. Завдяки цьому можлива програмно-апаратна реалізація цифрового спектроаналізатора на основі використання стандартного комп'ютера та недорогої елементної бази загальнотехнічного призначення.

Література

1. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов / Э. Айфичер, Б. Джервис. – М.: Вильямс, 2004. – 992 с.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Бортник Г.Г. Методи та засоби первинного цифрового оброблення радіосигналів / Г.Г. Бортник, М.В. Васильківський, В.М. Кичак. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – 168 с.

References

1. Ayficher E.S. Tsifrovay obrabotka signalov / E.S. Ayficher, B.W. Jervis. – M.: Williams, 2008. – 992 s.
2. Bortnyk G.G. Metody ta zasoby otsiniuvannya parametriv abonentskykh linii zviazku / G.G. Bortnyk, V.M. Kychak, V.F. Yablonskyi. – Vinnytsia : UNIVERSUM-Vinnytsia, 2006. – 139 s.
3. Bortnyk G.G. Metody ta zasoby pidvyshhennja efektyvnosti ociniuvannya fazovogho dryzhannja syghnaliv u telekomunikacijnykh systemakh/ G.G. Bortnyk, M.V. Vasilivskiy, V.M. Kychak. – Vinnitsya: VNTU, 2015. – 140 s.
4. Bortnyk G.G. Metod otsiniuvannya osnovnih parametriv fazovogo drizhannja v sistemah peredavannya danih / G.G. Bortnyk, M.V. Vasilivskiy, O.V. Stalchenko // Visnik Vinnitskogo politehnichnogo institutu. – 2010. – № 6. – S. 97-101.
5. Bortnyk G.G. Metody ta zasoby pervinnogo tsifrovogo obroblyennja radiosignaliv / G.G. Bortnyk, M.V. Vasilivskiy, V.M. Kychak. – Vinnitsya: VNTU, 2016. – 168 s.

Рецензія/Peer review : 11.06.2017 р.

Надрукована/Printed : 09.10.2017 р.

Стаття рецензована редакційною колегією