

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут телекомунікаційних систем
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра телекомунікацій
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено
В.о. завідувача кафедри

_____ Явіся В.С. _____
(підпис) (ініціали, прізвище)
« » _____ 2018_р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка,
(код і назва)

спеціалізація Апаратно-програмні засоби електронних комунікацій

на тему: Дослідження структури організації засобів забезпечення фільтрації побічних каналів прийому приймачів та позасмугових випромінювань передавачів програмно-визначуваної системи.

Виконала: студентка 2 курсу, групи ТЗ-71мп

(шифр групи)

Зелепукіна Тетяна Володимирівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник с.н.с Кайденко Микола Миколайович с.н.с

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант _____

(назва розділу)

_____ (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____ (підпис)

Київ – 2018_рік

Зміст

Вступ

1. Програмно-визначувані системи, особливості створення і роботи.
2. Побудова сучасних приймачів та передавачів програмно-визначуваної системи
3. Засоби організації фільтрації побічних каналів прийому приймачів та позасмугових випромінювань передавачів програмно-визначуваної системи.
4. Результати досліджень засобів організації фільтрації побічних каналів прийому приймачів та позасмугових випромінювань передавачів.

Висновки

Перелік використаних джерел

Додаток

Вступ

Вступ та постановка проблеми. Сучасні радіостанції здатні передавати як звукові повідомлення, так і обмінюватись даними, в тому числі зображеннями і навіть відео, з досить великою швидкістю. Радіостанції з параметрами, що задаються програмно відкривають нові можливості, для радіоприйому та радіопередачі. Головне завдання, яке ставлять перед собою розробники таких трансиверів – об'єднання можливостей комп'ютера та радіостанції.

Операційна система SDR, як правило використовує відкриту архітектуру і це дозволяє таким пристроям обмінюватись інформацію між собою. Одним з пріоритетних напрямків розвитку систем SDR, безумовно, є створення багатопрокольних радіосистем. Цей напрямок має високу ступінь комерціалізації, завдяки чому воно отримало активний розвиток.

У зовсім недавньому минулому бездротові радіосистеми мали таку конструкцію, що підтримували один або два типи сигналу та між собою могли зв'язуватися тільки з однотипними пристроями. Це було і є сильним обмеженням та ускладнює організацію зв'язку між різнотипними пристроями. У зв'язку з цим постійно виникала потреба в радіо з гнучкою архітектурою, яка могла б змінюватися за допомогою програмного забезпечення. Так з'явилося словосполучення Software Defined Radio (рідше можна зустріти термін Software Radio - «програмне радіо»), в яких вид модуляції передавача управляється вбудовуваним мікроконтролером. Очевидно, що і приймач для демодуляції сигналу також використовує програмні засоби. Іншим важливим фактором використання систем SDR стала заміна більшості аналогових компонентів і спеціалізованих великих інтегральних мікросхем трансиверами (або приймачами) з максимально високими можливостями для програмування.

Шифрування сигналів програмується і є доволі гнучким. Наприклад, на SDR радіостанції можливо завантаження (використання) відомого алгоритму шифрування SINCGARS, або іншого спеціалізованого програмного забезпечення. Радіостанції з параметрами, що задаються програмно, відкривають нові можливості, для радіоприйому та передачі [1]. Таким чином SDR дає користувачу велику функціональну гнучкість, яка реалізовується на єдиній апаратній платформі, і здатна працювати з різними класами радіозв'язку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Історично однією з перших реалізацій була система SPEAKeasy, яка стала успішним проектом по використанню комунікаційних систем на базі технології Software Defined Radio у військовому обладнанні США. Система випробовувалася в США в 1970 році. SPEAKeasy дозволяла цифровій апаратній платформі загального призначення здійснювати зв'язок з іншими системами в широких діапазонах частот, видів модуляції, методів кодування даних і варіювання інших параметрів. Комерційні реалізації системи SDR діляться на: платформи для реалізації базових станцій, пристрої і термінали споживчої категорії. Як правило, продуктивність останніх становить 1 млн. операцій в секунду і вони в першу чергу орієнтовані на роботу від автономних джерел живлення (батареї, акумуляторів).

Не менш важливим є застосування SDR технології при організації мобільного зв'язку. Багато дослідницьких лабораторій, виробників обладнання мобільної телефонії, дивляться в бік технології Software Defined Radio, як на альтернативу традиційній архітектурі сьогоденних стільникових телефонів. Апаратне забезпечення стільникового телефону з архітектурою SDR потенційно підтримує всі стандарти мобільної телефонії, а його фактичні параметри визначаються завантаженою прошивкою вбудованого програмного забезпечення (ПЗ). Однак на цьому переваги телефонів на базі архітектури SDR не закінчуються. Такий мобільний

пристрій спроможний більш ефективно використовувати радіочастотний спектр і споживану від джерела живлення енергію, легко перемикається з одного стандарту зв'язку на інший (наприклад, з GSM на PDC, або з GSM на EDGE для поновлення можливостей телефону)[2].

Головне завдання для розробників таких трансиверів – об'єднання можливостей комп'ютера та радіостанції. Операційна система SDR, як правило, використовує відкриту архітектуру і це дозволяє пристроям обмінюватись інформацію між собою. Шифрування сигналів програмується і є доволі гнучким. Наприклад, на SDR радіостанції можливо завантаження (використання) відомого алгоритму шифрування SINCGARS, або іншого спеціалізованого програмного забезпечення. SDR технологія дає користувачу велику функціональну гнучкість, яка реалізовується на єдиній апаратній платформі, і дає змогу працювати з різними класами радіозв'язку.

Однією з ключових переваг SDR у військовій сфері, є взаємодія між засобами зв'язку попередніх поколінь і сучасними системами. Оновлення військових систем радіозв'язку не може зрівнятися темпами з розвитку сучасних цивільних комунікаційних засобів. Тому дуже важливо, щоб нові і старі системи могли працювати сумісно і без втрати боєздатності.

SDR здійснює адаптацію до спектрів протоколів. Таким чином, можлива взаємодія між різними моделями радіостанцій. Також SDR може виконувати роль ретранслятора і брати участь в створенні безпроводних мереж передачі даних, автоматично, без необхідності введення даних користувачем. При цьому оператор може використовувати станцію для зв'язку в будь-який момент часу.

1. Принципи побудови програмно-визначеного радіо

Програмно-визначене (також використовують термін «програмно-конфігуроване») радіо (SDR) - це будь-який пристрій передачі даних, в якому деякі або всі функції фізичного рівня є програмно визначеними. Як приклад можна привести сучасні смартфони, оскільки якщо не всі, то більша частина обробки інформаційного сигналу проводиться в сигнальному процесорі (DSP).

Сучасне використання радіопристроїв вимагає уніфікації обладнання, щоб воно мало можливість застосування для різних завдань і цілей. Тому виникла ідея SDR (Software Defined Radio, програмно-визначеного радіо).

Завдяки програмному налаштуванню один приймач може бути пристосований під безліч різних форм сигналу. Такий пристрій є основою для побудови, наприклад, універсально-сумісної національної суспільної системи безпеки.

Технологія SDR довгий час була привабливою для виробників, операторів бездротового зв'язку і військових служб, оскільки одна апаратна платформа може бути пристосована до великої кількості форм сигналів, які додаються програмно в процесі роботи. В результаті такі апаратні елементи як фільтри, змішувачі, підсилювачі, детектори, модулятори і демодулятори, стають не потрібні. У той же час ми отримуємо багатofункціональну платформу, що має безліч режимів роботи і набір діапазонів частот, перемикання між якими здійснюється автоматично і динамічно в технічній частині віддаленим способом.

1.1. Історія програмно-визначеного радіо

Основним форматом віщання радіосигналу на початку 80-х років минулого століття була амплітудна модуляція (AM). Якість прийнятого сигналу була невисокою через загасання в каналі, спотворень і шумів. Частково ці ефекти вдалося усунути з переходом на частотну модуляцію. Частотно-модульований сигнал забезпечує звучання CD- якості і має обмежену зону поширення. У 2003 році дві молоді компанії - XM і SiriusXM) зробили прорив у розвитку цифрового супутникового радіомовлення в США. Дохід від нової технології можна порівняти з доходом каналів платного телебачення. В цей же час (World Space Radio) почали віщання на території Азії і Африки.

Звукові сервіси супутникового радіо (SDARS-Satellite Digital Audio Radio Services) дозволяють безперервно слухати одну й ту ж радіостанцію в автомобілі в будь-якій точці зони покриття за винятком можливої втрати сигналу через перешкоди (будівлі, тунелі і листя дерев).

У радіоприймачах XM дана проблема була вирішена за рахунок установки наземних репітерів, які передавали той же сигнал в умовах щільної міської забудови. Мережа мовлення мала змішану архітектуру, що складається з супутникового і наземного устаткування.

Приблизно в цей же час провідні компанії в області наземного мовлення також стали освоювати технологію цифрового радіо, і цьому сприяли дві причини. По-перше, вони розуміли, що ера аналогового радіо добігає кінця, весь світ переходить на цифрове мовлення, як більш якісне. По-друге, частотний спектр стає все більш дефіцитним, а цифрові методи обробки дозволяють стиснути дані, розмістивши більше інформації на відведеній смузі.

Цифровий спосіб мовлення забезпечує більш чистий сигнал, велику зону покриття, можливість упаковки більшого обсягу інформації на виділеній смузі.

Крім того, користувачі отримують більше можливостей для доступу до прослуховування програм.

У статті «Активні фільтри в прийомних пристроях радіомовного діапазону», опублікованій в ЕК №10, 2010 розглядалися різні варіанти побудови преселекторів радіоприймальних пристроїв, серед яких схеми з використанням кварцових фільтрів, одно- і багатоконтурних індукційних фільтрів. Основна увага була приділена застосуванню активних безіндукційних фільтрів на основі високочастотних операційних підсилювачів.

Аналіз, проведений при проектуванні і виготовленні смугового еліптичного фільтра 9-го порядку показав, що проектування активних фільтрів із застосуванням сучасних програмних засобів (в прикладі використовувалася програма Filter Solutions 2006) займає мінімум часу і передбачає тільки точні вимоги до специфікації фільтра, після чого програмне забезпечення здійснює всі необхідні розрахунки і формує відповідну схему. Однак подальша реалізація отриманої схеми і тестування виявили ряд недоліків, які можуть поширюватися і на інші види аналогових фільтрів.

Зокрема, номінали елементів, які використовуються для отримання необхідної характеристики, часто не входять до стандартні ряди опорів і ємностей. Використання найближчих стандартних значень може призвести до спотворення характеристик фільтра, а комбінування декількох елементів або використання підстроєних викликає збільшення масогабаритних характеристик і додаткові складності з підстроюванням багатоконтурною схеми. Крім того, схеми, в яких використовуються елементи з малими номіналами, більш схильні до впливу паразитних ємностей, опорів і індуктивностей, що ускладнює синтез фільтрів високого порядку, викликає труднощі в узгодженні каскадів, підборі елементів.

У підсумку можна зазначити, що активні фільтри дійсно можуть

застосовуватися в якості преселектор в радіоприймальних пристроях, проте їх синтез і настройка вимагають багато часу, певних практичних і теоретичних навичок як в схемотехніці, так і в проектуванні топології друкованої плати, що ускладнює отримання якісного, дешевого і простого в регулюванні активного фільтра.

З розвитком цифрових технологій все більша увага приділяється побудові радіоприймальних трактів із застосуванням цифрової обробки сигналів (ЦОС), які називаються в літературі SDR - software defined radio. Ця технологія ґрунтується на можливості оцифровки сигналу в реальному часі і подальшій обробці програмними або апаратними цифровими засобами - цифровими сигнальними процесорами, ПЛІС і т.д. Технологія SDR дозволяє здійснювати прийом і демодуляцію сигналів, в яких використовуються цифрові види модуляції, такі як DPSK, QAM, GMSK і т.д. Залежно від частоти і ширини спектра сигналу цифрова обробка в приймальнику може використовуватися як по радіочастоті (рисунок 2.1), так і після отримання сигналів на фіксовану проміжну частоту - обробка по ПЧ (рисунок 2.2).

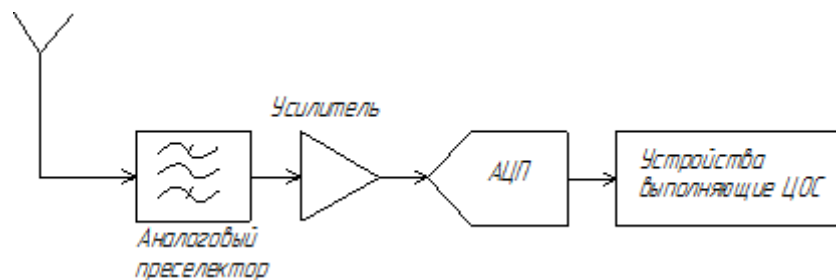


Рисунок 1.1 - Структура приймача з ЦОС по радіочастоті

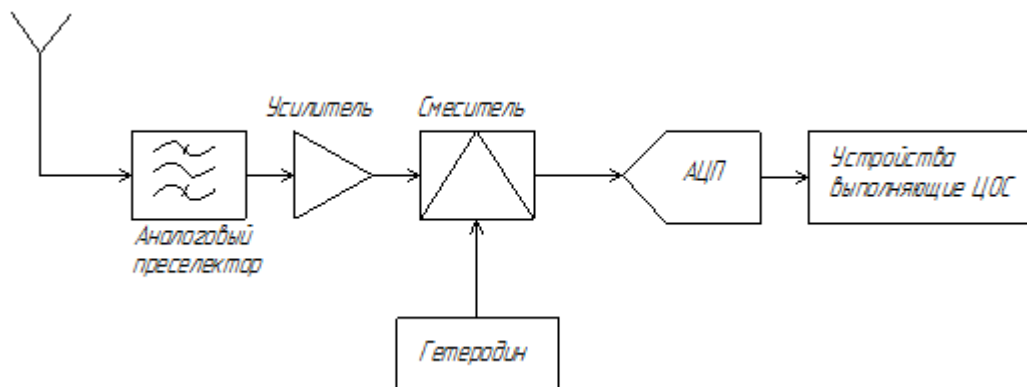


Рисунок 1.2 - Структура приймача з ЦОС по проміжній частоті

Радіоприймачі з цифровою обробкою сигналу по ПЧ відносяться до супергетеродинного типу і мають ряд переваг перед приймачами прямого перетворення - можливість роботи в великому діапазоні частот, хороша селективність і чутливість у всьому діапазоні. Приймачі такого типу використовуються в професійній зв'язковий апаратурі, до якої висуваються жорсткі технічні вимоги. У числі недоліків супергетеродинних приймачів - щодо високе енергоспоживання і великі розміри через використання аналогових елементів.

До переваг приймачів прямого перетворення відносяться мале енергоспоживання і можливість розміщення всіх елементів в невеликому портативному пристрої (в ідеалі в корпусі однієї мікросхеми), однак по вибірковості, чутливості і динамічному діапазону ці пристрої поступаються властивостям супергетеродинного приймача.

При обробці сигналів з частотами, що не перевищують кілька десятків МГц, швидкість сучасних АЦП (для АЦП послідовного наближення вона становить кілька сотень Мвіб / с при розрядності до 12 біт) дозволяє використовувати класичний принцип дискретизації відповідно до теореми Котельникова, згідно з якою частота вибірок повинна бути як мінімум в два рази більше верхньої частоти в спектрі дискретізуемого сигналу. При цьому оцифруванню піддається діапазон частот від постійної складової до половини частоти дискретизації, і на вході АЦП досить використовувати аналоговий ФНЧ для захисту від накладення спектрів. Для високочастотних сигналів використовується полосова дискретизація (under sampling), яка дозволяє обійти обмеження, що накладаються теоремою Котельникова для обробки вузькосмугових сигналів, у яких ширина спектра багато менше абсолютного значення центральної частоти. Цій умові відповідають практично всі радіосигнали. В цьому випадку теорема Котельникова звучить наступним чином: для збереження інформації про сигналі частота його дискретизації повинна бути рівною або більшою, ніж подвоєна ширина його смуги. Математично умова, яку повинна виконувати частота дискретизації, описується виразом (1.1):

$$(2f_c - B)/m \geq f_s \geq (2f_c + B)/m + 1 \quad (1.1)$$

)

де: f_c – центральна частота в спектрі сигналу; f_s – частота дискретизації; B – ширина спектра сигналу; m – довільне ціле число, вибирається таким чином, щоб виконувалося співвідношення $f_s \geq 2B$.

При смуговій дискретизації оцифрування піддається не вся смуга частот, а лише невелика її частина. При цьому для захисту від накладення спектра

необхідно використовувати смугові аналогові фільтри. Варто також відзначити, що полосова дискретизація дозволяє одночасно з оцифруванням сигналу зробити перенесення його спектра на низьку частоту.

В обох випадках на вході перетворювача необхідно використовувати аналогові фільтри для захисту від накладення спектра. При цьому, чим більша їх кількість, тим менш жорсткі вимоги пред'являються до аналогового фільтру. На практиці розробники намагаються забезпечити таку частоту дискретизації, щоб на вході АЦП було досить використовувати трьох- або чотирьохкаскадний пасивний фільтр. Для діапазону частот до 25 МГц можна застосувати як схему з безпосередньою дискретизацією сигналу по Котельникову, так і смугову дискретизацію.

Цифрові пристрої в радіоприймачі вирішують наступні завдання: виділення необхідного каналу, перенесення спектра сигналу на низьку частоту і декодування що містяться в сигналі даних або детектування. Для вирішення цих завдань можуть застосовуватися різні пристрої і їх поєднання. Первинну, неінтелектуальну обробку, що включає каналну фільтрацію, гетеродинування, зниження частоти дискретизації (децимації), найчастіше виконують або за допомогою швидкодіючої програмованої логіки (FPGA), або в спеціалізованих мікросхемах - цифрових приймачах (digital down converter - DDC).

Після дискретизації завдання виділення необхідного каналу вирішується за допомогою цифрових фільтрів, які представляють собою набір постійних чисел - коефіцієнтів фільтра, кількість і значення яких визначають його вид і крутизну характеристики. Розрізняють два основні класи цифрових фільтрів - нерекурсивні (КІХ-фільтри) і рекурсивні (БІХ-фільтри). КІХ-фільтри мають відомі переваги перед рекурсивними, які полягають в їх стійкості, меншою схильності ефектів квантування і можливості отримання лінійної фазової характеристики, що особливо важливо в системах зв'язку. У зв'язку з цим в

цифрових радіоприймальних пристроях більш широкого поширення набули саме нерекурсивні фільтри.

(КІХ - фільтр з кінечною імпульсною хар-кою. БІХ - фільтр з безкінечною імпульсною хар-кою)

Для проектування цифрових фільтрів, також як і для розробки аналогових активних і пасивних фільтрів, застосовуються різноманітні програмні засоби. Для розрахунку коефіцієнтів фільтра від розробника потрібно тільки визначення вимог до фільтру, але не знання алгоритмів і методів розрахунку коефіцієнтів. Широке поширення для проектування дискретних фільтрів отримав пакет Matlab, тому що він дозволяє провести розрахунок фільтра різними методами, з застосуванням різних вікон і т.д. Крім того, для розрахунку коефіцієнтів фільтра можна використовувати, як режим командного рядка, так і графічний інтерфейс програми Filter design and analysis tool (FDA Tool).

Після розрахунку, як правило, коефіцієнти фільтра зберігаються в файлі необхідного формату для подальшого використання у відповідній програмі, проте в можливості пакета Matlab входить також моделювання роботи фільтра в цифровій системі за допомогою додатка Simulink і завантаження в підтримувані налагоджувальні комплекти.

У порівнянні з аналоговими цифрові фільтри мають наступні переваги:

- можливість отримання недоступних для аналогових фільтрів характеристик (як крутизни АЧХ, так і лінійності ФЧХ). Збільшення порядку цифрового фільтра призводить лише до збільшення кількості математичних операцій, так що порядок фільтра обмежений тільки швидкодією цифрової системи;
- цифрові фільтри не схильні до впливу старіння і температурного

дрейфу параметрів;

- так як цифровий фільтр являє собою набір чисел - коефіцієнтів, то для зміни характеристики досить змінити набір коефіцієнтів, що робить можливим створення адаптивних фільтрів;
- цифрові фільтри можуть працювати як з низькочастотними, так і з високочастотними сигналами.

Підводячи підсумки, хочеться зазначити, що поява радіоприймальних пристроїв з цифровою обробкою сигналів стало логічним продовженням розвитку цифрової техніки. Використання цифрової обробки сигналів дозволило розробляти системи високошвидкісного обміну даними по радіоканалах із застосуванням цифрових методів модуляції радіосигналу. Залежно від стадії прийому, на якій використовується цифрова обробка, можливе отримання як недорогих, компактних і малопотребляючих пристроїв аж до систем на кристалі, так і виробів, що відповідають жорстким вимогам по вибірковості, динамічному діапазону, чутливості і іншим параметрам, що досягається правильним поєднанням аналогової і цифровий частин приймального тракту. Найбільш ймовірно, що в перспективі розвиток «цифрового» прийому буде йти по шляху збільшення швидкостей дискретизації і обробки, що дозволить охопити все більш широкий діапазон частот, і при цьому буде зменшуватися частка аналогової схемотехніки в структурі приймача.

Загальна тенденція розвитку електроніки в останні два десятиліття - тотальний перехід до цифрового (дискретної) обробці. Аналогове телебачення і радіо, так само як і телефонія, стають анахронізмом, а аналогові носії аудіоінформації перетворюються в раритети. У сфері обробки високочастотних аналогових сигналів перехід до цифрової обробки виражений менш яскраво, проте це - домінуючий напрям розвитку елементної бази в даній області. Спонукають причин переходу до цифрової

обробки кілька, і одна з найважливіших - бажання в рамках однієї апаратної платформи створити набір пристроїв, одержуваних зміною програмно-апаратних засобів. Але проблем тут чимало, оскільки сучасні системи передачі даних працюють в діапазонах понад 1 ГГц, з частотними смугами від одиниць до десятків мегагерц, використовуючи досить складні схеми модуляції. Все це висуває особливі вимоги до продуктивності систем цифрової обробки. Тому якщо цифрова обробка сигналів на рівні потоків даних і стала сьогодні справою буденною (з точки зору масової користувальницької апаратури), то застосування цифрових пристроїв в СВЧ-тракті до зовсім недавнього часу продовжувало залишатися долею спеціальної апаратури. В останньому випадку мова йде про так звані програмно-визначені радіосистеми SDR (software defined radio).

Технологія SDR ще зовсім недавно не сприймалася інакше як засіб забезпечення тактичної зв'язку між різними військовими (і іншими спеціальними) підрозділами. Дійсно, потужним поштовхом до її розвитку в США послужили проблеми забезпечення взаємодії між десантними підрозділами і авіацією під час вторгнення в Гренаду в 1983 році. Тоді навіть при наявності штатних засобів зв'язку армійські підрозділи змушені були координувати дії авіації по звичайній телефонній мережі через свою базу в Форт-Брагг. Після настільки одіозної появи проблеми швидкого перенастроювання засобів зв'язку і їх взаємодії багато провідних фірм-виробників телекомунікаційного обладнання стали створювати спеціальні пристрої, що дозволяють дуже швидко перебудовувати не тільки алгоритми аутентифікації і криптозахисту, а й протоколи роботи в радіомережі, включно з вибором частотних діапазонів.

У ідеалізованої схемою SDR-систем відсутні блоки аналогової обробки (рисунок 1.3).

Однак, з огляду на частотні діапазони і ширину смуг багатьох сучасних

систем зв'язку, повністю реалізувати цю концепцію важко.

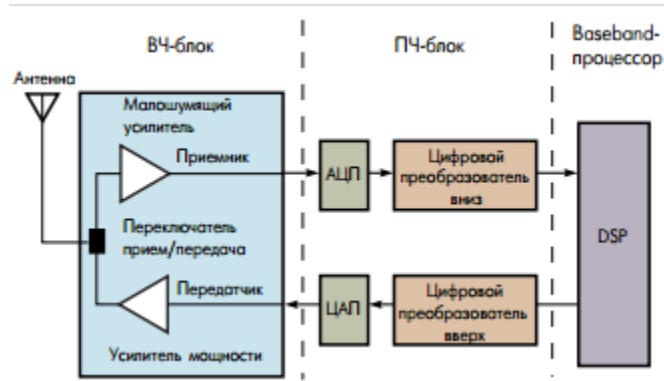


Рисунок 1.3 - Ідеалізована схема SDR-системи

Разом з тим, у багатьох областях телекомунікацій, наприклад в стільниковій телефонії, в системах стандарту IEEE 802.11 і т.п., все частіше використовуються схеми прямого перетворення (приймачі з нульовою несучою - ZIF) (рисунок 1.4).

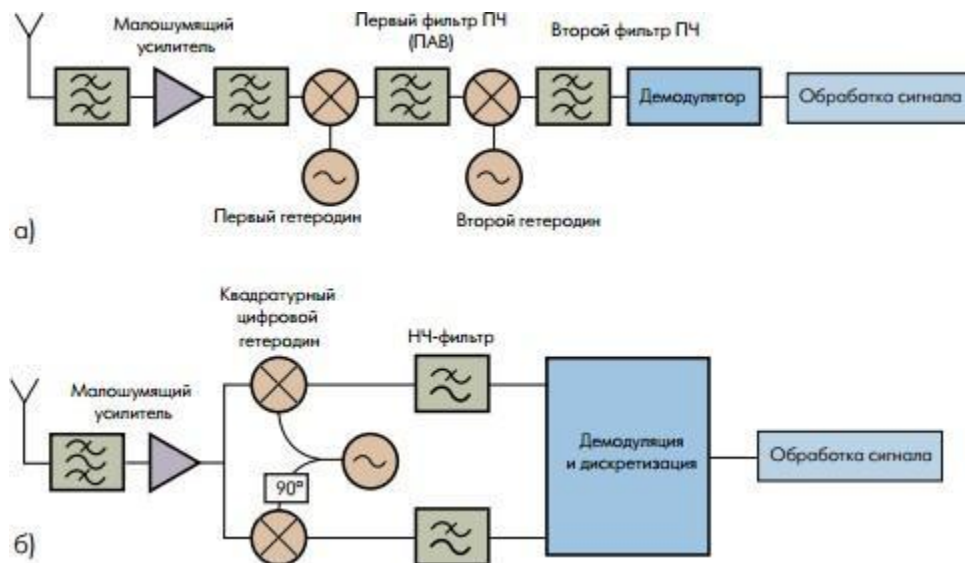


Рисунок 1.4 - Схеми приймачів з супергетеродинною архітектурою (а) і прямого перетворення (з нульовою ПЧ) (б)

З розвитком мікроелектронних напівпровідникових технологій НВЧ блоки радіотракта все більшою мірою стають цифровими. І справа не тільки в тому, що скорочення номенклатури НВІС (надвеликих інтегральних схем)

економить розробникам і виробникам не один мільйон доларів, - найчастіше спеціалізовані пристрої, що випускаються багатомільйонними тиражами, виявляються рентабельніше універсальних. Не менш важливо, що прецизійні аналогові пристрої - це відносно дорогі компоненти. Їх відрізняє не тільки низький рівень інтеграції і висока складність суміщення на одному кристалі з блоками цифрової обробки. Аналогові пристрої практично неминуче вимагають підстроювання в рамках виробничого циклу, а для цього необхідно складне спеціальне обладнання, що не тільки збільшує собівартість аналогової елементної бази, а й ускладнює застосування fabless-схеми виробництва. Для Росії ця проблема посилюється тим, що в нашій країні немає жодного мікроелектронного підприємства, включаючи "Мікрон" (якщо ми не праві, спростуйте), здатного виробляти сучасні прецизійні аналогові схеми. В значній мірі це пов'язано з відсутністю на вітчизняних підприємствах сучасного контрольно-вимірювального обладнання, об'єднаного в єдиний комплекс із засобами корекції параметрів (наприклад, лазерних установок, коригувальних фізичні параметри РС-ланцюгів на кристалі).

Не менш важливо, що зі зростанням міцності інформаційних каналів і розширенням діапазонів робочих частот підвищуються і вимоги до рівнів нелінійності і власних шумів кінцевих аналогових блоків трансиверів. Оскільки дані параметри визначаються фізичними властивостями напівпровідникових матеріалів і особливостями технології, вони часто не можуть бути знижені до прийняттого рівня, наслідком чого стане поетапне перетворення частоти (кілька проміжних частот (ПЧ), і, відповідно, кілька гетеродинів), поетапну аналогову фільтрацію, необхідність застосовувати ПАР -фільтри і т.д. Це неминуче ускладнює апаратуру, знижує її надійність і підвищує собівартість. Тому на сучасному етапі розвитку телекомунікаційної індустрії перехід до цифрової обробки в радіочастотних трактах перетворюється в безальтернативне рішення, до якого йдуть всі світові

виробники. До недавнього часу одним з елементів бездротових пристроїв, найбільш важко піддаються "цифровізації", був блок сполучення з аналоговим інтерфейсом (він же Analog Front End - AFE) - пристрій, що реалізує функції фільтрації вхідного сигналу, перетворення частоти вгору / вниз, квадратурної модуляції і т.п. для сполучення з процесором обробки сигналів (baseband-процесором).

2. Побудова сучасних приймачів та передавачів програмно-визначуваної системи

Принцип роботи

У традиційному супергетеродинному приймачі обробка сигналу повністю виконується електронними схемами (рисунок 2.1). Частота сигналу знижується до проміжної частоти (ПЧ), після чого проводиться обробка.

У перших SDR-приймачах замість демодулятора використовувався АЦП. Демодуляція і частково фільтрація сигналу проводилася в сигнальному процесорі. Сучасні АЦП набагато швидше, тому DSP може виконувати більше функцій. Для роботи DSP необхідно знати амплітуду і фазу сигналів. Прийнятий сигнал розділяється на дві компоненти: синфазну (I) і квадратурну (Q), зміщену на 90° .

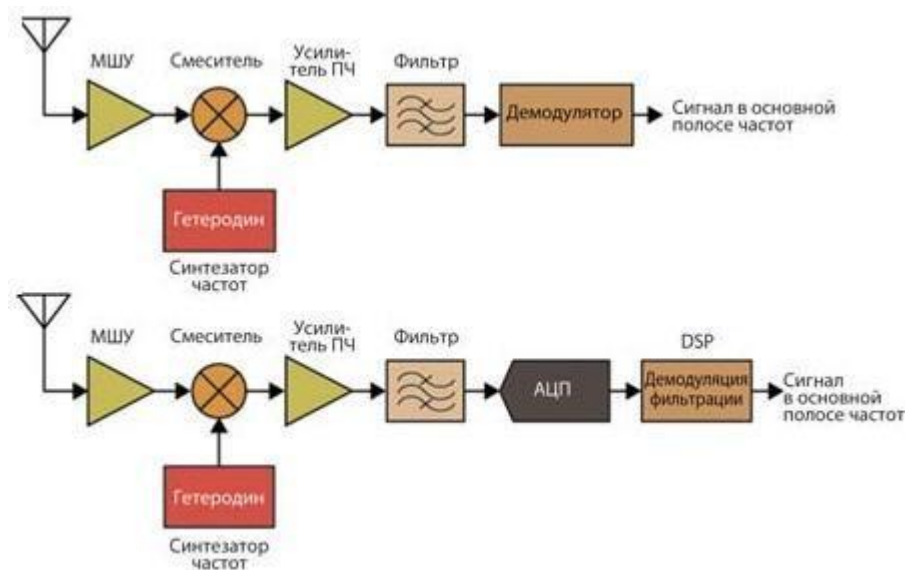


Рисунок 2.1 - Структурна схема супергетеродинного приймача і перших SDR

Схема сучасного SDR-приймача показана на малюнку 2.2. Вхідний сигнал посилюється маломощним підсилювачем і ділиться на компоненти I і Q шляхом змішування з сигналом гетеродина з синтезатора частот в ФАПЧ (для

отримання квадратурної компоненти він зміщується на 90°). Частота гетеродина підлаштовується під частоту сигналу, щоб різниця вихідних сигналів змішувачів дорівнювала нулю за відсутності модуляції. Для модульованого сигналу вона дорівнює сигналу основної смуги або вихідного модульованому сигналу. Ця архітектура отримала назву пряме перетворення або перетворення з нульовою проміжною частотою.

Після фільтрації сигналів основної смуги в ФНЧ вони оцифровуються в парі АЦП. Далі в цифровому перетворювачі частота сигналу знижується до робочого діапазону сигнального процесора.

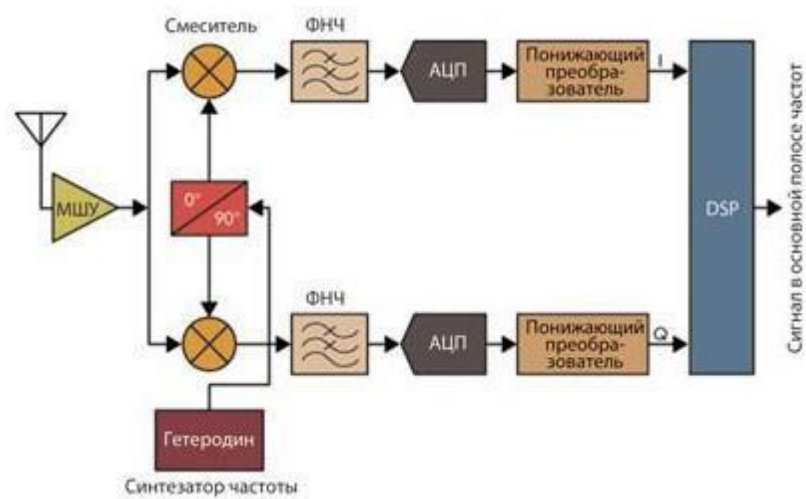


Рисунок 2.2 - Схема сучасного SDR приймача

У сучасних передавачах DSP-модулятор розділяє передані на I і Q компоненти і передає їх на підвищувальний перетворювач (рисунок. 2.8) і ЦАП.

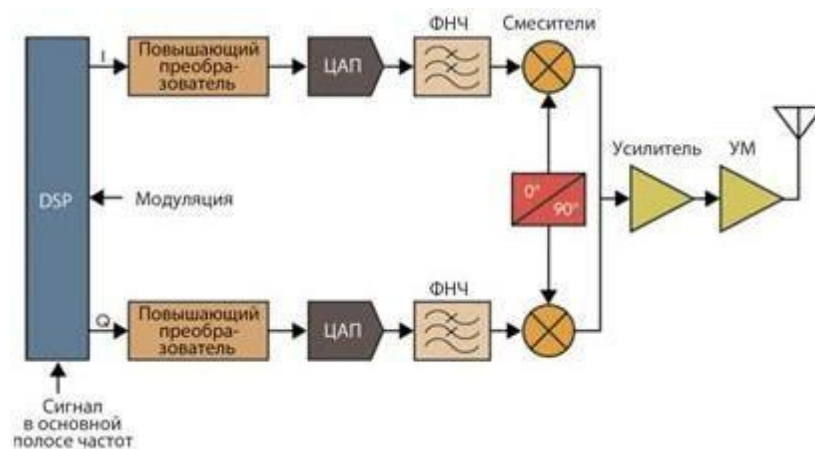


Рисунок 2.3. Схема сучасного SDR-передавача

Сигнал фільтрується і надходить в змішувач для підвищення частоти до частоти передачі. Потім сигнал проходить через підсилювач і подається на антену. У міру збільшення швидкодії перетворювачів схема спрощується. Останні моделі представляють собою фільтр і МШП (рисунок 2.4). Комерційні приймачі використовують смугу до 30 МГц.

Цифровим методом виконується наступні функції: фільтрація (НЧ, ВЧ, смугові і загороджуючі фільтри), модуляція (AM, FM, QAM, OFDM, ін.), демодуляція, вирівнювання, стиснення і відновлення, аналіз спектра, спотворення.

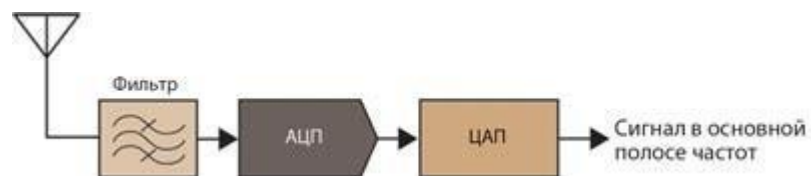


Рисунок 2.4. Найпростіша апаратна реалізація SDR

Нові типи модуляції і пов'язані з ними процедури, мають загальний термін «форма сигналу» (waveform). Змінивши програмне забезпечення, радіо перебудовується на іншу частоту і протокол передачі.

Перевагою SDR полягає в простоті апаратної частини. Стандартні радіочастотні схеми скорочуються до мінімуму, їх вартість знижується.

Сигнальний процесор бере на себе більшу частину функцій, які раніше виконувалися в аналогових схемах. Цей підхід дуже вдалий, враховуючи гнучкість програмної реалізації і можливість компенсації деяких небажаних ефектів, які виникають в апаратної частини. Більш того, програмна реалізація дозволяє, усунути безперервності, змінювати і доповнювати функціонал пристрою і покращувати його характеристики з мінімальними витратами. Зокрема SDR дозволяє швидко додавати нові типи модуляції, протоколи передачі і т.д. У разі апаратної реалізації це вимагало б виготовлення нової схеми.

Недоліки у SDR теж є. По-перше, це складність програмного забезпечення, витрати на розробку, в т.ч. тимчасові, більше енергоспоживання і в деяких випадках обмежений частотний діапазон.

Апаратна частина

Основні елементи SDR - АЦП, ЦАП і сигнальні процесори DSP. Частота вибірки перетворювача постійно підвищується, подолавши вже гігагерцевий кордон. Наприклад, перетворювач ADC12Dxx00RF Texas Instruments має частоту вибірки до 3,6 млрд виб/с.

Поряд зі швидкістю перетворення важливий фактор - швидкодія процесора, який повинен встигати обробляти дані. За великим рахунком замість сигнального процесора можна використовувати процесор загального призначення. Однак не завжди його використання буде оптимально, оскільки зустрічаються алгоритми, для реалізації яких потрібні спеціалізовані функції.

Інший підхід - використовувати замовний сигнальний процесор, який має спеціальну архітектуру, вбудовану пам'ять і набір арифметико логічних інструкцій, завдяки яким його швидкодія буде максимально високим.

Все частіше DSP реалізуються на матрицях FPGA. Такі функції як швидке перетворення Фур'є можуть бути виконані за допомогою цифрових логічних схем і легко реалізуються на FPGA. Оскільки вартість матриці постійно знижується, вони набувають все більшої привабливості в якості заміни сигнальних процесорах.

Ще один варіант - логічні елементи з жорсткими сполуками, які можна використовувати для реалізації функцій, які не потребують гнучкості програмування, таких як протоколи зв'язку. Логічні схеми мають високу швидкодію і мале споживання, займають небагато місця на кристалі. Такі логічні блоки часто називають апаратними прискорювачами.

Архітектура SDR приймача

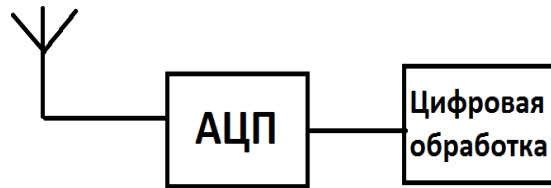


Рисунок 2.5 - Структурна схема ідеального SDR приймача

Основна задача SDR-системи - це максимальний перенос операцій в цифрову форму. В ідеалі АЦП повинен стояти безпосередньо після прийомної антени. Багато в чому саме з цієї причини розвиток SDR затримувалося (хоча варто визнати, військові почали використовувати дану архітектуру досить давно). Характеристики АЦП багато в чому будуть забезпечувати можливості застосування всього SDR-приймача.

Цифрову обробку сигналу можна робити за допомогою цифрового сигнального процесора (ЦСП), програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС) або мікросхеми ASIC, які вдають із себе мікросхему, заточену під певну мету. Найбільшу гнучкість системі надають ЦСП, а найбільшу продуктивність ASIC. Характеристики ПЛІС і по гнучкості і по продуктивності знаходяться приблизно посередині, а особливо з огляду на вартість розробки ASIC, мій вибір падає на ПЛІС. Розробка пристрою буде відбуватися зліва направо, від антени, тому вибирати ПЛІС варто тоді, коли знаєш що отримаєш на виході АЦП.

Тепер, коли ми маємо загальне уявлення про SDR-системи, можна уявити, які переваги вони нам дають в порівнянні з традиційними системами:

- Зменшені маса і габарити виробу;
- Зменшення споживаної потужності;
- Спрощення конструкції;
- Зменшення вартості (при обліку використання недорогих АЦП, варто відзначити що в цілому АЦП стають краще і дешевше);

- Масштабованість рішення.

Розділ 3

Бурхливий розвиток систем бездротового зв'язку в останні роки і виділення додаткових ділянок частотного спектра для роботи ліцензованих і неліцензованих пристроїв породжують великий попит на багатодіапазонні, багатостандартні приймачі (радіотрансівери). У той же час загальна тенденція до скорочення габаритів і енергоспоживання вимагає застосування конфігурованих рішень як для цифрової обробки сигналу, так і в аналогових каскадах проміжної частоти (ПЧ) і радіочастоти (РЧ). Сучасні цифрові сигнальні процесори (DSP) і мікросхеми програмованої логіки (FPGA) мають достатню продуктивністю для підтримки відразу декількох протоколів передачі і форматів сигналів, однак при проектуванні аналогової частини приймального і передавального трактів у розробників до недавнього часу не було альтернативи архітектурі з декількома паралельними каналами, оптимізованими під свою конкретну частину загального робочого діапазону частот. Поява конфігурованих компонентів, що включають в себе комбінацію АЦП, ЦАП і аналогових схем ПЧ і РЧ, значно спрощує життя розробникам пристроїв бездротового зв'язку. Одним з таких компонентів є представлена недавно компанією Analog Devices мікросхема AD9361, що випускається під торговою маркою Agile RF Transceiver, що можна перевести як «радіо-трансивер з широкими можливостями конфігурації». Ця схема і була обрана для практичних досліджень.

Опис AD9361

Блок-схема AD9361 приведена на рис. 3.1. На схемі видно, що компонент містить два канали прийому і два канали передачі, систему синхронізації, цифрові інтерфейси введення / виведення сигналів і управління, а також

допоміжні АЦП і ЦАП. Наявність двох пар прийомних і передавальних каналів спрощує побудову багатоантенних систем типу MIMO (multiple in, multiple out).

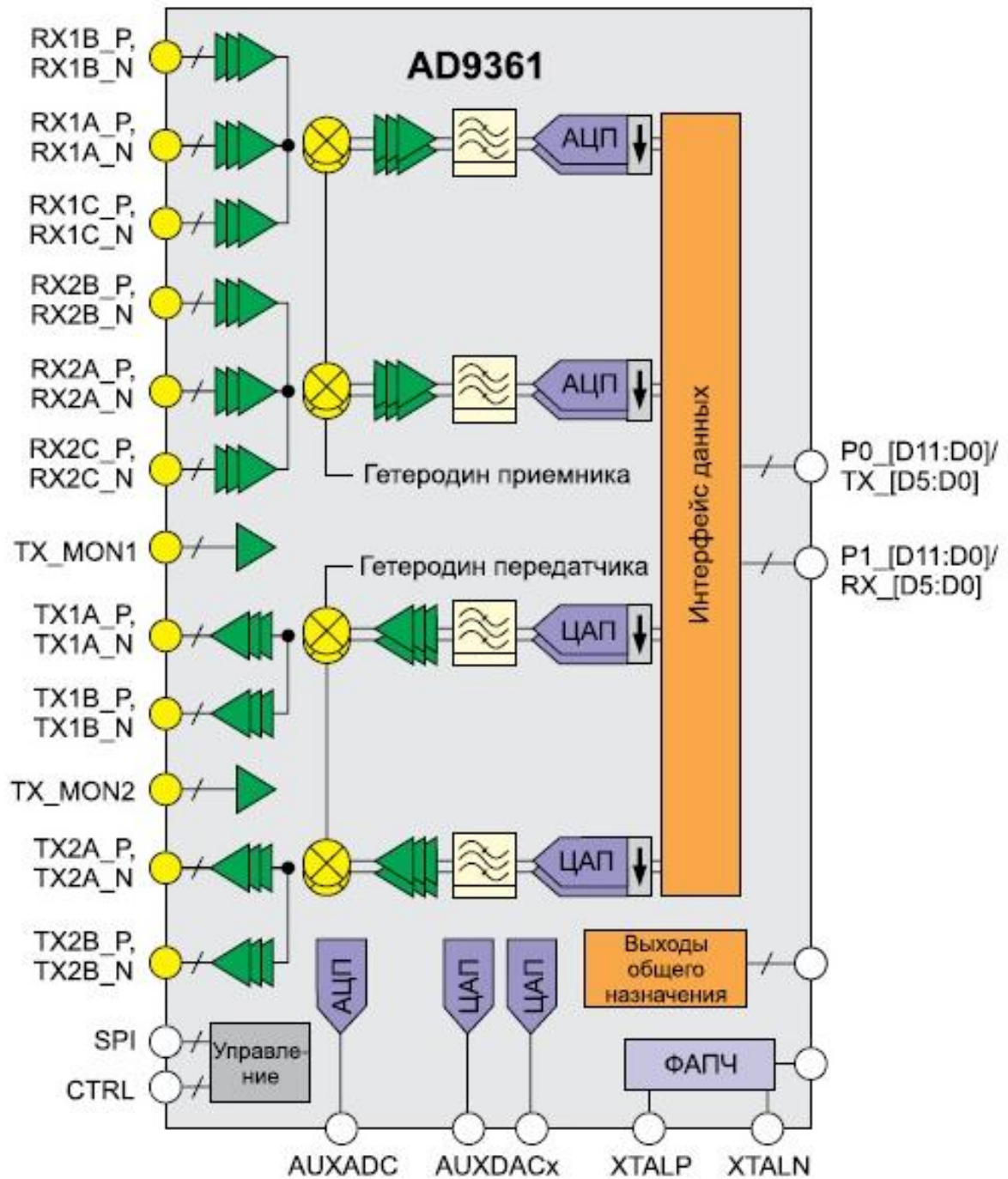


Рис. 3.1. Блок-схема AD9361

Структура приймача

Кожен з двох незалежних каналів прийому реалізований на базі архітектури з прямим перетворенням (рис. 3.2). приймальний тракт включає в себе вхідні малошумлячі підсилювачі (МШП), змішувач, погоджені підсилювачі квадратурних сигналів, аналогові фільтри для усунення побічних складових змішувача і запобігання спектральних накладень, два 12-розрядних АЦП з регульованою користувачем частотою дискретизації, а також набір цифрових фільтрів.

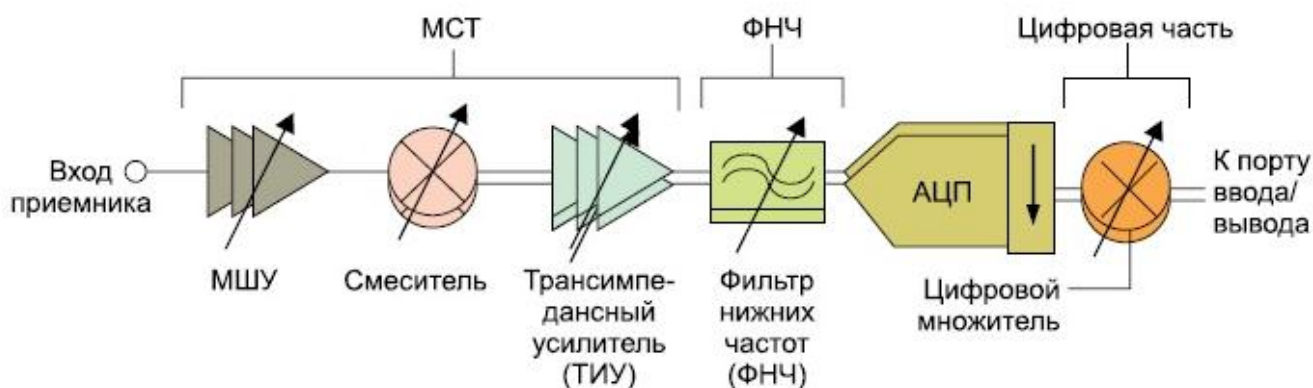


Рис.3.2 Структурна схема приймального тракту AD9361

Кожен приймальний канал має три (А, В і С) вхідних малошумлячих підсилювача (МШП). Всі вони вимагають застосування зовнішніх ланцюгів узгодження імпедансу і здатними працювати в смузі частот від 70 МГц до 6 ГГц, проте для досягнення оптимальних результатів на частоті вище 3 ГГц рекомендується використовувати тільки МШП А. Незважаючи на те, що МШП підтримують конфігурацію з несиметричними вхідними сигналами, найкращі показники коефіцієнта шуму і спотворень парних порядків (IP2) досягаються в конфігурації з диференційними вхідними сигналами. Входи МШП мають постійний зсув близько 0,6 В, тому може знадобитися розв'язка по змінному

струму в залежності від синфазної напруги зовнішньої схеми.

Максимально допустимий рівень пікової потужності на вході МШП дорівнює +2,5 дБм (несиметричний вхід, 50-омне джерело, ідеальне узгодження). Сигнал будь-якого з трьох МШП може бути підключений до сигнального тракту, що дозволяє використовувати радіотрансівер AD9361, наприклад, у багатодіапазонних системах з розподілом по частоті. Компонент також дозволяє користувачу працювати з зовнішніми МШП, що значно збільшує свободу проектування.

Аналоговий змішувач здійснює перенос вхідного сигналу з робочої частоти приймача в смугу модулюючих частот. Змішувачі двох прийомних каналів використовують загальний сигнал гетеродина, який формується синтезатором приймального тракту.

Квадратурні складові вихідного комплексного сигналу змішувача піддаються посиленню в каскадах трансімпедансних підсилювачів і попередньої фільтрації, після чого подаються на вхід АЦП.

Розподіл фільтрації в каналах прийому показано на рис. 3.3. В аналоговій частині

сигнал спочатку пропускається через однополюсний фільтр нижніх частот (ФНЧ) з програмованою в смугі від 1 до 70 МГц частотою зрізу за рівнем 3 дБ, а потім - через ФНЧ Баттерворта третього порядку, частоту зрізу якого користувач може змінювати в діапазоні від 200 кГц до 39,2 МГц.

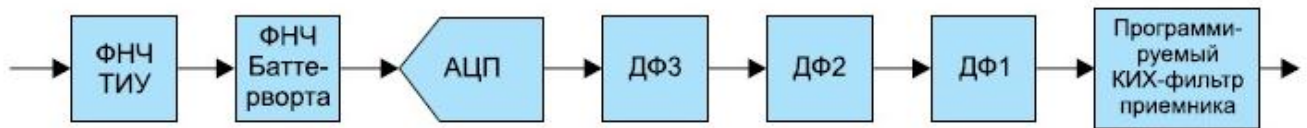


Рис. 3.3. Розподіл фільтрації в прийомному каналі

Далі цифровий сигнал з виходу АЦП проходить через комбінацію з трьох фільтрів з фіксованими коефіцієнтами децимації i , на останньому етапі, через програмований децимуючий фільтр (ДФ) з кінцевою імпульсною характеристикою (КИХ). Тим самим досягається зниження швидкості виведення даних для зменшення навантаження на процесор обробки сигналів (Digital Base Band, DBB). Будь-який з децимуючих фільтрів можна обійти.

Канали прийому мають незалежні схеми регулювання посилення з автоматичним або ручним керуванням (APУ і РРУ), блоки вимірювання рівня сигналу (Receive Signal Strength Indicator, RSSI), внутрішні схеми компенсації зсуву постійної складової і корекції розузгодження квадратур.

Коефіцієнт шуму приймача складає 2 дБ на частоті 1 ГГц і 3 дБ - на частоті 2 ГГц.

Структура передавача

Два каналу на передавальній стороні також мають незалежне управління і включають в себе всі блоки, необхідні для реалізації передавача з прямим перетворенням частоти. Структура підсистеми фільтрації в каналах передачі повторює структуру підсистеми фільтрації каналів прийому, тільки зі зворотним порядком проходження. Блок-схема зображена на рис. 3.4.

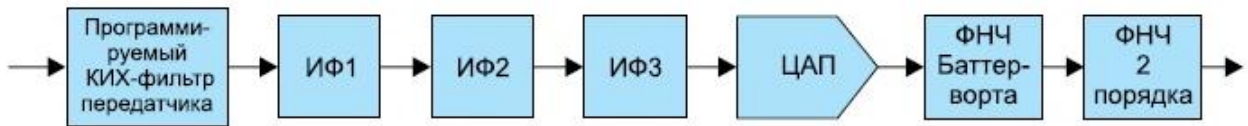


Рис. 3.4. Розподіл фільтрації в передавальному каналі

Квадратурні цифрові відліки сигналів в смузі модулюючих частот з розрядністю 12 біт, що надходять від зовнішнього джерела, проходять через програмований інтерполюючий КІХ-фільтр і комбінацію трьох фільтрів з фіксованими коефіцієнтами інтерполяції, після чого подаються на вхід 12-розрядних ЦАП. Кожен з чотирьох інтерполіруючих фільтрів (ІФ) користувач може обійти. Аналогові квадратурні сигнали з виходу ЦАП піддаються низькочастотній фільтрації для придушення побічних спектральних складових, що виникають по причині дискретного в часі характеру вихідних даних. Каскад низькочастотної аналогової фільтрації включає в себе ФНЧ Баттерворта третього порядку з програмованою в діапазоні від 625 кГц до 32 МГц частотою зрізу і однополюсний ФНЧ, частоту зрізу якого можна змінювати в діапазоні від 2,7 до 100 МГц.

Відфільтровані аналогові сигнали подаються в змішувачі для перетворення частоти. Як і на приймальній стороні, обидва передавальних канали використовують загальний сигнал гетеродина, що формується синтезатором передавального тракту. Отриманий високочастотний сигнал з виходу змішувачів поступає на вихідні підсилювачі. Кожен з каналів має по два вихідних підсилювача з близькими характеристиками. Крім того, канали передачі також містять схеми автоматичного калібрування і вимірювання рівня вихідного сигналу.

Вбудовані гетеродини

Формування сигналів гетеродина для приймального і передавального трактів здійснюється двома ідентичними незалежними синтезаторами з фазовим автопідстроюванням частоти (ФАПЧ) і дробовим коефіцієнтом тому ділення ($\frac{1}{N}$). Синтезатори забезпечують можливість перебудови робочої частоти трансивера в діапазоні від 70 МГц до 6 ГГц. Два генератора, керованих напругою (ГУН), і петльові фільтри інтегровані в кристал і не вимагають додаткових зовнішніх компонентів, за винятком одного резистора і одного конденсатора.

ГУН можуть перебудовуватися в діапазоні від 6 до 12 ГГц. Частота гетеродина від 47 МГц до 6 ГГц досягається завдяки поділу частоти всередині схеми ФАПЧ. В режимі з частотним дуплексним поділом (FDD) обидва синтезатора можуть працювати одночасно, а в режимі з тимчасовим дуплексним поділом (TDD) вони поперемінно включаються/відключаються відповідно до часових слотів прийому/передачі для зменшення споживаної потужності.

Структурна схема синтезаторів приведена на рис. 3.5. Жовтим кольором виділено параметри, які можна програмувати.

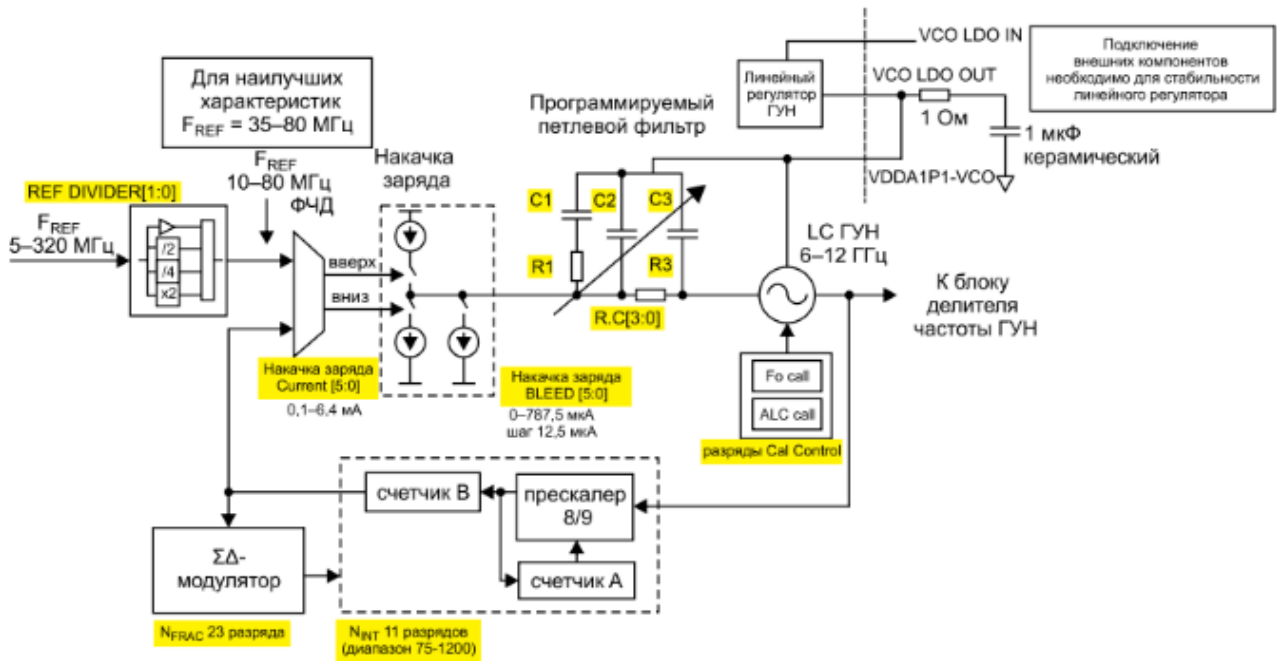


Рис. 3.5. Структурна схема синтезатора гетеродину

Зовнішній гетеродин

AD9361 містить два окремі входи для підключення зовнішніх гетеродинів (EXT_LO): один для приймального тракту, інший - для передавального. На відміну від внутрішніх ГУН, які завжди працюють на частоті від 6 до 12 ГГц незалежно від частоти настройки трансивера, при використанні зовнішнього гетеродина його частота повинна бути рівною подвоєному значенню частоти настройки трансивера. На рис. 3.6. зображена структурна схема підключення зовнішнього гетеродина.

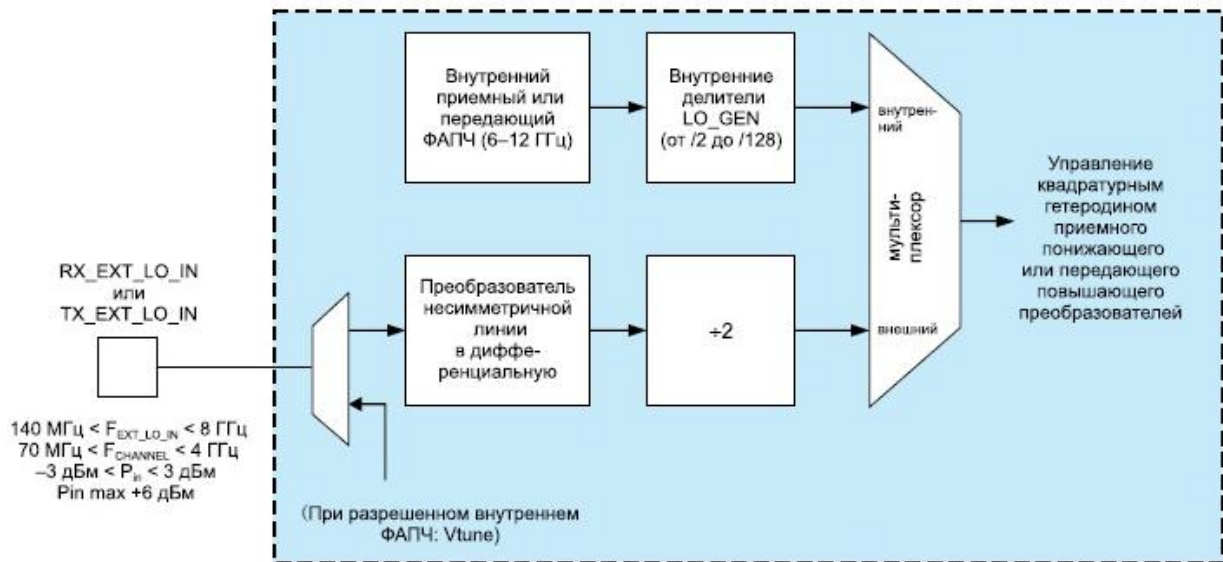


Рис. 3.6. Архітектура тракту зовнішнього гетеродина (приймальний і передавальний тракт ідентичні)

Для формування квадратурних складових сигнал зовнішнього гетеродина ділиться на 2 за допомогою внутрішнього дільника.

Рекомендована частота зовнішнього гетеродина повинна становити від 140 МГц до 8 ГГц, покриваючи частоту настройки передатчика від 70 МГц до 4 ГГц. Однак частота зовнішнього гетеродина може бути нижча або вища зазначених значень, але при цьому характеристики узгодженості квадратур і фазового шуму не гарантуються.

Потужність сигналу на входах EXT_LO повинна бути від -3 до +3 дБм (але не повинна перевищувати +6 дБм). Сигнал на входах EXT_LO - несиметричний.

При використанні зовнішнього гетеродина сигнал повинен бути поданий на обидва входи, навіть якщо частоти настройки приймача і передавача однакові. Допускається використовувати або обидва внутрішніх, або обидва зовнішніх гетеродина.

Синтезатор цифрової частини

Всі тактові сигнали для перетворювачів даних, схем цифрової обробки сигналів, а також цифрового інтерфейсу введення/виведення генеруються окремим синтезатором з ФАПЧ, який має програмований діапазон робочих частот від 715 до 1430 МГц. Його структурна схема зображена на рис. 3.7.

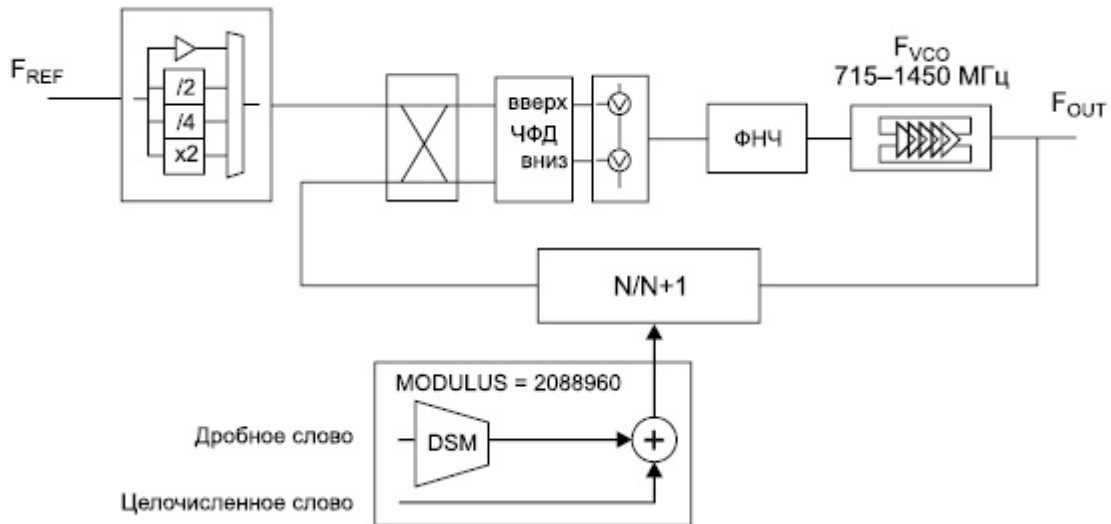


Рис. 3.7. Структурна схема синтезатора для цифрової частини

Сигнал опорної частоти для синтезаторів обох типів може надходити від зовнішнього джерела (робочий діапазон - від 5 до 320 МГц; рекомендований діапазон - від 19 до 80 МГц) або формуватися інтегрованим генератором опорної частоти (робочий діапазон - від 20 до 50 МГц), що працює із зовнішнім кварцовим резонатором (рис. 3.8).

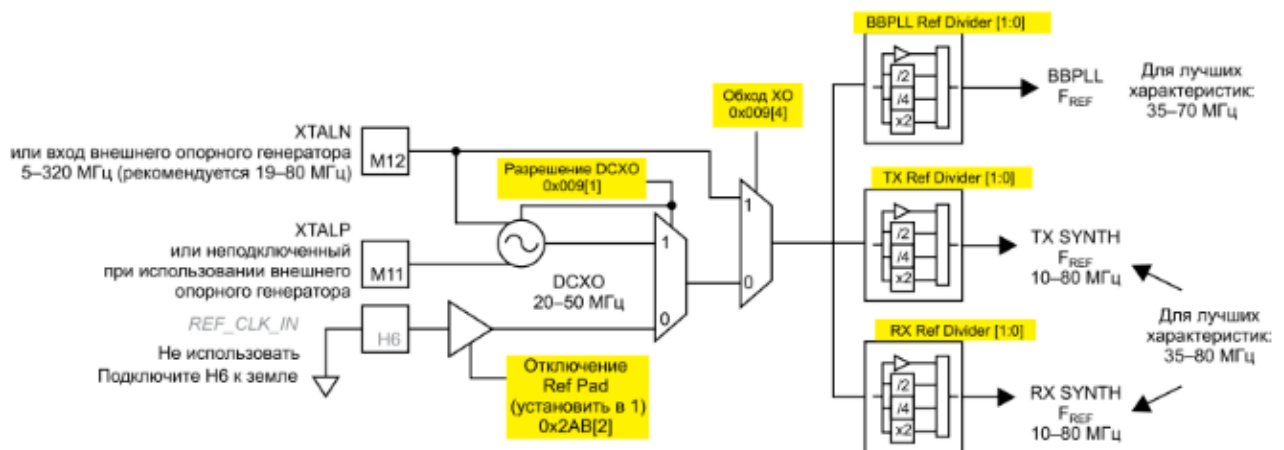


Рис. 3.8. Структурна схема генератора опорної частоти

Цифровий інтерфейс

Введення/виведення цифрових сигналів здійснюється через цифровий інтерфейс, що складається з двох паралельних портів (P0 і P1), які підтримують роботу з несиметричними сигналами КМОП або диференціальними сигналами LVDS. Порти мають широкі можливості конфігурації для реалізації найрізноманітніших режимів обміну і мають максимальну тактову частоту 61,44 МГц. Налаштування параметрів інтерфейсу введення/виведення всіх конфігуруємих користувачем параметрів цифрових і аналогових блоків обробки сигналів здійснюється за допомогою послідовного інтерфейсу управління (SPI), що працює в трьохпроводному (двонаправлена лінія введення/виведення даних) або чотирьохпроводному (роздільні лінії введення і виведення даних) режимах.

Додаткові можливості

Два додаткових 10-розрядних ЦАП, здатні видавати в навантаження струм до 10 мА, можна налаштувати як для установки довільного рівня користувачем, так і для автоматичного перемикавання в режимі дуплексного зв'язку з часовим розподілом каналів (TDD) для зменшення навантаження на процесор обробки сигналів (DBB).

Додатковий 12-розрядний АЦП з вхідним діапазоном від 0 до 1,3 В і установлюваним часом перетворення дозволяє контролювати необхідні сигнали, наприклад, з виходу детектора потужності вихідного підсилювача потужності (ПП) або з зовнішнього або внутрішнього датчика температури. Для поліпшення шумових характеристик можна підключити конденсатор 680 пФ до виводу AUXADC.

AD9361 містить чотири виводи загального призначення (GPO). Ці виводи, як правило, використовуються для управління антенними перемикачами або включенням МШП. Є дві можливості управління цими виводами: за допомогою SPI-команд від процесора обробки сигналів (BBP) або в автоматичному режимі, за допомогою кінцевого автомата (Enable State Machine, ENSM).

Синхронізація декількох прийомопередавачів

Для додатків бездротового широкосмугового доступу, багатоелементних МІМО-систем, а також систем формування діаграми спрямованості існують методи збільшення пропускної здатності при ефективному використанні радіочастотного спектра. За допомогою сучасних інтегрованих приймачів з широкими можливостями конфігурування, таких як AD9361, розробку подібних систем можна спростити.

Деякі системи можуть складатися з безлічі каналів прийому-передачі і вимагати складного механізму синхронізації даних. Наприклад, для МІМО-систем з числом вхідних і вихідних каналів, більшим, ніж два, необхідно вже декілька приймачів, таких як AD9361, працюючих від одного опорного генератора. AD9361 має механізм синхронізації, приклад якого зображений на рис. 3.9.

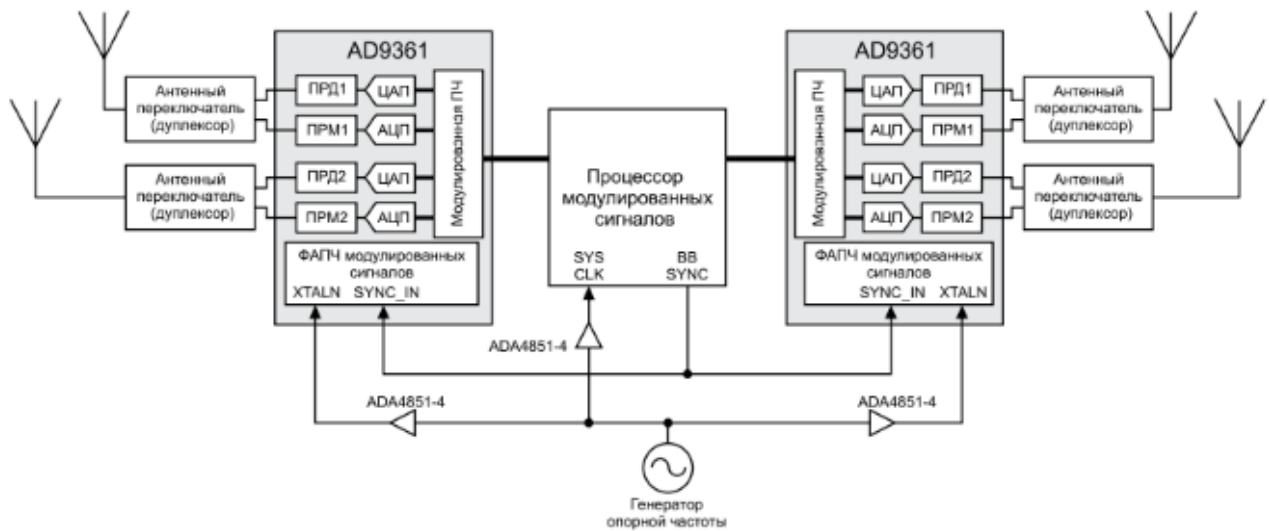


Рис. 3.9. Приклад багатокристалльної конфігурації

Логічний вхід SYNC_IN потрібен для вирівнювання імпульсів синхронізації кожного з пристроїв із загальним опорним сигналом синхронізації. Цей приклад ілюструє синхронізацію двох пристроїв, проте загальна кількість паралельних пристроїв обмежена тільки навантажувальною здатністю драйвера логічних сигналів і сигналів синхронізації.

Енергоспоживання

Енергоспоживання РЧ-трансивера AD9361 сильно залежить від режиму, в якому працює прийомопередавач. Стандартна напруга живлення становить 1,3 В. Значення струму споживання трансивера, в залежності від режиму роботи, такі:

- 180 мкА режим сну (sleep mode);
- режим 1 Rx, 1 Tx, TDD, несуча - 800 МГц, смуга - 5 МГц:
 - ❖ 180 мА - приймач;
 - ❖ 190 мА - передавач при 27 дБм вихідної потужності;
 - ❖ 340 мА - передавач при +7 дБм вихідної потужності;
- режим 2 Rx, 2 Tx, FDD, несуча - 2,4 ГГц, смуга - 20 МГц:

- ❖ 740 мА - приймач при 27 дБм вихідної потужності;
- ❖ 1050 мА - приймач при +7 дБм вихідній потужності.

Короткий огляд аналогічних трансиверів

Технологія виробництва мікросхем конфігурованих радіотрансиверів стала доступною відносно недавно, і компонентами, аналогічними AD9361, на сьогодні є приймач від Lime Microsystems LMS6002D і прийомопередавачі від Maxim Integrated серії MAX258x.

Приймач серії MAX258x від Maxim Integrated

Цей приймач (рис. 3.10) має такі особливості:

- два приймальних (Rx) і два передавальних (Tx) канали;
- незалежні синтезатори ФАПЧ з дробовим коефіцієнтом ділення (frac-N) для приймальних і передавальних каналів;
- перебудований діапазон частот з 1-го по 41-й канал LTE;
- конфігуровувана смуга від 1,4 до 20 МГц;
- синтезатор для роботи внутрішньої логіки;
- додаткові АЦП, ЦАП, вбудований датчик температури;
- паралельний інтерфейс LVDS, сумісний з JESD207, для зв'язку з BBR.

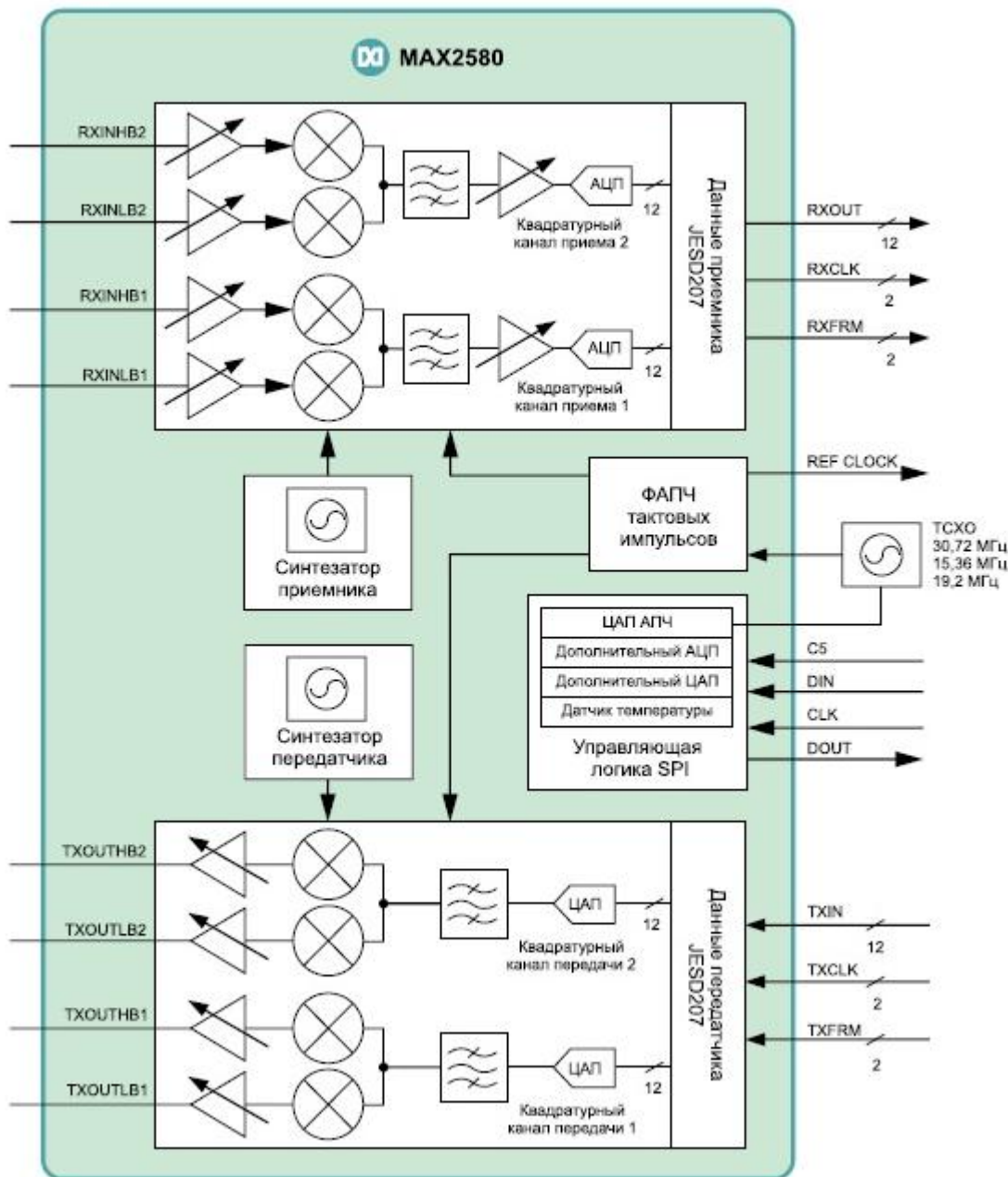


Рис. 3.10. Блок-схема MAX2580

РЧ-трансивер LMS6002D від Lime Microsystems до недавнього часу був першим конфігурованим інтегрованим прийомопередавачем на ринку. LMS6002D (рис. 11) побудований на архітектурі з прямим перетворенням частоти і містить МШП, драйвер УМ, змішувачі приймача і передавача, фільтри приймача і передавача, схему управління підсиленням приймача і

схему контролю потужності передавача.

Особливості LMS6002D:

- один приймальний і один передавальний канал;
- діапазон частот від 300 МГц до 3,8 ГГц;
- конфігурована смуга від 1,5 до 28 МГц (всього 16 значень);
- коефіцієнт шуму:
 - LNA1 - 3,5 дБ на 1 ГГц;
 - LNA2 - 5,5 дБ на 2 ГГц;
 - LNA3 - 10 дБ на 2 ГГц;
- енергоспоживання (при напрузі живлення 1,8 і 3,3 В):
 - 280 мА - передавач при максимальному підсиленні;
 - 220 мА - приймач при максимальному підсиленні.

Висновки

Було розглянуто поточні пропозиції на ринку конфігурованих радіотрансиверів. Основними особливостями цих пристроїв є широкі можливості конфігурації радіочастотного тракту (центральна частота, смуга, підсилення і т. д.), а також невеликий розмір корпусу. Завдяки розвитку технологій це стало можливо вже сьогодні. Серед компаній, що пропонували подібні рішення:

- Analog Devices з чіпом AD9361,
- Lime Microsystems з чіпом LMS6002D
- Maxim Integrated з лінійкою MAX258x.

Трансивер MAX258x від Maxim Integrated з конфігурацією 2 Rx, 2 Tx є цікавим рішенням з програмованою логікою від 1,4 до 20 МГц, однак поки цей чіп недоступний для широкого кола розробників.

Мікросхема LMS6002D від Lime Microsystems, як перший конфігурований трансивер, залишалася до недавнього часу кращим рішенням для розробників, котрим важлива виняткова гнучкість при розробці систем зв'язку.

З новим чіпом AD9361 від Analog Devices розробники систем зв'язку отримали наступні переваги:

- Подвійну кількість каналів (2 Tx, 2 Rx проти 1 Tx, 1 Rx у LMS6002D) і можливість створення MIMO-систем на одному кристалі.
- На 69% більш широкий діапазон перебудови частоти (від 70 МГц до 6 ГГц у AD9361, в той час як у LMS6002D - від 300 МГц до 3,8 ГГц), і можливість роботи в діапазоні від FM-радіостанцій до Wi-Fi 5,9 ГГц.
- На 111% ширший діапазон настройки смуги каналу (від 200 кГц до 56 МГц у AD9361, від 1,5 до 28 МГц - у LMS6002D), що дозволяє AD9361 працювати в системах від GSM до двопунктового зв'язку (point to point).

- Більш ніж на 1,5 дБ нижче коефіцієнт шуму (2 дБ проти 3,5 дБ на 1 ГГц), що дає можливість передавати сигнал на більші відстані.

За допомогою нових інтегрованих конфігурованих прийомо-передавачів розробники програмно-визначуваних радіо-систем (Software Defined Radio, SDR) зможуть вийти на новий рівень проектування систем зв'язку. Застосування подібних пристроїв дозволяє істотно зменшити габарити розроблюваних систем, знизити енергоспоживання і скоротити час виходу нових виробів на ринок.

Перелік використаних джерел

1. Галкін. В. А. Основи програмно-конфігурованого радіо. - М. :
Гаряча лінія - Телеком, 2015. - 372с.
2. Малі космічні апарати. У 3 кн. Кн. 1. Пікосупутники.
Наноспутники: справоч. посібник / В. Н. Блінов, Н. Н. Іванов, Ю. М.
Сеченов, В. В. Шалай. - Омськ: Изд-во ОмГТУ, 2010. - 212с.
3. Пінігін М.С. Розробка SDR приймача: Випускна
кваліфікаційна робота бакалавра. - Новосибірськ: СіБГУТІ, 2016 - 69с.

Додаток

Порівняння принципів побудови приймачів (в пункт 2)

На сьогоднішній день існує два популярних принципи побудови приймачів:

- 1) супергетеродинний;
- 2) прямого перетворення.

Структурна схема супергетеродинного приймача приведена на рис.

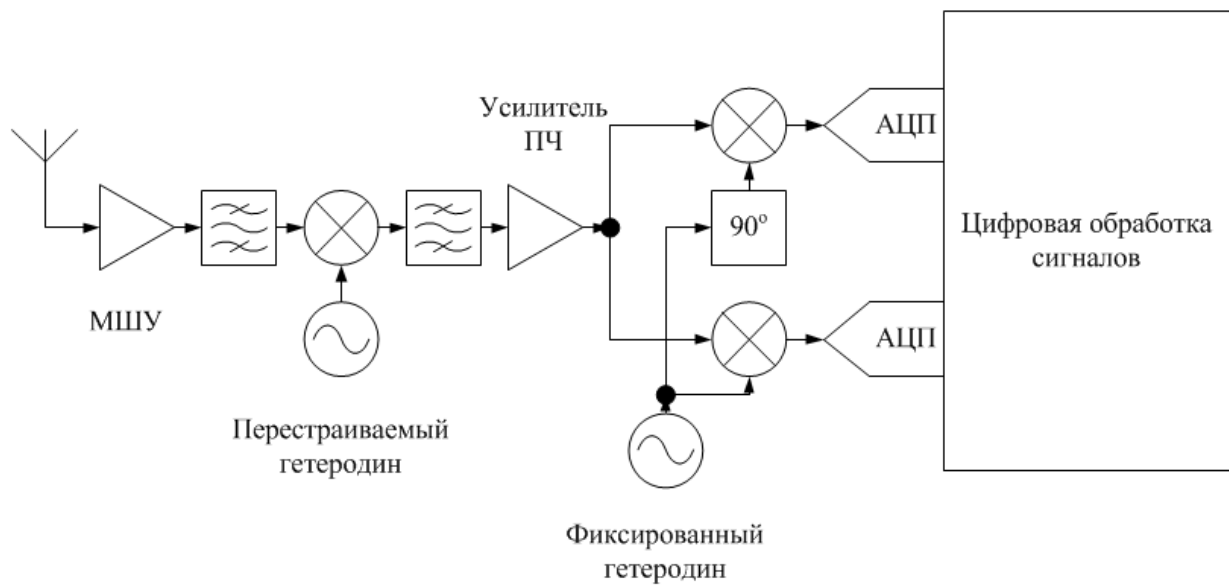


Рис. Структурна схема супергетеродинного приймача

Переваги даної схеми:

- 1) хороша селективність;
- 2) підсилення розподілено між декількома підсилювачами, що працюють на різних частотах;
- 3) низький вплив ефекту прямого детектування;
- 4) формування I / Q сигналів здійснюється для постійної частоти.

Недоліки:

- 1) порівняно висока складність;
- 2) необхідність наявності декількох гетеродинів;
- 3) необхідність наявності якісних фільтрів ПЧ, що заважає досягненню реалізації пристрою на одній мікросхемі;

Структурна схема приймача прямого перетворення наведена на рис.

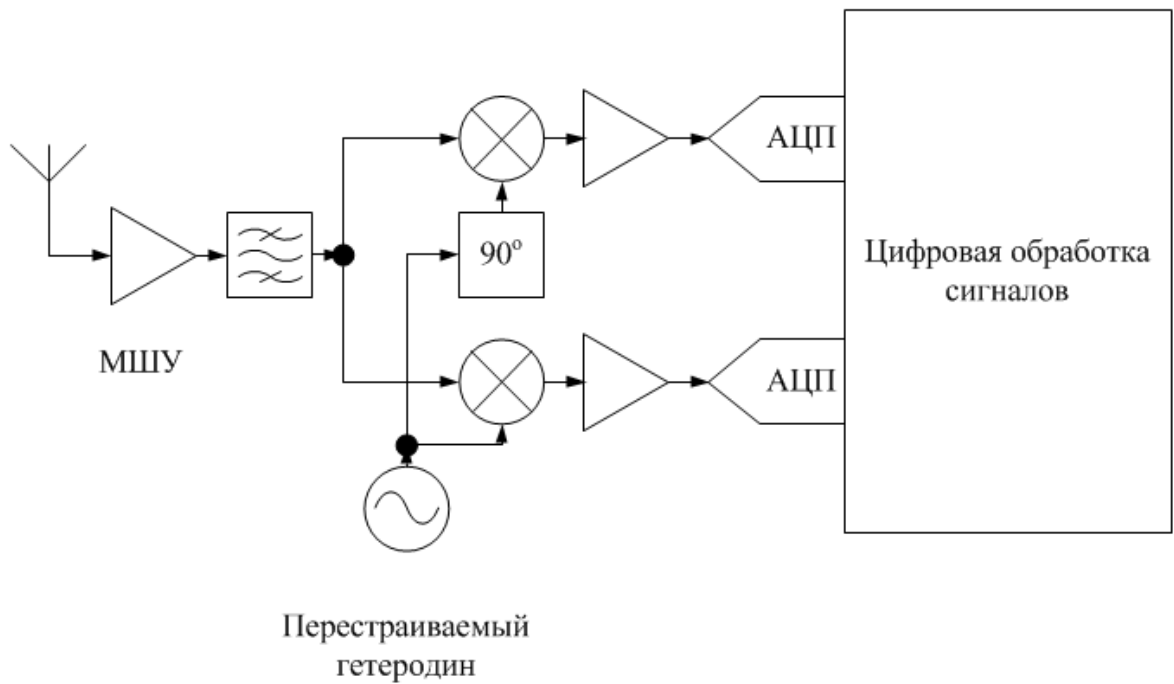


Рис. Структурна схема приймача прямого перетворення

Такий приймач є найпростішим. Має в своєму складі мінімальну кількість вузлів, необхідних саме для прийому сигналів. Сигнал з антени потрапляє на малошумний підсилювач (МШП) і преселективний фільтр. Далі за допомогою єдиного гетеродина (який також служить формувачем I/Q сигналів) переноситься на частоту прийому. Сформовані I/Q сигнали підсилюються і передаються на АЦП.

Переваги:

- 1) низька складність побудови;
- 2) придатність до побудови на інтегрованих схемах;
- 3) невисокі вимоги до фільтрів;
- 4) наявність одного гетеродина.

Недоліки:

- 1) вплив ефекту прямого детектування;
- 2) вимоги до гетеродина підвищуються, оскільки саме від нього залежить на якій частоті буде працювати приймач.

Слід зазначити, що для обох принципів побудови SDR можлива реалізація розділу I/Q сигналів як в аналоговій частині, так і цифровими засобами.

Найчастіше вибирають варіант реалізації I/Q сигналів в аналоговій частині, оскільки таким чином вдається розширити спектральну смугу передачі сигналу в цифрову систему обробки. Стає можливим розширити смугу прийому до частоти, що дорівнює частоті дискретизації АЦП.

По теоремі Котельникова необхідно, щоб частота дискретизації мінімум в два рази перевищувала частоту дискретизуємого сигналу. Таким чином, АЦП може точно відтворити тільки ті сигнали, які в два рази нижче його частоти дискретизації.

Якщо використовувати реалізацію приймача з одним АЦП, а значить з цифровим виділенням I/Q сигналів, то смуга прийому дійсно буде в два рази нижче частоти АЦП.

Якщо ж використовувати реалізацію приймача з аналоговим виділенням I/Q сигналів (два АЦП), то смугу прийому вдається отримати рівною частоті дискретизації АЦП. Це стає можливим завдяки I/Q сигналам, адже вони представляють собою компоненти одного і того ж сигналу, але зміщені по фазі на 90° . Якщо обидва АЦП зв'язані по тактовій частоті, то при надходженні сигналу беруться одночасно відліки по I і Q сигналам. Отже, за кожен такт дискретизації беруться два відліку одного і того ж сигналу. Відліки представляють собою рівні одного і того ж сигналу зсунуті по фазі (в часі). Таким чином можна приймати смугу частот, яка дорівнює частоті дискретизації АЦП.

Для дослідження була вибрана структура приймача з прямим перетворенням. Вибір обґрунтований тим, що реалізація приймача прямого перетворення простіше і перспективніше з точки зору розвитку схмотехнічної реалізації. Порівняльна характеристика двох принципів побудови приймачів наведена в табл. 1.

Таблиця 1.

Супергетеродинний приймач	Приймач прямого перетворення
Основна селекція здійснюється на проміжній частоті	Основна селекція здійснюється на низькій частоті
Основне підсилення на проміжній частоті, що вимагає використання високочастотних підсилювачів	Основне підсилення на низькій частоті, що простіше і дешевше реалізувати
Дзеркальний канал розташований тим ближче до основного, чим вище значення ПЧ. Вибірковість приймача по дзеркальному каналу забезпечує преселектор. Для його спрощення бажано підвищувати значення ПЧ, що створює необхідність робити фільтр основної селекції більш складним і дорогим. Інші побічні канали прийому можна визначити згідно з формулою $mfc \pm nfc_{гет} = f_{ПЧ}$, де m і n будь-які цілі числа. Інтенсивність перешкод зменшується з ростом m і n	Щоб перешкода потрапляла в смугу пропускання фільтра-преселектора, для будь-якого побічного каналу прийому повинно виконуватися співвідношення $mfc \pm nfc_{гет} = F$, де F - дуже низька звукова частота. Приблизно можна вважати $mfc \pm nfc_{гет} = 0$. Генерація гармонік сигналу в змішувачі майже випадковий процес, так як для цього необхідні рівні сигналу, наближені до рівня гетеродинного. Тому $m = 1$, значить побічні канали утворюються тільки на частотах гармонік гетеродина $2fc_{гет}$, $3fc_{гет}$ і т. д. Навіть прості фільтри майже повністю відфільтровують ці компоненти. Залишається тільки дзеркальний канал основної гармоніки гетеродина. Для придушення цього ефекту використовуються програмні засоби, які діють ефективніше аналогових
Для цього типу приймачів характерні інтерференційні свисти при налаштуванні приймача на частоті $mfc_{гет} \pm nfc_{гет}$. В такому випадку на вхід приймача потрапляють гармоніки або комбінаційні частоти двох гетеродинів приймача	Інтерференційні свисти в гетеродинному приймачі взагалі відсутні, оскільки є тільки один гетеродин

З наведених причин проектування хорошого супергетеродина стає дуже складним завданням, оскільки потрібно враховувати комбінаційні частоти двох гетеродинів. Це ставить у вигідне становище приймач прямого перетворення. Суб'єктивно ефір здається «чистішим» і, крім того, почувши слабкий сигнал можна бути впевненим, що станція працює на частоті настройки приймача, а не на якій-небудь іншій частоті.