

Гарист А.В.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

Білевська О.С.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ПРИЙМАЧІВ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ ПРОГРАМНО-ОБУМОВЛЕНОГО РАДІО

Використання і застосування приймальних пристроїв для вирішення різноманітних завдань у сучасних умовах потребує уніфікації обладнання, тобто можливості використання для різних завдань і цілей. Спочатку всі приймальні пристрої створювалися з окремих компонентів, які склалися у блоки та виконували певні математичні перетворення сигналу, що приймався антеною для отримання корисного сигналу на виході. Наприклад, супергетеродинний приймач здійснює попереднє підсилення сигналу, перетворення частоти, фільтрацію отриманого сигналу смуговим фільтром та декодування сигналу.

Незважаючи на аналогову елементну базу, проектування складного радіоелектронного пристрою подібне до проектування програмної системи, тобто ми розбиваємо систему на функціональні блоки, а блоки на підблоки, поки не дійдемо до елементарних операцій, таких як підсилення, фільтрація, детектування та інших.

Нині є можливість спочатку перетворити сигнал із антени у цифрову форму, а потім здійснити перераховані операції на цифрових процесорах. Водночас проектування систем можна здійснювати як за допомогою блок-схем, так і різноманітних мов програмування.

У зовсім недавньому минулому бездротові радіосистеми мали таку конструкцію, що пристрій підтримував один або два типи сигналу і між собою могли зв'язуватися тільки однотипні пристрої, що було і є сильним обмеженням і значно ускладнювало організацію зв'язку між різнотипними пристроями. Через те постійно відчувалася потреба у гнучкій архітектурі, яка могла б змінюватися за допомогою програмного забезпечення.

Технологія програмно-обумовлених радіосистем (Software Defined Radio) — це відносно нове слово у галузі розроблення бездротових пристроїв. Суть технології програмно-обумовленого радіо (далі — ПОР) полягає в тому, що базові параметри приймально-передавального пристрою визначаються саме програмним забезпеченням, а не апаратною конфігурацією, яку ми звикли бачити у класичних конструкціях. Йдеться не тільки про радіочастотні параметри систем, такі як вид модуляції, потужність високочастотного сигналу, чутливість, вибірковість, пригнічення гармонік, яке можна зробити за допомогою комутації відповідних вузлів приладу, але і про протокольну частину. Ми можемо спостерігати повне переродження апаратури, яка раніше могла виконувати тільки одну суворо задану функцію. Наприклад, вид модуляції передавача управляється вбудованим мікроконтролером. Відповідно і приймач для демодуляції сигналу також використовує програмні засоби. Це актуально для безлічі вузлів пристроїв бездротового інтерфейсу, для підсистем модулювання і кодування, аналого-цифрового і цифро-аналогового перетворення.

Ключові слова: Програмно-обумовлене радіо, аналогово-цифровий перетворювач, цифро-аналоговий перетворювач, цифровий сигнальний процесор, супергетеродинний приймач, проміжна частота, цифрова обробка сигналу, ФНЧ, Software Defined Radio.

Постановка проблеми.

Сучасне використання радіопристроїв вимагає уніфікації обладнання задля забезпечення можливості їх застосування під час виконання різних задач і цілей. Пристрої зв'язку, в яких передбачена можливість зміни робочого діапазону, типу модуляції, стандарту зв'язку і низки інших параметрів, можна назвати справжньою панацеєю у нинішній ситуації,

коли ми маємо декілька різних стандартів і технологій, націлених на різні додатки, та безліч найчастіше несумісного радіообладнання. Технологія ПОР створена для вирішення проблем несумісності і дозволяє створювати уніфіковані багатофункціональні бездротові пристрої із великим терміном служби.

Термін ПОР має розмите значення, але зазвичай він використовується для позначення

радіоприймачів і передавачів, основні параметри яких визначаються програмним забезпеченням і основні аспекти роботи яких змінюються за допомогою внесення змін у програмне забезпечення. Таке визначення прийнято міжнародною організацією з питань програмованого радіо під назвою SDR Forum [1], сформованою у 2001 році. До неї увійшли традиційні лідери галузі розробників, а саме Fujitsu, Intel, Motorola, NEC, Samsung, Siemens та інші.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Дослідження проблемних питань створення приймачів на основі технології ПОР здійснювали такі вітчизняні науковці, як І.В. Пампуха, С.В. Бурий, В.В. Пусан [9], М.М. Охрамович, В.В. Шевченко, О.І. Кравченко [10] та інші.

Серед закордонних досліджень заслуговують на увагу праці А. Виглінського [7], Ю. Грейвера [8], П. Кенінгтона [3] та інші.

Водночас, незважаючи на значну кількість наукових публікацій, присвячених методам і принципам побудови ПОР пристроїв, дослідження з метою створення вітчизняного виробництва не проводилися. Стрімкий розвиток технологій дозволяє вдосконалювати компоненти для цифрової обробки та перетворення сигналу, що зумовлює потребу у подальших дослідженнях цієї тематики.

Постановка завдання.

Метою роботи є розгляд питання про засади і принципи побудови приймачів на основі застосування компонентів технологій ПОР. Основним призначенням приймачів на основі ПОР є постійний або періодичний контроль завантаженості ефіру в широкому діапазоні частот, виявлення та аналіз нових випромінювань, виявлення випадкових або спеціально організованих радіоканалів витоку інформації.

Виклад основного матеріалу дослідження.

ПОР-система є однією із форм приймача-передавача, в якому всі аспекти його роботи обумовлені за допомогою універсальних апаратних засобів загального призначення, що конфігуруються програмно. В ідеальному вигляді ПОР-пристрій повинен складатись із аналогово-цифрового перетворювача (далі – АЦП), цифро-аналогового перетворювача (далі – ЦАП), антени і пристрою цифрової обробки сигналів (рис. 1).

На рисунку 1 відображено основний принцип побудови ПОР-системи, а саме мінімальна кількість апаратних модулів. ПОР-система містить блоки

аналого-цифрового, цифро-аналогового перетворення, антени, ланцюги обробки цифрових сигналів та інші допоміжні блоки.

За створення ідеального ПОР-приймача прямо до антени підключається АЦП, під'єднаний до ПЕОМ. У такому випадку програмне забезпечення, встановлене на ПЕОМ, забезпечувало б обробку потоку даних, який надходить на нього, і перетворювало у необхідну форму. Ідеальний ПОР-передавач працював би аналогічно, але у зворотному напрямку. Цифровий сигнальний процесор генерує потік чисел, що надходять на вхід ЦАП, вихід якого підключається прямо до антени [3].

Наведена ідеальна схема не може бути реалізованою за технічних обмежень. Основне обмеження полягає у перетворенні сигналу з аналогової форми у цифрову і зворотне перетворення, причому ці перетворення повинні відбуватись одночасно з високою швидкістю і точністю, без появи перешкод і без допомоги електромагнітного резонансу.

Тому на практиці застосовуються більш складні схеми. Доступні АЦП ще не мають достатньої швидкості для роботи в широкій смузі радіоспектру або достатнього динамічного діапазону, щоб оперувати сигналами, які мають велику різницю за рівнями.

Нині втілення ПОР-системи можливе поки що лише на дуже низьких частотах (десятки кілогерц), тому у реальних пристроях проблема високоякісної обробки ВЧ-сигналів вирішується шляхом їх перенесення на низьку частоту, для чого використовується змішувач та опорний генератор. Отже, нам потрібно знайти певне аналогове обладнання для спрямування частини спектру частот на оброблення у ПЕОМ. У професійних ПОР-системах аналогова частина будується зазвичай за супергетеродинним принципом, а в аматорських пристроях широке застосування знаходить принцип прямого перетворення [4]. Отже, можна визначитися, що існують два найпопулярніших принципи побудови ПОР-приймачів: на основі супергетеродинного приймача і приймача прямого перетворення. Кожна схема має переваги та недоліки. Основні переваги приймача прямого перетворення – це простота і відсутність бічних каналів, які виникають

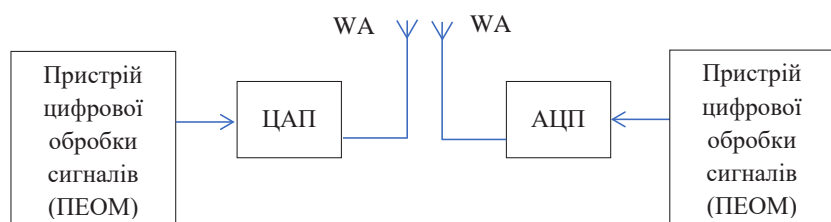


Рис. 1. Структурна схема ідеальної ПОР-системи

за наявності проміжної частоти. Супергетеродинний приймач не має цих переваг, проте має кращу вибірковість. Окрім того, існує істотне обмеження можливостей АЦП, пов'язане зі смугою перестроювання ПОР-приймача. Наприклад, за здійснення ПОР на ПЕОМ зі звуковою картою із частотою дискретизації 44100 Гц смуга перестроювання становитиме близько 20 кГц.

У традиційному супергетеродинному приймачі обробка сигналу повністю виконується електронними схемами. Структурна схема супергетеродинного приймача представлена на рис. 2. Частота сигналу знижується до проміжної частоти (далі – ПЧ), після чого проводиться обробка.

Проте цей метод оброблення сигналу має і недолік – наявність бічних дзеркальних каналів приймання. Попередня селекція за входом у разі такої будови радіоприймача має тепер основне завдання – пригнічення дзеркальних каналів приймання.

Окрім того, побічними наслідками застосування класичної структури побудови радіоприймального тракту з однією або декількома ПЧ є підвищений рівень шумів на виході радіоприймача; це шуми всіх напівпровідникових елементів тракту. Чим більше у тракці елементів перетворення і підсилення, тим, відповідно, вищим є рівень шумів на виході. Сюди ж додаються шуми синтезаторів та інших генераторів. Застосування автоматичного регулювання підсилення слабо впливає на загальний шум тракту, оскільки кількість елементів підсилення і пере-

творення залишається постійною. Позбутися більшості описаних вище проблем дозволили методи прямого перетворення сигналів із радіодіапазону у спектр звукових частот і обробка кінцевого сигналу фазовим способом. Спочатку цей метод не знайшов широкого розвитку за аналогової будови приймачів унаслідок складності втілення. Із поширенням цифрової техніки та алгоритмів цифрової обробки сигналу (далі – ЦОС) у тракці обробки ПЧ почали застосовувати мікропроцесори, що дозволило значно покращити якість основної селекції сигналу (полоса фільтру – від 50 Гц, рівень пригнічення сусіднього каналу – до 100 дБ) і ввести безліч додаткових корисних функцій, починаючи з очищення спектру сигналу, що приймається, від шумів і завад, до декодування цифрових видів модуляції.

У перших ПОР-приймачах замість демодуляторів використовувався АЦП. Демодуляція і частково фільтрація виконувались у цифровому сигнальному процесорі (Digital Signal Processor – DSP). Супергетеродинні приймачі поділяються на приймачі з аналоговою проміжною частотою і програмованою проміжною частотою.

Структурна схема сучасного ПОР-приймача прямого перетворення представлена на рис. 3.

Вхідний сигнал підсилюється малошумним підсилювачем (МШП) та поділяється на компоненти I та Q шляхом змішування сигналу із гетеродину синтезатора частот із фазовим авто-

підстроюванням частоти. Задля отримання квадратурної компоненти він змішується на 90° . Частота гетеродину підстроюється під частоту сигналу для того, щоб різниця вихідних сигналів змішувача дорівнювала нулю за відсутності модуляції. Для модульованого сигналу вона дорівнює сигналу основної смуги або вихідному модульованому сигналу. Ця побудова отримала назву прямого перетворення або перетворення з нульовою проміжною частотою. Після фільтрації сигналів основної смуги фільтри нижніх частот (далі – ФНЧ) оцифровуються у АЦП. Далі за допомогою перетворювача частота сигналу знижується до робочого діапазону сигнального процесора. Для роботи процесора потрібно знати амплітуду і

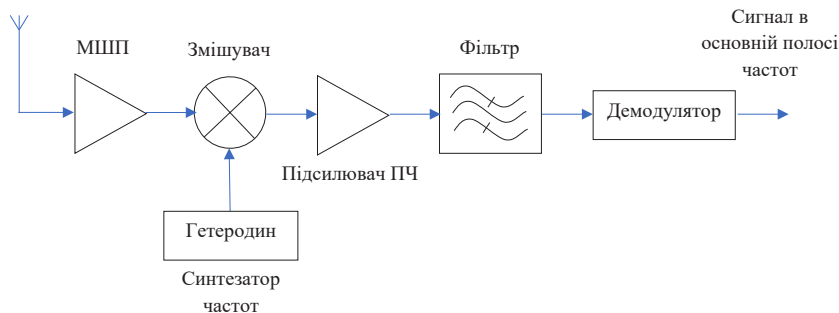


Рис. 2. Структурна схема супергетеродинного приймача

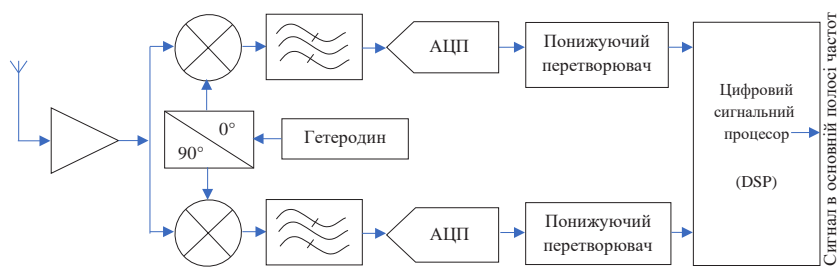


Рис. 3. Структурна схема сучасного ПОР приймача

фазу сигналів. Прийнятий сигнал ділиться на два компоненти: синфазну (I) та квадратурну (Q).

Реалізація I та Q сигналів можлива як в аналоговій частині, так і цифровими засобами. Частіше обирають варіант реалізації I/Q сигналів в аналоговій частині, адже таким чином вдається розширити смугу передачі сигналу. Для цифрової системи обробки можна розширити смугу прийому так, щоб частота дискретизації як мінімум удвічі перевищувала частоту сигналу, що дискретизується, тобто АЦП зможе відтворити лише ті сигнали, які вдвічі є нижчими за його частоти дискретизації. Якщо використовувати технологію приймача з одним АЦП, отже, із цифровим виділенням I/Q сигналів, то смуга буде вдвічі нижчою за частоту АЦП.

Проте, якщо використовувати реалізацію приймача з аналоговим виділенням I/Q сигналів (два АЦП), то частота прийому стає рівною частоті дискретизації АЦП. Це стає можливим саме завдяки I/Q сигналам, адже вони представляють собою компоненти того ж самого сигналу, проте зсунуті за фазою на 90° . Якщо обидва АЦП пов'язані за такою частотою, то під час надходження сигналу беруться одночасно відліки за I і Q сигналами. Отже, за кожен такт дискретизації береться відлік того ж самого сигналу. Відлік – це рівень одного сигналу, зсунутий за фазою (у часі). Так ми отримуємо смугу частот, рівну частоті АЦП.

Для реалізації ПОР приймача на базі персонального комп'ютера логічно застосовувати схеми супергетеродинного приймача із програмною проміжною частотою. Апаратна частина дозволить здійснювати настроювання в широкому діапазоні частот, а програмний гетеродин буде відповідати за точне підстроювання сигналу. Крім того, варто відзначити, що у більшості ПОР-приймачів відбувається обробка синфазного (I) і квадратурного сигналів (Q), саме тому перед ЦОС у всіх схемах сигнал спочатку розділяється на I і Q компоненти.

Основними перевагами ПОР-приймачів є такі:

1) панорамний огляд ефіру. Це досить зручно як у плані наочності, так і у плані пошуку нових сигналів. На екрані одразу видно корисні сигнали, перешкоди, нові та особливо короткі сигнали, сигнали зі швидко змінюваною частотою;

2) цифрові фільтри і звукові ефекти, що регулюються. У ПОР усі фільтри задаються математично, тому будь-яку ширину фільтра можна встановити у налаштуваннях. Прямокутність фільтрів теж може бути практично ідеальною – математично можна вибрати будь-який порядок фільтрів. Усе обмежено лише алгоритмом. Аналогічно можуть задаватися

налагодження шумозаглушення, коефіцієнти автоматичного регулювання підсилення та інше;

3) можливість вимірювань отриманого сигналу. За допомогою ПОР можна візуально відображати рівні різних випромінювань у децибелах, проводити оцінку перешкод, якості сигналу та багато іншого. Всі недоліки свого або чужого сигналу відмінно видно у спектрі. Окрім того, можна використовувати ПОР-приймач як аналізатор спектру;

4) широкопasmовою обробка сигналу: ПОР дозволяє здійснювати приймання сигналу в широкому діапазоні частот (декілька МГц);

5) приймання і передавання практично будь-яких видів модуляції. Оскільки обробка сигналів здійснюється на ПЕОМ, тому обчислювальні можливості обмежені лише наявністю потрібних декодерів. Нині існує багато відкритих протоколів декодерів, такі як AM, FM, WFM, DRM, DAB+, TETRA та інші;

6) широкопasmовий запис і відтворення. У ПОР усі дані пишуться у цифровому вигляді, тому є можливість записати всю смугу відразу і повністю для прослуховування або подальшого аналізу. В одному записі може розміститися смуга частоти, яка містить одразу кілька радіовипромінювань;

7) віддалена робота. Деякі ПОР-приймачі і трансивери мають можливість доступу за IP-адресою. Бітрейт передавання даних потрібно налаштувати відповідно до ширини інтернет-каналу.

Основними недоліками ПОР-приймачів є такі:

1) стаціонарна робота. ПОР – це фактично стаціонарний настільний прилад, брати його із собою вельми незручно і некомфортно;

2) ціна. Вартість якісних ПОР починається від 500 у.о. через те, що в них застосовані надшвидкі АЦП і програмовані логічні інтегральні схеми, малозумні каскади на вході, багатошарові друковані плати, якісні фільтри та інше. Професійні приймачі (USRP, Winradio) коштують від 1500 у.о. і вище;

3) енергоспоживання і процесорні вимоги. Для якісної роботи ПОР потрібно мати ПЕОМ із потужними процесором і відеокартою. Струм споживання під час роботи становить від 1 А до 2 А.

Висновки.

Отже, ПОР-приймач є універсальним пристроєм, який може поєднувати функції різноманітних радіопристроїв. Дотримуючись концепції ПОР, ідеальний ПОР-приймач повинен містити у своєму складі як можна менше елементів. Важливим фактором використання ПОР-пристроїв є заміна більшості аналогових компонентів. Пристрої, побудовані на аналоговій елементній базі, мають значно вищу складність конструкції, ніж ПОР-пристрої, та не мають гнучкості, необхідної у сучасних умовах швидкої зміни стандартів зв'язку.

Список літератури:

1. SDR forum. URL: <http://www.wirelessinnovation.org/> (дата звернення 20.09.2020).
2. Рембовський А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг, задачи, методы, средства. Москва, Горячая линия – Телеком. 2012. 281 с.
3. Peter Kenington: RF and Baseband Techniques for Software Defined Radio, Artech House, 2005. 281 p.
4. Проектирование радиоприемных устройств. под ред. А.П. Сиверса. Москва : «Сов. радио», 1976. 487 с.
5. Трусов В.А., Горячев Н.В., Баннов В.Я. Программно-определяемые приемопередатчики и их применение. *Ежемесячный научный журнал «Молодой учёный»* № 21(80). С. 234-236.
6. Brenner S. Cybercrime : criminal threats from cyberspace. Praeger, 2006. 281 p.
7. Alexander M. Wyglinski. Digital Communication Systems Engineering with Software-Defined Radio, Artech House, 2013. 289 p.
8. Eugene Grayver: Implementing Software Defined Radio, Springer, 2012. 267 p.
9. Пампуха І.В., Бурій С.В., Пусан В.В. Аналіз сучасних автоматичних систем моніторингу радіо простору на базі SDR технологій для ведення завдань радіоелектронної розвідки. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 2017. № 56. С. 40-46.
10. Охрамович М.М., Шевченко В.В., Кравченко О.І. Аналіз способів ведення моніторингу радіопростору за допомогою SDR технології. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 2018. № 59. С. 37-45.

Garyst A.V., Bilevska O.S. PRINCIPLES OF BUILDING RECEIVERS ON SOFTWARE DEFINED RADIO TECHNOLOGY

The use and application of receiving devices for solving various problems in modern conditions requires the unification of equipment so that it can be used for various tasks and purposes. Initially, all receiving devices were created from separate components. They were compiled into blocks that applied certain mathematical transformations to the signal that was received by the antenna in order to obtain a useful signal at the output. For example, a super heterodyne receiver performs pre-amplification, frequency conversion, bandpass filtering of the received signal, and decoding of the signal.

Despite the analogue element base, the design of a complex electronic device is similar to the design of a software system, that is, we divide the system into functional blocks, and blocks into sub-blocks, until we reach elementary operations, such as amplification, filtering, detection, and others.

Currently, it is possible to first convert the signal from the antenna to digital form, and then perform the listed operations on digital processors. In this case, the design of systems can be carried out both using block diagrams and using various programming languages.

In the very recent past, wireless radio systems were designed in such a way that a device supported one or two types of signal and only devices of the same type could communicate with each other. This was and is a strong limitation, which greatly complicates the organization of communication between different types of devices. In this regard, there was a constant need for a flexible architecture that could be changed by software.

Software Defined Radio technology is a relatively new development in wireless devices. The essence of software-defined radio technology is that the basic parameters of the transceiver device are determined by the software, and not by the hardware configuration, as we are used to seeing in classical designs. We are talking not only about the radio frequency parameters of the systems, such as the type of modulation, the power of the high-frequency signal, sensitivity, selectivity, harmonic suppression, which can be done by switching the corresponding nodes of the device, but also about the protocol part. That is, we can observe a complete degeneration of equipment, which previously could perform only one rigidly specified function. For example, the type of transmitter modulation is controlled by the built-in microcontroller. Accordingly, the receiver also uses software to demodulate the signal. This is relevant for many nodes of wireless interface devices, for modeling and coding subsystems, analog-to-digital and digital-to-analog conversion.

Key words: *analog-to-digital converter; digital-to-analog converter; digital signal processor; super heterodyne receiver; intermediate frequency; digital signal processing, LPF, PLL, Software Defined Radio.*