

УДК 621.396

О.Г. Воронцов (д-р техн. наук, проф.), О.І. Остапенко
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Донецьк
кафедра автоматики і телекомунікацій
E-mail: vag_@mail.ru, ostapenko.alexandr.igorevich@gmail.com

ВДОСКОНАЛЕННЯ СТРУКТУРИ ТА АЛГОРИТМІВ МУЛЬТИСТАНДАРТНОГО ПРИЙМАЧА ДЛЯ ГЕТЕРОГЕННОЇ МЕРЕЖІ

Проведено аналіз стану розвитку сучасних телекомунікацій. Виявлені два найбільш значущі негативні фактори та запропоновано спосіб їх подолання, заснований на реконфігурованих підсистемах. У роботі розглянута тільки приймальна частина підсистеми. Обґрунтована можливість роботи приймача відразу з декількома стандартами. Проведено огляд існуючих технологій, оцінені перспективи їх сумісного застосування та вирішено, на які стандарти може бути розрахована підсистема. Запропонована концепція tai- мультистандартного обладнання та розглянуті існуючі типові рішення. Розглянута структура і алгоритм роботи tai-МСП на базі SDR. Обговорені вимоги до приймача.

Ключові слова: *реконфігуровані підсистеми, Software Defined Radio (SDR), CDMA, UMTS, LTE, WiMAX, tai-мультистандартність, мультистандартний приймач.*

Загальна постановка проблеми

На даний момент існують дві найбільш значущі проблеми в сучасних телекомунікаціях[3]:

- значне зростання мобільного трафіку, при обмеженому частотному ресурсі;
- фактична відсутність загальноприйнятих стандартів.

Вирішення цих проблем потребує подальшого розвитку систем зв'язку з використанням радіоконфігурованих підсистем, найголовнішою особливістю яких є придатність до оновлення, за рахунок програмних засобів. Це дає можливість гнучкої адаптації до нових стандартів, що в значній мірі знімає питання сумісності. Але це потребує і деяких додаткових апаратних засобів, які забезпечують можливість підтримувати роботу одночасно в декількох стандартах, зберігаючи при цьому здатність взаємодії відразу з двома та більше операторами. Придатним рішенням виступає технологія Software Defined Radio (SDR)[6,7], яка стала особливо популярною та затребуваною в останні роки [1]. Розроблені засоби у першу чергу орієнтовані на потреби користувачів, тому розглядається тільки приемна частина пристрою.

Постановка мети і задач дослідження

Вищесказане визначає актуальність мети даної роботи - розширення області застосування реконфігурованих підсистем та підвищення ефективності використання ресурсів гетерогенної мережі за рахунок вдосконалення структури та алгоритмів мультистандартного приймача. Вдосконалення досягається шляхом об'єднання між собою структур гетеродинного приймача та програмно-обумовленого радіо у єдиному пристрої.

Такий пристрій дозволить скоротити номенклатуру апаратних засобів, необхідних для реалізації декількох телекомунікаційних послуг, за рахунок використання інтегрованого комплексу обладнання. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

А) Обґрунтувати можливість роботи приймача відразу з декількома стандартами, для чого передбачено:

- Провести огляд існуючих технологій, та оцінити перспективи їх сумісного застосування. Вирішити, на які стандарти може бути розраховано пристрій.

- Запропонувати концепцію multi-мультистандартного обладнання. Розглянути існуючі типові рішення та їх придатність для використання у складі пристрою.

Б) Запропонувати структуру і алгоритм роботи multi-MСП на базі SDR. Визначити вимоги яким повинен задовольняти приймач. Провести аналіз реалізованості і працездатності розробки.

Рішення задач і результати досліджень

Мобільний зв'язок третього покоління будується на основі пакетної передачі даних. Мережі третього покоління 3G працюють на частотах дециметрового діапазону, як правило, в діапазоні близько 2 ГГц. З усіх існуючих варіантів, варті уваги тільки два найбільш поширені, а саме CDMA[8] та UMTS[9]. CDMA (Code Division Multiple Access) - технологія радіозв'язку, при якій канали передачі мають загальну смугу частот, але різну кодову модуляцію. UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) розроблена для модернізації мереж GSM і отримала широке поширення не тільки в Європі, але і в багатьох інших регіонах світу. Решта стандартів 3-го покоління не мають перспектив розвитку і їх розгляд не є доцільним.

Для мереж 4G Міжнародним Союзом Електрозв'язку затверджено тільки два стандарти, які відповідають усім вимогам - це LTE Advanced[10] та Mobile WiMAX 802.16e[11]. LTE (Long Term Evolution) - проект розроблений консорціумом 3GPP стандарту удосконалення технологій мобільної передачі даних CDMA, UMTS. WiMAX (World wide Interoperability for Microwave Access) - телекомунікаційна технологія, розроблена з метою надання універсального бездротового зв'язку на великих відстанях для широкого спектру пристроїв.

Для подальшої розробки структури необхідно конкретизувати діапазон частот, що використовується кожним стандартом. А саме, вказати спектри частот для передачі даних від базової станції до абонента (Downlink). Підсумкові дані наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Основні характеристики стандартів UMTS, CDMA, LTE та WiMAX

Назва технології	Покоління (3 або 4)	Спектр частот для передачі даних. Тільки Downlink, МГц	Мін. ширина одного каналу, МГц	Максимальна швидкість передачі даних (в теорії)	
				Uplink, Мбит/с	Downlink, Мбит/с
UMTS (W-CDMA)	3G	1958-2025	5	27	73,5
CDMA	3G	824-848	1,25	1,8	3,1
LTE	4G	2500-2540	20	172,8	326,4
WiMAX	4G	2600-2640	20	20	20

Проаналізувавши вищенаведену таблицю, можна зробити висновок, що всі обрані нами технології мають передумови для об'єднання в рамках одного пристрою, за рахунок переносу спектрів в компакту область без їхнього перекриття. Такому підходу сприяє наявність досить швидкодіючих АЦП, здатних оброблювати сумарний груповий сигнал.

Реалізація мультистандартності (об'єднання декількох технологій у рамках одного пристрою) може бути здійснена за рахунок використання двох принципів за якими працюють мультистандартні термінали:

- 1) Перемикання між кількома технологіями.
- 2) Паралельна робота кількох технологій.

Обидві варіації істотно відрізняються одна від одної. Проте, коли ми говоримо «мультистандартне обладнання», маємо на увазі саме перемикання між кількома технологіями. Щоб уникнути плутанини, введемо окремий термін для другої варіації - *mai-мультистандартність* (лат. *multipleactivaiunctio* - множинні активні сполуки), яка передбачає можливість паралельної роботи кількох технологій. Розроблений приймач буде працювати за принципом *mai-мультистандартності*.

На даний момент існує не так багато зразків мультистандартного обладнання:

- система WiFi-Style, що підтримує стандарти WiFi / CDMA / WiMAX / GSM[5];
- мультистандартний мобільний WiFi-пристрій для LTE TDD розроблений фірмою Huawei[5];

- планшет компанії «Ростелеком», що підтримує стандарти CDMA / GSM / UMTS / HSPA[5];

Але усі вищенаведені пристрої мають один і той ж недолік. А саме, вони не можуть одночасно отримувати дані відразу від декількох операторів. Для того, щоб вирішити цю проблему, в даній роботі розроблена структура *mai-мультистандартного* приймача (далі *mai-МСП*), що підтримує множинні активні сполуки. Іншими словами користувач буде мати можливість отримувати дані від декількох операторів мобільного зв'язку одночасно. В якості базової технології пропонується використовувати SDR, що дозволяє запропонувати модель *mai-МСП* з використання 3 каналів (див. рис. 1).

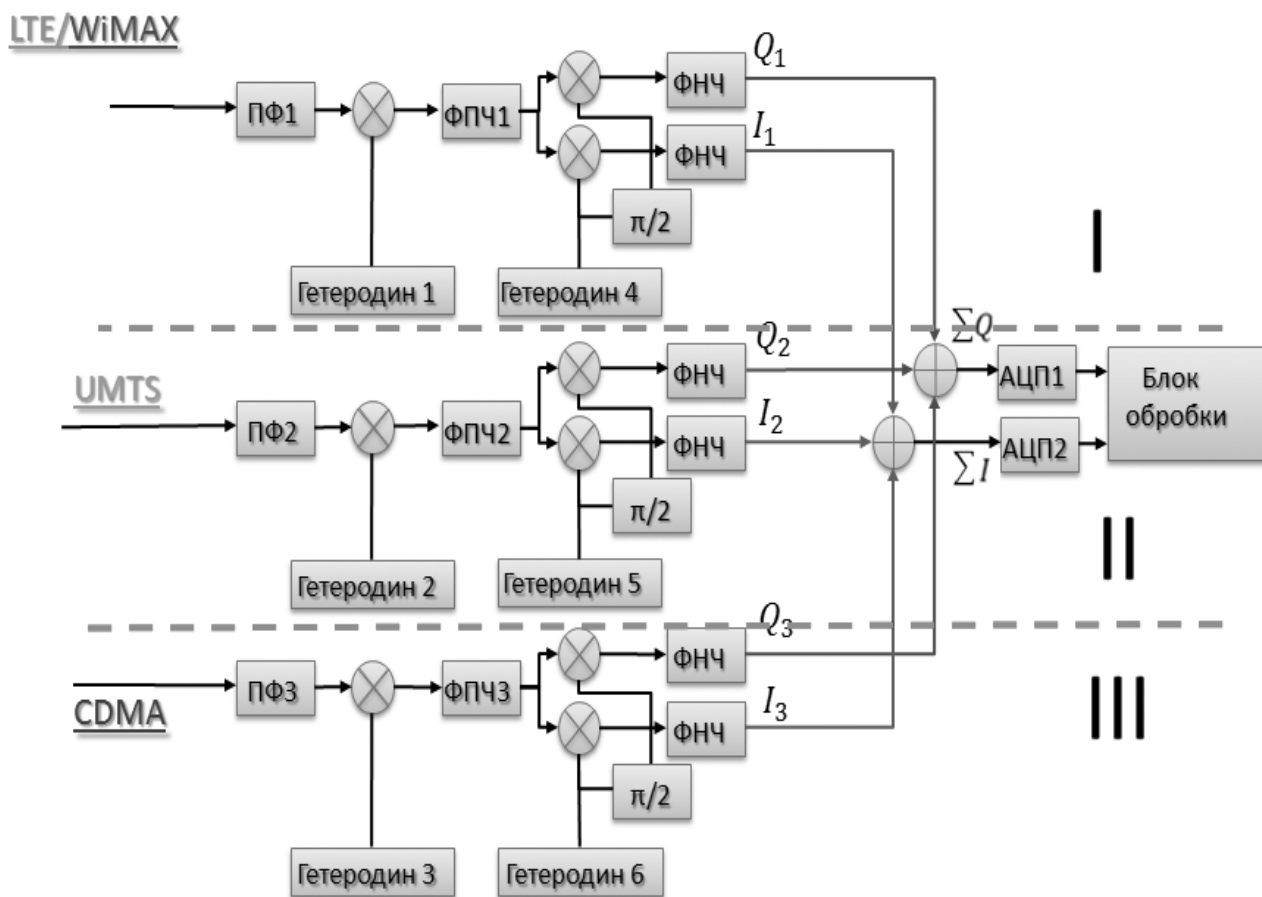


Рисунок 1 – Структурна схема *mai-МСП* 1-го рівня

Хоча визначені 4 найбільш перспективних стандарти, використовується лише три канали. Це пов'язано з частотними діапазонами LTE і WiMAX, які досить близькі між собою, тому перший канал буде обробляти сумісний сигнал. Другий канал призначений для обробки сигналів з мереж, заснованих на стандарті UMTS. І третій - для тих, що базуються на технології CDMA.

На відміну від стандартного SDR-приймача [4, 12], частоти кожного з каналів фіксовані в певному діапазоні. Так, як передбачається, що пристрій працює тільки зі строго певним набором стандартів, переналаштування частоти нам не потрібне [13].

В структурі пристрою присутні два АЦП, один з яких обробляє сумарні сигнали I, а другий Q з усіх трьох каналів. Це необхідно для підтримки заданих параметрів швидкості обробки сигналів. Демодуляція і подальша цифрова обробка здійснюється спеціалізованими контролерами з використанням обраних програмних засобів [14].

Первинний і вторинний перенос спектру, пригнічення негативних компонент, формування сигналів I і Q, а так само їх об'єднання і аналогово-цифрове перетворення проводиться за допомогою апаратних засобів. Подвійний перенос спектру, у підсумку дозволяє зменшити частоту квантування і таким чином знизити вимоги до швидкодії АЦП.

Первинне перенесення спектру проводиться за допомогою гетеродинів і перемножувачів. Так само варто врахувати, що перед перенесенням сигналу потрібно відсіяти шуми і дзеркальний канал, для цієї мети використовується преселектор. Вторинний перенос спектру здійснюється аналогічно первинному. Формування сигналів I і Q відбувається одночасно з процесами вторинного переносу спектру, для чого задіяні гетеродини та фазообертачі. Об'єднання сигналів I та Q різних каналів здійснюють суматори. Після АЦП подальша обробка сигналів реалізується програмними засобами, для чого передбачений блок обробки.

Приймач задовольняє декільком важливим умовам. По-перше, його структура організована таким чином, що він може підтримувати множинні активні сполуки. По-друге, так як пристрій працює з 4-ма різними стандартами, врахована смуга каналу необхідна для кожного з них. В даному випадку мінімальний розмір смуги каналу - 40 МГц. Він необхідний для найбільш «витратних» стандартів LTE і WiMAX. Ця смуга сигналу так само задовольняє з запасом вимогам стандартів UMTS та CDMA200. По-третє, необхідно, щоб спектри сигналів не перекривають один одного, як при прийомі, так і при перенесенні в нижні частоти, що демонструється у подальшому прикладі.

Як видно з рисунку 2 структура перетворення сигналу складається з двох ступенів. Під час першої відбувається істотне зниження частоти. Це необхідно для роботи другого перетворення, під час якого сигнали переносяться в область нульової смуги частот. Розглянемо алгоритм більш детально. Сигнали від мереж UMTS, CDMA і сумісний сигнал LTE / WiMAX надходять на преселектори (на схемі позначені як ПФ1, 2,3). Там всі прийняті сигнали послабляються, крім необхідних нам.

Далі відбувається перенесення сигналу з гігагерцового діапазону в мегагерцовий за допомогою відповідних змішувачів та гетеродинів (1,2,3). ПФ1, ПФ2, ПФ3 забезпечують пригнічення дзеркального каналу, виникаючого після першого переносу спектру. Розглянемо більш докладно перетворення з пониженням частоти. Вхідними сигналами є радіочастотний (RF) і сигнал гетеродина (LO). На виході формується сигнал проміжної частоти (IF).

Вихідний сигнал містить як сумарні, так і різницеві компоненти вхідних сигналів. Математично вихідний сигнал можна описати на рівні гармонічних компонент (1) - (3):

$$RF(t) = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \quad (1)$$

$$LO(t) = A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2) \quad (2)$$

де ω_1, ω_2 - частоти сигналів; φ_1, φ_2 - фазовий зсув; A_1, A_2 - амплітуди сигналів; t - час.

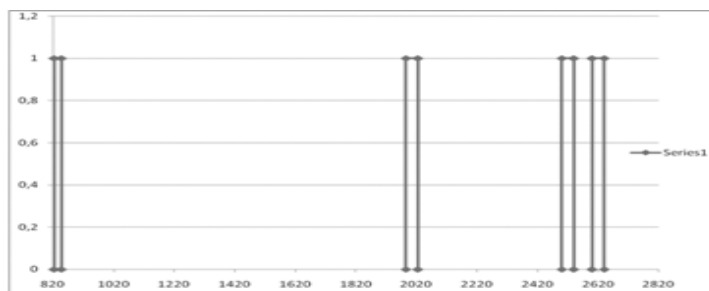


Рисунок 2 - Розташування сигналів з 4 мереж в частотному діапазоні до обробки в приймачі

$$IF(t) = A_1 A_2 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \sin(\omega_2 t + \varphi_2) \quad (3)$$

Використовуючи тригонометричні рівняння, можна перетворити рівняння (3) до виду, що містить суму і різницю частот:

$$IF(t) = \frac{A_1 A_2}{2[\cos[(\omega_1 + \omega_2)t + (\varphi_1 + \varphi_2)] + \cos[(\omega_1 - \omega_2)t - (\varphi_1 - \varphi_2)]]} \quad (4)$$

Таким чином вихід містить сумарні і різницеві компоненти вхідних сигналів. Додаткова фільтрація на вході і виході необхідна для ослаблення небажаних компонентів сигналу, щоб отримати необхідні характеристики. Для обраних нами частот (див. табл. 1) з урахування фільтрації отримаємо частоти сигналів на виходів перших перетворювачів (див. табл. 2, рис. 3).

Таблиця 2

Частоти стандартів UMTS,CDMA,LTE та WiMAX після першого перенесення спектру

Технологія	Частоти сигналів					
	Первинний перенос спектру			Вторинний перенос спектру		
	Первинна частота, МГц	Частота Гетеродина, МГц	Підсумкова частота, МГц	Вторинна частота, МГц	Частота Гетеродина, МГц	Підсумкова частота, МГц
CDMA	824	637	187	187	274	-87
	848	637	211	211	274	-63
UMTS	1985	1700	285	285	338	-53
	2025	1700	325	325	338	-13
LTE	2500	2090	410	410	400	10
	2540	2090	450	450	400	50
WiMAX	2600	2040	560	560	500	60
	2640	2040	600	600	500	100

Після ФПЧ (1,2,3) сигнал у друге переноситься в область низьких частот. Розрахунки здійснюються за тими ж формулами, що і в перший раз. Сам процес відбувається за допомогою перемножувачів (4,5,6,7,8,9), фазообертачів (1,2,3) і гетеродинів (4,5,6). Синфазний сигнал формується за допомогою перемножувачів (5,7,9) і гетеродинів (4,5,6). Фазообертачі (1,2,3) та перемножувачі (4,6,8) формують квадратурний сигнал. На наступному етапі сигнали I з усіх трьох каналів підсумовуються і подаються на АЦП1, так само створюється і сумарний сигнал Q і подається на АЦП2.

Для другого перетворення вплив різниці фаз є суттєвим, тому в подальших розрахунках врахуємо фазовий зсув на $\frac{\pi}{2}$. Таким чином формула (4) розпадається на дві формули:

$$IF_I(t) = \frac{A_1 A_2}{2[\cos[(\omega_1 + \omega_2)t] + \cos[(\omega_1 - \omega_2)t]]}$$

$$IF_Q(t) = \frac{A_1 A_2}{2\{\cos[(\omega_1 + \omega_2)t + 90] + \cos[(\omega_1 - \omega_2)t - 90]\}}$$

Як бачимо з результату, дзеркальні компоненти спектру можна пригнічити шляхом додавання складової I до складової Q зсунутої відносно першої на $\frac{\pi}{2}$. Цю процедуру можна реалізувати шляхом використання фільтру Гілберту до Q складових, що пропонується здійснити програмними засобами.

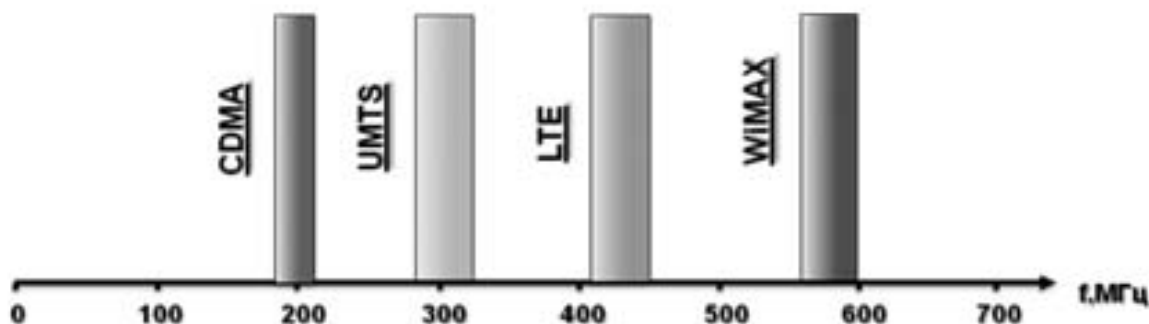


Рисунок 3 - Розташування всіх сигналів в частотному діапазоні після першого переносу в мегагерцовий діапазон

Для другого перетворення вплив різниці фаз є суттєвим, тому в подальших розрахунках врахуємо фазовий зсув на $\frac{\pi}{2}$. Таким чином формула (4) розпадається на дві формули:

$$IF_I(t) = \frac{A_1 A_2}{2\{\cos[(\omega_1 + \omega_2)t] + \cos[(\omega_1 - \omega_2)t]\}}$$

$$IF_Q(t) = \frac{A_1 A_2}{2\{\cos[(\omega_1 + \omega_2)t + 90] + \cos[(\omega_1 - \omega_2)t - 90]\}}$$

Як бачимо з результату, дзеркальні компоненти спектру можна пригнічити шляхом додавання складової I до складової Q зсунутої відносно першої на $\frac{\pi}{2}$. Цю процедуру можна реалізувати шляхом використання фільтру Гілберту до Q складових, що пропонується здійснити програмними засобами.

Подальшу обробку виділеного сигналу, фільтрацію та демодуляцію також пропонується виконувати програмно, застосовуючи для цього передбачувані програмні засоби. Результати розрахунків спектрів за вищенаведеними правилами приведені у таблиці 2 та рисунку 4.

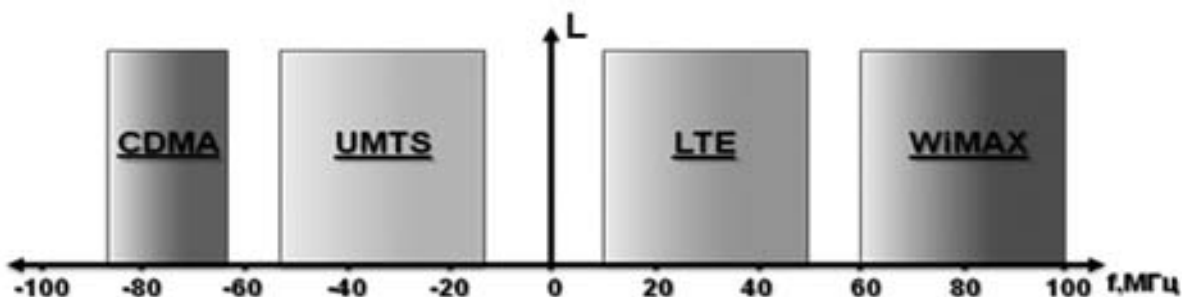


Рисунок 4 -Сигнали після перенесення в область роботи АЦП

В подальшому, при необхідності, можна реалізувати можливість динамічного керування спектром. Це дозволить радіосистемі адаптуватися до зовнішніх умов, що

підвищить ефективність використання радіочастотних сигналів. Сама модель mai-МСП в цьому випадку буде відноситись вже до когнітивного радіо (Cognitive Radio, CR) [3].

Таким чином обґрунтована можливість реалізації об'єднання різних технологій в єдиному пристрої. Найбільш вузьким місцем у проекті є АЦП. Але завдяки вибраній структурі і алгоритмам, вдалося звести сумарний спектр всіх сигналів до смуги у 200 МГц, з якою можуть працювати сучасні АЦП. На основі отриманих даних вибрано конкретний тип пристрою (AD 9467-200) з наступними параметрами: розрядність - 16 біт; MPLS - 200 МГц.

Висновки

1. Проведено огляд існуючих технологій та обрані стандарти з якими має працювати пристрій.
2. Запропонована концепція побудови mai-мультистандартного обладнання.
3. Розроблена структура й базовий алгоритм mai-МСП на базі SDR.
4. Визначені вимоги до розробленого приймача та підтверджено можливості їх виконання.
5. Наведено приклад реалізації для конкретного випадку.

Список використаної літератури

1. Reconfigurable Radio Systems (RRS): SDR Reference Architecture for Mobile Device //ETSI TR 102 680 V1.1.1 (2009-03).
2. Tafazolli, R. (ed) (2006): Technologies for the Wireless Future, volume 2, Wireless World Research Forum, (WWRF), John Wiley & Sons, Chichester, England.
3. Software-defined radio: basics and evolution to cognitive radio, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Karlsruhe, Friedrich K. Jondral, Germany, August 2005, pp. 275-283
4. J. Mitola, "The software radio architecture," IEEE Communications Magazine, pp. 26–38, May 1995.
5. Хабрахабр – самое крупное в Рунете сообщество людей, занятых в индустрии высоких технологий [Электронный ресурс]— Режим доступа: <http://habrahabr.ru/>, , свободный. — загл. с экрана. — Яз. Рус.
6. SDR forum [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.wirelessinnovation.org/>.
7. Tuttlebee W. Software Defined Radio – Enabling technologies / Walter Tuttlebee. – John Wiley & Sons, 2002. – 428 pp
8. Diakoumis Gerakoulis, Evaggelos Geraniotis CDMA: Access and Switching: For Terrestrial and Satellite Networks (Hardcover) Diakoumis Gerakoulis, Evaggelos Geraniotis 2001
9. Кааранен Х. Сети UMTS. Архитектура, мобильность, сервисы / Х. Кааранен, А. Ахтиайнен, Л. Лаитинен, С. Найян, В. Ниemi. – М.: Техносфера, 2008 – 468 с.
10. Moray Rumney. LTE and the Evolution to 4G Wireless: Design and Measurement Challenges. - Agilent Technologies. – 557 p.
11. Коржов В. Беспроводные технологии передачи данных - стандарт радиодоступа WiMAX [Электронный ресурс] / Журнал "Computerworld", - Режим доступа: <http://www.rmt.ru/articles.html?article=101>
12. Kenington P. B. RF and Baseband Techniques for Software Defined Radio / P. B. Kenington // Artech House, 2005. — 352 pp.
13. Проектирование радиоприемных устройств. Под ред. Сиверса А.П. / А.П. Сиверс. — М.: «Сов.радио», 1976. — 487 с.
14. Р. Лайонс Цифровая обработка сигналов / Р.Лайонс – М.: Бином-пресс –2000 300 с.

Надійшла до редакції:
23.04.2013р.

Рецензент:
д-р техн. наук, проф. Зорі А.А.

А.Г. Воронцов, А.И. Остапенко

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

Совершенствование структуры и алгоритмов мультистандартного приемника для гетерогенных сетей. Проведен анализ состояния развития современных телекоммуникаций. Обнаружены два наиболее значимых негативных фактора и предложен способ их преодоления основанный на реконфигурируемых подсистемах. Рассмотрена только приемная часть подсистемы. Цель работы – расширение области применения реконфигурируемых подсистем и повышение эффективности использования ресурсов гетерогенной сети за счет совершенствования структуры и алгоритмов мультистандартного приемника. Совершенствование достигается путем объединения между собой структур гетеродинного приемника и программно-определяемого радио. Обоснована возможность работы приемника сразу с несколькими стандартами. Проведен обзор существующих технологий, оценены перспективы их совместного применения и решено, на какие стандарты может быть рассчитана подсистема. В итоге, выбраны четыре наиболее перспективных: CDMA, UMTS, LTE, WiMAX. Первые два относятся к третьему поколению сетей(3G), а вторые два к четвертому(4G). В процессе синтеза *mai*-МСП, функции разрабатываемого устройства разделены на программную и аппаратную части. Предложенная концепция *mai*-мультистандартного оборудования и рассмотрены существующие типовые решения. Рассмотрена структура и алгоритм работы *mai*-МСП на базе SDR. Обсуждены требования к приемнику.

Ключевые слова: реконфигурируемые подсистемы, Software Defined Radio (SDR), CDMA, UMTS, LTE, WiMAX, *mai*-мультистандартность, мультистандартный приемник.

A.G. Vorontsov, A.I. Ostapenko

Donetsk National Technical University

Improving the Structure and Algorithms of a Multi-Standard Receiver for Heterogeneous Networks. The analysis of the development of modern telecommunications was carried out. We found two most significant negative factors and a method of overcoming them based on reconfigurable subsystems. We considered only the receiving part of the subsystem. The purpose of the work is to extend the field of reconfigurable subsystems application and to improve the efficiency of using the resources of a heterogeneous network by improving the structure and algorithms of a multistandard receiver. Improvement is done by means of combining the structures of the heterodyne receiver and software-defined radio. We reviewed existing technologies, estimated the prospects of their joint application and discussed the standards for the subsystem: CDMA, UMTS, LTE, WiMAX. The first two belong to third-generation networks (3G), and the second two belong to the fourth generation (4G). In the process of *mai*-SMEs synthesis the functions of the developed device are divided into hardware and software parts. The primary and secondary spectrum transfer, the suppression of difference components, formation of signals I and Q, as well as their integration and analog-to-digital conversion are performed by hardware. Dual spectrum transfer reduces sampling frequency and thus reduces the requirements to the speed of ADC. Software performs the function of digital filtering (including image rejection as a result of secondary spectrum transfer), baseband signal decomposition and demodulation. We considered the structure and algorithms of *mai*-SDR-based SMEs for particular conditions and discussed the requirement to the receiver. The possibility of combining different technologies in a single device is demonstrated and thus the feasibility of the proposed concept is confirmed. The bottleneck in the project is ADC. But due to the chosen structure and algorithm, the spectrum of all signals is reduced to the width of 200 MHz, with which modern conversion devices can work. Based on the obtained data a specific type of ADC - AD 9467-200 was selected.

Keywords: reconfigurable subsystems, Software-defined Radio (SDR), CDMA, UMTS, LTE, WiMAX, *mai*-multi-standard, multi-standard receiver.