

С. С. Гаценко, К. М. Сапожников, І. В. Пазич, О. В. Гаєвський, С. В. Костінський

БАГАТОКАНАЛЬНИЙ РАДІОПРИЙМАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ІЗ РОЗШИРЕНИМ ЧАСТОТНИМ ДІАПАЗОНОМ ПРИЙМАННЯ

В умовах кризової ситуації на території України в східних регіонах ключове значення має моніторинг ситуації та її змін. У зв'язку з цим системи й засоби спостереження потребують модернізації для ефективного виконання завдань. У даний час у галузі розробки та проектування сучасних радіоприймальних пристроїв спостерігається стрімке зростання вимог до їх швидкодії, вартості, потужності живлення та спектральної ефективності.

У практиці ведення радіомоніторингу виникає суперечність між необхідністю забезпечення жорстких вимог до потужності споживання радіоприймального пристрою та розширенням діапазону приймання частот. Застосування аналого-цифрових перетворювачів, що перебудовуються з максимальною частотою дискретизації, недостатнє для розміщення всього діапазону центральних частот основного каналу прийому в нульовій смузі Найквіста. Зміна частоти дискретизації відповідно до частоти основного каналу приймання функціонально обмежує багатоканальність приймального тракту.

Найбільше вимогам до систем і засобів радіомоніторингу відповідають радіоприймальні тракти, побудовані на базі технології SDR [3], в основі якої лежить відцифровування радіосигналу в масштабі часу, наближеному до реального, і подальша цифрова обробка сигналів програмними або апаратними цифровими засобами: цифровими сигнальними процесорами або спеціалізованими системами на кристалі. Дана технологія дозволяє замінити величезне розмаїття наявних і розроблюваних конструкцій радіоприймачів і трансиверів, як серійних, так і передусім аматорських, побудованих за складною супергетеродинною схемою, на обмежену кількість доступних апаратних блоків, що працюють під управлінням. Це зумовить спрощення та здешевлення конструкцій, істотне поліпшення характеристик, підтримку будь-яких видів модуляції, появу великої кількості сервісних функцій, а також прискорить розробку. SDR технологію можна застосовувати в системах радіочастотного розпізнавання (RFID), які працюють на різних частотах і використовують різні протоколи.

У статті розглянуто спосіб приймання та оброблення радіосигналів для забезпечення найкращої вартості й ефективної потужності енергоспоживання багатоканального радіозв'язку в розширеному частотному діапазоні. Наведено структурну схему, що реалізує запропонований спосіб.

Ключові слова: *програмований радіоприймальний пристрій; частота дискретизації; смуга Найквіста; цифрова обробка сигналів; радіозв'язок; аналого-цифровий тракт; смуга приймання.*

Постановка проблеми в загальному вигляді. На даний час у галузі розробки та проектування сучасних радіоприймальних пристроїв спостерігається стрімке зростання

вимог до їх швидкодії, вартості, потужності живлення та ефективності [3, 4]. Найбільше їм відповідають радіоприймальні тракти, побудовані на базі технології SDR, в основі якої лежить відцифровування радіосигналу в реальному часі та подальша цифрова обробка сигналів (ЦОС) програмними або апаратними цифровими засобами: цифровими сигнальними процесорами або спеціалізованими системами на кристалі [5, 6].

Для усунення суперечності між необхідністю забезпечення жорстких вимог до потужності споживання радіоприймального пристрою та розширенням діапазону приймання частот застосовують аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), що перебудовуються, з максимальною частотою дискретизації, недостатньою для розміщення всього діапазону центральних частот основного каналу приймання (ОКП) в нульовій смузі Найквіста. Але зміна частоти дискретизації відповідно до частот ОКП функціонально обмежує багатоканальність приймального тракту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для розробки радіоприймальних пристроїв у більшості випадків застосовують оптимізаційні процедури побудови, що не потребують великих ресурсних затрат і забезпечують підвищення ефективності їх роботи. На даний час вирішенню даного науково-практичного завдання присвячено значну кількість наукових робіт [6–9].

Так, у роботі [4] визначено, що в разі переходу від аналогового до цифрового перетворення сигналів енергетичні втрати зростають, як і за цифрової узгодженої фільтрації, коли цифрова кореляційна обробка в реальному масштабі часу можлива лише для порівняно вузькосмугових сигналів.

У [8] зазначено, що під час вибору аналогового чи цифрового методу обробки сигналів у приймачі необхідно врахувати, що ЦОС слід застосовувати в разі складних алгоритмів роботи приймача, необхідності адаптації, запам'ятовування сигналу, прагнення отримати високі точності оцінки параметрів сигналу.

Формулювання завдання дослідження. У статті розглянуто спосіб приймання та оброблення радіосигналів для забезпечення ефективної вартості й потужності енергоспоживання багатоканального радіозв'язку в розширеному частотному діапазоні. Обґрунтовано ефективність застосування такого підходу. Наведено структурну схему, що реалізує запропонований спосіб.

Виклад основного матеріалу. У відомих варіантах побудови аналого-цифрового тракту (АЦТ) для приймання на частотах з безперервного діапазону, що перебиває кілька смуг Найквіста, здійснюється зміна частоти дискретизації одним із відомих способів [4, 10–11].

Розглянемо наведену на рис. 1 структурну схему радіоприймального пристрою, у якому застосовується метод зміни частотного режиму роботи АЦТ відповідно до частоти ОКП.

У такому АЦТ для формування частоти дискретизації застосовується її джерело, що переналаштовується, з діапазоном формованих частот, обмеженим інтервалом $[f_{d_{min}} \dots f_{d_{max}}]$, де частота дискретизації недостатня для розміщення всього діапазону центральних частот ОКП $f_{d_{min}} \dots f_{d_{max}}$ у нульовій смузі Найквіста.

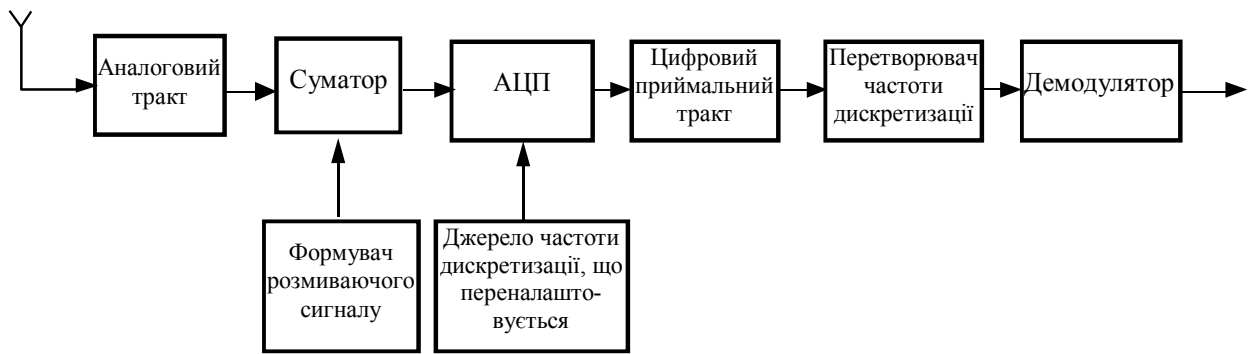


Рис. 1. Структурна схема АЦТ радіоприймального пристрою з джерелом частоти дискретизації, що переналаштовується в одній смузі Найквіста

Недоліками пристроїв такого типу є:

1) наявність функціональних обмежень на реалізацію багатоканального приймання в безперервному діапазоні робочих частот через необхідність перебудови частоти дискретизації для приймання на різних частотах;

2) необхідність використання джерела частоти дискретизації, яка перебудовується, знижує швидкість налаштування радіоприймального пристрою на частоту приймання, що знижує завадозахищеність радіолінії передачі інформації.

Тому реалізація ефективного за вартістю і потужністю споживання багатоканального радіоприймального пристрою з розширеним частотним діапазоном приймання без джерел частоти дискретизації, що переналаштовуються, є складним і актуальним завданням.

Для вирішення поставленого завдання пропонуємо розділити АЦТ на дві паралельні гілки з окремими АЦП у кожній і джерелами частоти дискретизації, що не переналаштовуються, чим забезпечується, по-перше, швидкість перебудови частот приймання, по-друге, можливість приймання в декількох каналах, розташованих у безперервному діапазоні частот, що перекриває кілька смуг Найквіста із заданим рівнем вибіркості за побічними каналами приймання (ПКП). Функціональну схему запропонованого приймача наведено на рис. 2.

Запропонований підхід працює в такий спосіб: радіочастотний сигнал надходить на вхід радіоприймального пристрою й одночасно проходить через окремі аналогові тракти, у яких відбувається його посилення та ослаблення сигналів на частотах відповідних ПКП. Далі з виходу аналогових трактів сигнал надходить на перші входи відповідних суматорів, на другі входи яких поступає сигнал з еквівалентних один одному виходів формувача розмиваючого сигналу. Після цього з виходів суматорів сигнал прямує на сигнальні входи першого та другого АЦП відповідно, на тактові входи яких надходять сигнали частоти дискретизації.

Для формування частоти дискретизації застосовуються окремі її джерела, що не переналаштовуються з частотами $f_{d_1} \geq f_{d_{max}}$ та $f_{d_2} \geq \frac{2f_{d_{max}}}{3}$, недостатніми для розміщення всього діапазону частот приймання $f_{ex_{min}} \geq f_{ex_{max}}$ у нульовій частоті Найквіста.

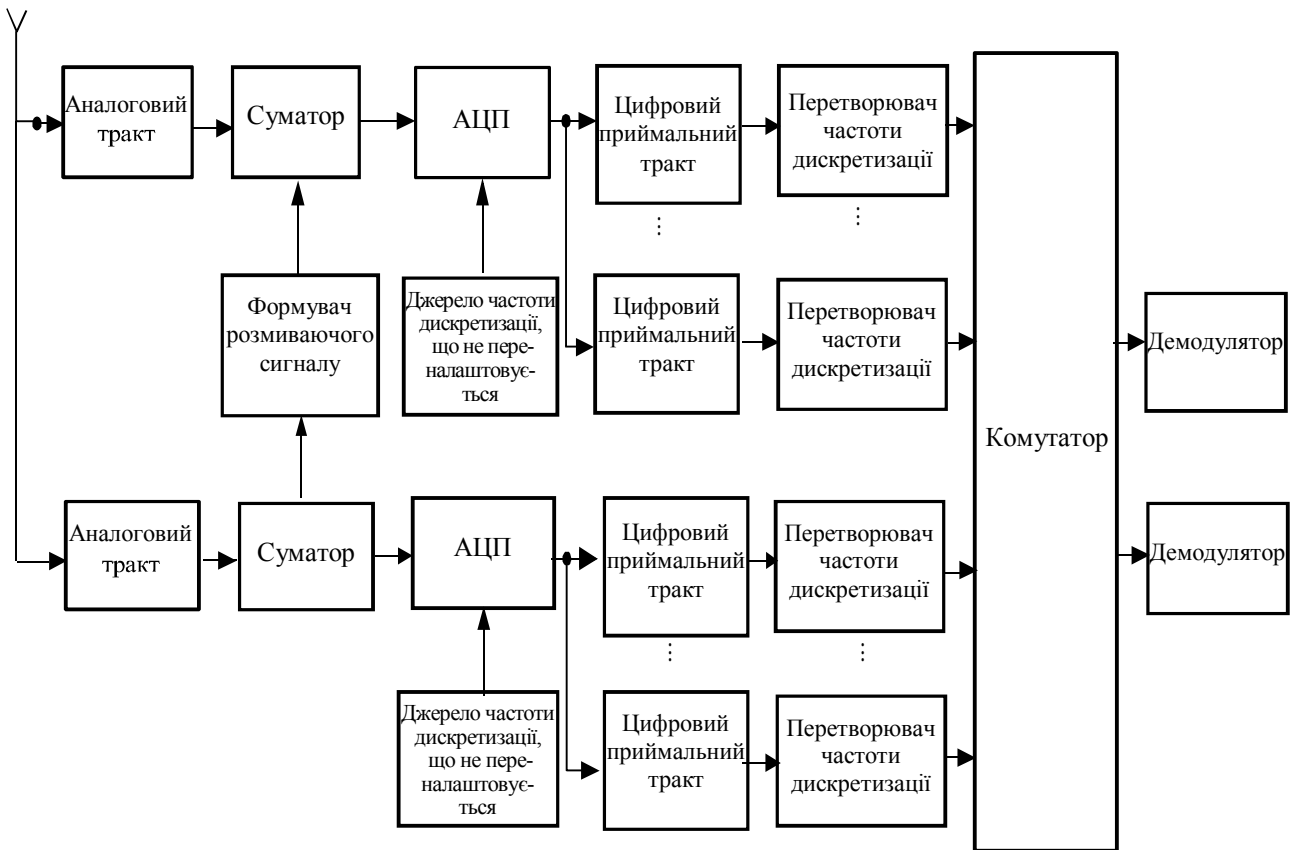


Рис. 2. Структурна схема АЦТ багатоканального радіоприймального пристрою з джерелами частот дискретизації, що не переналаштовуються, і безперервним діапазоном робочих частот, який перекиває більше однієї смуги Найквіста

Квантовані відліки сигналу після першого АЦП одночасно надходять у N цифрових приймальних трактів першого каналу з частотами налаштування, вибраними в частотному діапазоні $f_{ex_min} \geq \frac{5}{12} f_{d_max}$ або $\frac{7}{12} f_{d_max} \geq f_{ex_min}$, а після другого АЦП – до K цифрових приймальних трактів другого каналу з частотами налаштування, вибраними в частотному діапазоні $\frac{5}{12} f_{d_max} \geq \frac{7}{12} f_{d_max}$, де здійснюється фільтрація, перенесення сигналу на нульову частоту і децимація зниження частоти дискретизації до відповідного значення. Потім сигнал проходить через відповідні перетворювачі частоти дискретизації, у яких здійснюється приведення частоти дискретизації цифрового сигналу до відповідного фіксованого значення та забезпечується заданий динамічний діапазон. Далі перетворені сигнали комутуються на відповідні M демодуляторів, у яких ухвалюється рішення про приймання сигналу.

Безперечними перевагами такої реалізації пристрою є можливість багатоканального приймання в безперервному діапазоні робочих частот, що перекиває більше однієї смуги Найквіста, і збільшення швидкості налаштування радіоприймального пристрою на частоти приймання, оскільки в ньому застосовуються джерела частот дискретизації, що не переналаштовуються.

Висновки. Отримані результати дозволяють реалізувати радіоприймальні пристрої, що здійснюють приймання сигналів у кількох каналах, розташованих у безперервному діапазоні частот, що перекриває більше однієї смуги Найквіста, без необхідності перебудови частот дискретизації залежно від частоти приймання, що, без сумніву, позитивно впливає на швидкодію, вартість та потужність споживання.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / Под ред. д-ра техн. наук А. М. Рембовского. 3-е изд. Москва, 2012. 640 с.
2. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория : справочник / Я. Д. Ширман, С. Т. Багдасарян, А. С. Маляренко и др. ; под ред. Я. Д. Ширмана. Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва : Радиотехника, 2007. 510 с. : ил.
3. RTL – SDR приймач. URL: <https://habr.com/ru/post/373465/> (дата звернення 27.04.2020).
4. Технологія SDR. URL: <https://multicore.ru/index.php?id=20> (дата звернення 21.10.2021).
5. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. Москва : Изд. дом «Вильямс», 2003. 1104 с.
6. Баева Н. Н. Многоканальная электросвязь и РРЛ. Москва : Радио и связь, 1998. 312 с.
7. Основы побудови радіолокаційних засобів розвідки повітряного простору : конспект лекцій / К. С. Васюта, О. В. Тесленко, В. М. Купрій, О. А. Малишев. Харків : ХУПС, 2013. 212 с.
8. Горшелев В. Д., Красноцветова З. Г., Федорцев Б. Ф. Основы проектирования. Ленинград : Энергия, 1977. 384 с.
9. Справочник по проектированию приёмноусилительных устройств / М. К. Белкин и др. Київ : Вища школа, 1988. 472 с.
10. Радиоприемные устройства / Н. Н. Фомин, Н. Н. Буга, О. В. Головин ; под ред. Н. Н. Фомина. Москва : Радио и связь, 2003. 520 с.
11. Марков Ю. В., Боков А. С. Проектирование устройств приема и обработки сигналов : учеб-метод. пособ. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. 112 с.

Стаття надійшла до редакції 24.11.2021.

REFERENCES

1. Rembovskii, A. M., Ashikhmin, A. V., & Koz'min, V. A. (2012). *Radiomonitoring: zadachi, metody, sredstva* [Radio monitoring: tasks, methods, means]. A. M. Rembovskii (Ed.). (3d ed.). Moscow [in Russian].
2. Shirman, Ia. D., Bagdasarian, S. T., & Maliarenko, A. S. et al. (2007). *Radioelektronnye sistemy. Osnovy postroeniia i teoriia : spravochnik* [Radioelectronic systems. Fundamentals of construction and theory: a reference book]. Ia. D. Shirman (Ed.). (2nd ed.). Moscow [in Russian].
3. *RTL – SDR pryimach* [RTL – SDR receiver]. (n.d.). Retrieved from <https://habr.com/ru/post/373465/> [in Ukrainian].

4. *Tekhnolohiia SDR [SDR technology]*. (n.d.). Retrieved from <https://multicore.ru/index.php?id=20> [in Ukrainian].
5. Skliar, B. (2003). *Tsifrovaia sviaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie [Digital communication. Theoretical foundations and practical application]*. (2nd ed.). Moscow [in Russian].
6. Baeva, N. N. (1998). *Mnogokanal'naia elektrosviaz' i RRL [Multichannel telecommunications and RRL]*. Moscow [in Russian].
7. Vasiuta, K. S., Teslenko, O. V., Kuprii, V. M., & Malyshev, O. A. (2013). *Osnovy pobudovy radiolokatsiinykh zasobiv rozvidky povitrianoho prostoru : konspekt lektsii [Fundamentals of construction of radar means of airspace reconnaissance: lecture notes]*. Kharkiv: KNAFU [in Ukrainian].
8. Gorshelev, V. D., Krasnotsvetova, Z. G., & Fedortsev, B. F. (1977). *Osnovy proektirovaniia [Basics of design]*. Leningrad [in Russian].
9. Belkin, M. K. et al. (1988). *Spravochnik po proektirovaniu priemnouselitel'nykh ustroystv [Receiver Design Handbook]*. Kyiv [in Russian].
10. Fomin, N. N., Buga, N. N., & Golovin, O. V. (2003). *Radiopriemnye ustroystva [Radio receivers]*. N. N. Fomin (Ed.). Moscow [in Russian].
11. Markov, Iu. V., & Bokov, A. S. (2015). *Proektirovanie ustroystv priema i obrabotki signalov [Designing devices for receiving and processing signals]*. Ekaterinburg [in Russian].

S. S. Hatsenko, K. M. Sapozhnykov, I. V. Pazykh, O. V. Haievskyi, S. V. Kostinskyi
MULTICHANNEL RADIO RECEIVING DEVICE WITH EXTENDED RECEIVING FREQUENCY RANGE

In the context of the crisis situation on the territory of Ukraine in the eastern regions of the country, monitoring the situation and its changes is of key importance. As a result, monitoring systems and tools are subject to new requirements for speed and efficiency. Currently, in the field of development and design of modern radio receivers there is a rapid increase in requirements for their speed, cost, power supply and spectral efficiency [1]. In the practice of radio monitoring, there is a contradiction between the need to ensure strict requirements for the power consumption of the radio receiver and the expansion of the frequency reception range. The use of tunable digital-to-digital converters (ADCs) with a maximum sampling rate insufficient to accommodate the entire center frequency range of the main reception channel in the zero band of Nyquist [2]. Changing the sampling rate according to the frequency of the main reception channel functionally limits the multichannel reception path due to the need to use different sampling frequencies for reception at different frequencies. Most of the requirements for radio monitoring systems and means are met by radio receiving paths based on SDR technology [3], which is based on digitization of the radio signal in the time scale close to real and further digital signal processing (DOS) software or hardware digital - digital digital signal processors or specialized systems on the chip. This technology allows you to replace the huge variety of existing and developed designs of radios and transceivers, both serial and, above all, amateur, built on a complex superheterodyne scheme, a limited number of available hardware

units operating under control. This will simplify and reduce the cost of design, significantly improve performance, support all kinds of modulation, the emergence of a large number of service functions, as well as speed up development. SDR technology can be used in radio frequency recognition (RFID) systems that operate at different frequencies and use different protocols. The article considers the method of reception and processing of radio signals to ensure the effective cost and power consumption of multi-channel radio communication in the extended frequency range. The effectiveness of such an approach is substantiated. The block diagram that implements the proposed method is presented.

Keywords: *programmable radio receiving device; sampling frequency; Nyquist band; digital signal processing; radio communication; analog-digital path; reception lane.*