

ХИЖНЯК АНДРІЙ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0009-0005-5525-8353>e-mail: dk92.hygnak@iit.kpi.ua**ЛИСЕНКО ОЛЕКСАНДР**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0003-1051-1149>e-mail: o.m.lysenko@kpi.ua

РОЗРОБЛЕННЯ АРХІТЕКТУРИ БАГАТОКАНАЛЬНОГО КОНВЕЄРНОГО РАДІОПРИЙМАЧА НА ОСНОВІ FPGA

Сучасні телекомунікаційні мережі стикаються з дедалі складнішими викликами через постійне зростання щільності використання електронних пристроїв, активне застосування широкого спектру радіочастот та необхідність забезпечення високого рівня електромагнітної сумісності. Традиційні радіоприймальні системи, що використовують одноканальні або прості багатоканальні схеми, вже не відповідають сучасним вимогам, оскільки вони обмежені у можливості одночасного моніторингу декількох частотних смуг та швидкої адаптації до динамічних змін умов середовища. Це викликає потребу у подальшому розвитку існуючих підходів багатоканального радіоприйому та технічних рішень їх реалізації із використанням технології програмно-визначеного радіо (SDR). В статті детально проаналізовано основні методи багатоканального радіоприйому, зокрема, метод мультиплексування з часовим поділом (Time Division Multiplexing, TDM), метод мультиплексування з частотним поділом (Frequency Division Multiplexing, FDM), метод багатоканального цифрового радіоприйому із використанням частотної селекції та метод конвеєрної цифрової обробки сигналів, визначено їх переваги та недоліки, що дозволило обґрунтувати вибір в якості базового для використання в дослідженні багатоканального конвеєрного підходу та, як наслідок, запропонувати архітектуру багатоканального конвеєрного радіоприймача на основі FPGA підвищеної ефективності за критеріями чутливості та продуктивності. Запропоноване технічне рішення із використанням IQ-міксерів забезпечує ефективне перенесення частотних діапазонів у базову смугу, що дозволяє реалізувати якісний цифровий прийом сигналів без суттєвого погіршення їх характеристик. Водночас, встановлено, що застосування IQ-міксерів супроводжується низкою недоліків, таких як дисбаланс IQ-каналів і зміщення постійного струму, що вимагає використання додаткових компенсаційних алгоритмів. Перевірено ефективність використання цифрових CIC- та FIR-фільтрів для компенсації нерівномірності АЧХ радіоприймача. Ці напрацювання разом із архітектурою дають основу для подальших досліджень та реалізації багатоканального конвеєрного радіоприймача на основі FPGA.

Ключові слова: цифрова обробка сигналів, програмно-визначене радіо (SDR), field-programmable gate array (FPGA), cascaded integrator–comb filter.

KHIZNIAK ANDRII, LYSENKO OLEKSANDR

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

DEVELOPMENT OF THE ARCHITECTURE OF THE MULTICHANNEL CONVEYOR RADIO RECEIVER BASED ON FPGA

Modern telecommunication networks are facing increasingly complex challenges due to the constant increase in the density of electronic devices, the active use of a wide range of radio frequencies and the need to ensure a high level of electromagnetic compatibility. Traditional radio reception systems using single-channel or simple multi-channel circuits no longer meet modern requirements, as they are limited in the ability to simultaneously monitor several frequency bands and quickly adapt to dynamic changes in environmental conditions. This creates a need for further development of existing approaches to multi-channel radio reception and technical solutions for their implementation using software-defined radio (SDR) technology. The article analyzes in detail the main methods of multichannel radio reception, in particular, the time division multiplexing (TDM) method, the frequency division multiplexing (FDM) method, the multichannel digital radio reception method using frequency selection and the pipeline digital signal processing method, and identifies their advantages and disadvantages, which made it possible to justify the choice of the multichannel pipeline approach as the basic one for use in the study and, as a result, to propose an architecture of a multichannel pipeline radio receiver based on FPGA with increased efficiency in terms of sensitivity and performance. The proposed technical solution using an IQ mixer provides effective transfer of frequency ranges to the baseband, which allows for high-quality digital reception of signals without significant deterioration of their characteristics. At the same time, it was found that the use of IQ mixers is accompanied by a number of disadvantages, such as imbalance of IQ channels and DC offset, which requires the use of additional compensation algorithms. The effectiveness of using digital CIC and FIR filters to compensate for the unevenness of the frequency response of the radio receiver has been verified. These developments, together with the architecture, provide the basis for further research and implementation of a multi-channel pipelined radio receiver based on FPGA.

Keyword: digital signal processing, software defined radio (SDR), field-programmable gate array (FPGA), cascaded integrator–comb filter

Стаття надійшла до редакції / Received 13.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 16.06.2025

Постановка проблеми

У сучасному світі безперервний обмін інформацією став невід'ємною частиною повсякденного життя, охоплюючи всі сфери — від бізнесу та освіти до розваг і соціальних мереж. З розвитком цифрових технологій виникла потреба у системах, які здатні ефективно обробляти великі обсяги даних у реальному часі, особливо в умовах насиченого радіочастотного спектру та наявності різноманітних перешкод.

Складна та динамічна радіоелектронна обстановка вимагає ефективних рішень для забезпечення електромагнітної сумісності та ліцензованого використання радіочастотного ресурсу. Традиційні підходи, які

передбачають нарощування кількості комплектів радіоприймальної апаратури, не завжди виправдовують себе, оскільки забезпечують одночасний прийом сигналу лише в межах однієї частотної смуги, що призводить до пропусків короточасних сеансів радіозв'язку і є неприпустимим. Це зумовлює потребу у пошуку нових підходів до побудови програмно-апаратних рішень багатоканального радіоконтролю телекомунікаційних систем.

Зростання радіочастотних завад, спричинене збільшенням кількості радіоелектронних пристроїв, що функціонують на однакових або близьких частотах, також створює суттєві виклики для забезпечення електромагнітної сумісності між різними системами. Тому підвищення ефективності методів багатоканального радіоприйому, що здатні працювати в таких умовах, стає актуальним і надзвичайно важливим.

Крім того, зростаюча активність безпілотних літальних апаратів викликає потребу в розширенні переліку обладнання, яке забезпечує моніторинг радіо обстановки і здатне виявляти ці об'єкти в широкому діапазоні частот. Для реалізації таких технічних рішень використовуються перспективні новітні технології, зокрема, програмно-визначеного радіо (SDR), яка відкриває нові можливості для реалізації складних та гнучких рішень при створенні радіоприймальних трактів. Сучасні багатоканальні пристрої SDR забезпечують можливість одночасного прийому кількох сигналів та обробки їх з високою чутливістю і точністю, що обумовлює її використання в якості базової для розроблюваного в рамках даного дослідження архітектури технічного рішення.

Мета дослідження

Мета даного дослідження полягає у розробленні архітектури багатоканального конвеєрного радіоприймача шляхом проведення детального аналізу методів багатоканального радіоприйому, обґрунтування вибору базового з них для реалізації в розроблюваному технічному рішенні з використанням технологій SDR та FPGA.

При цьому створена архітектура радіоприймача забезпечить інтеграцію різних етапів конвеєрної обробки сигналів, таких як дискретизація, фільтрація, демодуляція та декодування, що дасть змогу підвищити ефективність обробки даних за рахунок зменшення необхідних обчислювальних ресурсів при опрацюванні кількох частотних каналів. Реалізація розробленого радіоприймача на платформі FPGA забезпечить високу продуктивність та гнучкість в налаштуванні системи під конкретні вимоги застосування.

Аналіз попередніх досліджень та публікацій

Одним із відомих методів багатоканального радіоприйому, який наразі широко застосовується в телекомунікаціях і радіозв'язку, є метод мультиплексування з часовим поділом (Time Division Multiplexing, TDM) [1], який дозволяє одночасно приймати кілька сигналів через один фізичний канал, використовуючи різні часові інтервали для кожного з них. Це означає, що всі канали ділять наявний час на частини і кожен сигнал приймається у свій відведений час. Основними етапами цього процесу є ділення часу на слоти, кодування даних, передача сигналів і їх подальше декодування на приймальній стороні.

Метод TDM має кілька переваг. По-перше, він забезпечує ефективне використання ресурсу, оскільки дозволяє максимально використовувати доступну пропускну здатність каналу. Кілька сигналів передаються по одному каналу без потреби у фізичному розділенні, що робить систему більш економічною. По-друге, метод TDM є простим у реалізації, оскільки не вимагає складних апаратних рішень для розділення частот. Це робить його зручним для впровадження в різноманітні системи. По-третє, система легко масштабується, що дозволяє додавати нові канали без значних змін у базовій архітектурі.

Проте метод TDM має й певні недоліки. Оскільки сигнал може бути прийнятий лише у заданий часовий слот, виникають розриви у сигналі, що може сильно спотворити прийнятий сигнал, особливо у системах з великою кількістю каналів. Це негативно позначається на якості обслуговування. Крім того, цей метод чутливий до часу: якщо в одному із каналів виникають затримки або проблеми з передачею, це може вплинути на загальну якість сигналу. Також, якщо один канал потребує великої пропускну здатності, це може знизити ефективність передачі для інших каналів.

У роботі [2] розглядається інноваційна телекомунікаційна система на основі методу TDM, яка забезпечує підключення абонентських каналів через дві лінії передачі. Вона впроваджує нові засоби управління для виявлення та усунення несправностей, що особливо корисно у складних умовах її використання, наприклад, ра військових кораблях. Важливою її особливістю є можливість підключення додаткових ліній зв'язку, що підвищує надійність цієї системи. Запатентоване технічне рішення, покладене в основу системи, також пропонує простіші та ефективніші процеси відновлення, що робить його значним кроком у поліпшенні телекомунікаційних технологій.

Іншим відомим методом багатоканального радіоприйому є метод мультиплексування з частотним поділом (Frequency Division Multiplexing, FDM) [3], що дозволяє одночасно приймати кілька сигналів через один фізичний канал, використовуючи різні частотні ділянки для кожного з них. Цей метод широко застосовується в радіозв'язку, телекомунікаціях та інших системах, де необхідно забезпечити одночасну передачу кількох радіосигналів.

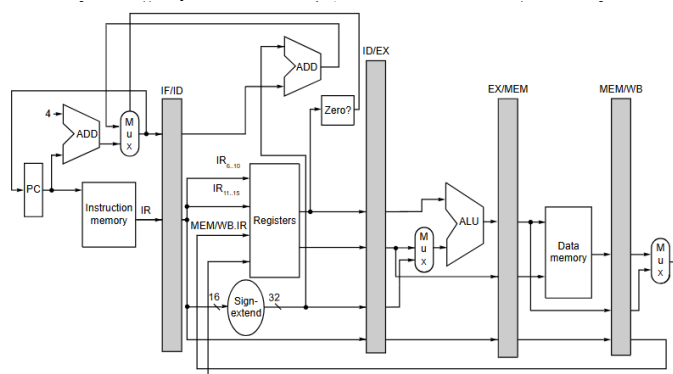
Суть реалізації методу полягає в тому, що на приймальному боці радіоприймача використовується система фільтрів, яка дозволяє відокремлювати вхідні сигнали на основі їх частот. Кожен фільтр

Однак метод FDM також має свої недоліки. По-перше, він вимагає точного налаштування фільтрів, що може ускладнити реалізацію системи. Метод FDM потребує для реалізації більше апаратних ресурсів, оскільки необхідно мати фільтри для кожного каналу, що може підвищити вартість системи. Також у разі зміни умов передачі, таких як зміна частоти або ширини каналу, може знадобитися переналаштування системи. Не зважаючи на зазначене вище метод FDM продовжує залишатися актуальним у сучасних системах зв'язку, забезпечуючи надійну та ефективну передачу даних.

Ще одним методом багатоканального радіоприйому із використанням цифрової обробки сигналів є підхід з використанням частотної селекції, тобто розділення дискредитованого сигналу на окремі складові[5]. Це забезпечує ефективне використання доступного спектру і дозволяє одночасно отримувати та обробляти кілька інформаційних потоків без необхідності в додатковому обладнанні. Реалізація методу забезпечує більшу гнучкість, економічну ефективність, а також надає можливість для модернізації багатоканального радіоприймача та багаторівневого програмного забезпечення. Досягнення в області програмованих цифрових інтегрованих тюнерів спростують вимоги до фільтрів, дозволяючи змінювати їх характеристики за допомогою програмного забезпечення в залежності від пропускну здатності каналу і швидкості передачі даних.

В роботі [6] запропоновано технічне рішення, яке включає групу вузькосмугових фільтрів на поверхневих акустичних хвилях (SAW), розташованих між антеною та широкосмуговими перетворювачами. Ці фільтри функціонують як багатоканальні приймачі, замінюючи традиційні гетеродинні схеми, що дозволяє ефективно розділяти канали і зменшувати вплив сусідніх сигналів. Висока селективність SAW-фільтрів забезпечує чіткіший розподіл частот та зменшення впливу завад, спрощуючи конструкцію радіоприймача та зменшуючи його розміри і вагу.

Слід також звернути увагу на перспективний для реалізації багатоканальних радіоприймачів відомий метод конвеєрної обробки, який дозволяє підвищити ефективність і швидкість цифрової обробки сигналів [7]. Принцип роботи конвеєрної обробки полягає в розділенні процесу обробки сигналів на кілька етапів, кожен з яких виконується окремим блоком. Коли один блок завершує обробку, він передає результат наступному блоку, що дозволяє новим даним надходити до першого блоку без затримок. Приклад структури технічного рішення на основі «конвеєра» наведено на рис. 1.



Однією з ключових переваг методу конвеєрної обробки є зменшення затримок. Оскільки кожен етап обробки виконується паралельно, загальний час обробки сигналу зменшується, що особливо важливо для застосувань у реальному часі, зокрема, таких як обробка відео або радіозв'язок. Це дозволяє технічним рішенням швидко реагувати на зміни в умовах середовища, що підвищує загальну продуктивність.

Herald of Khmelnytskyi national university, Issue 4, 2025 (355)

обробки без значних змін у базовій архітектурі. Це дозволяє легко адаптувати рішення до зростаючих вимог до продуктивності.

Метод конвеєрної обробки є потужним інструментом і для реалізації багатоканальних радіоприймачів. Його здатність забезпечувати паралельну обробку та зменшувати затримки робить його особливо корисним там, де критично важливі швидкість і ефективність.

Враховуючи зазначені вище переваги у даному дослідженні в якості базового для реалізації архітектури багатоканального радіоприймача підвищеної ефективності обґрунтовано вибір методу конвеєрної обробки сигналу. Такий метод є особливо корисним у складних радіоелектронних системах, де необхідно одночасно обробляти численні сигнали з різних частотних смуг без втрат якості. Це також дозволяє забезпечити більш точне перехоплення і аналіз сигналів у реальному часі, що є критично важливим для телекомунікаційних мереж, систем зв'язку та аерокосмічних технологій. Завдяки використанню багатоканальної архітектури, цифровий радіоприймач може ефективно справлятися з великою кількістю одночасних сеансів зв'язку. Це також відкриває нові можливості для розробки складних рішень у сфері радіоконтролю та моніторингу, що є особливо актуальним у світлі зростаючих вимог до швидкості і якості зв'язку. Крім того, реалізація методу конвеєрної обробки сигналу дозволяє інтегрувати в технічні рішення сучасні алгоритми обробки, зокрема, такі як адаптивні фільтри і технології SDR-радіо, що забезпечує більшу гнучкість у налаштуванні радіоприймача під конкретні вимоги користувачів.

Виклад основного матеріалу

Як вже зазначалось вище, багатоканальність означає одночасне оброблення кількох сигналів або потоків даних через різні канали в одному пристрої. Переваги багатоканальності включають:

- ефективність використання спектру та можливість одночасного прийому кількох каналів сприяє оптимізації використання доступного частотного спектра, що є критично важливим у радіозв'язку;
- гнучкість у налаштуванні, так як багатоканальна архітектура дозволяє налаштовувати радіоприймач для різних стандартів зв'язку або динамічно змінювати конфігурацію під час роботи;
- підвищена чутливість і селективність завдяки можливості фільтрації та ізоляції сигналів від перешкод на різних каналах.

Зупинимось детальніше на розгляді базової структури цифрового радіоприймача, його складових та їх взаємодії (рис. 2).

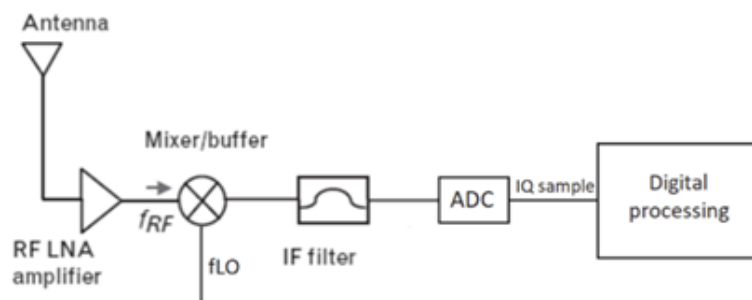


Рис. 2. Структура RF радіоприймача

Після антени сигнал надходить до підсилювача, який збільшує потужність прийнятого сигналу для подальшої обробки. Важливою частиною радіоприймача є міксер, який змішує вихідний сигнал з локальним осцилятором для отримання проміжної частоти (IF). Фільтри також виконують критичну роль у технічному рішенні, забезпечуючи вибірковість радіоприймача шляхом усунення небажаних частот і шумів; при цьому серед них можуть бути як аналогові, так і цифрові фільтри. Після того, як сигнал відфільтровано, через АЦП він надходить для подальшої обробки в обчислювальний компонент.

Зазвичай, в радіоприймачах використовуються два основні типи міксерів (змішувачів) - радіочастотний (RF) і квадратурний (IQ). RF змішувачі - це нелінійні пристрої, що використовуються в радіочастотних і мікрохвильових системах для перетворення сигналів з однієї частоти в іншу. Основною функцією радіочастотного змішувача є зміна частоти вхідного сигналу, що досягається шляхом змішування вхідного сигналу із сигналом гетеродина (LO) та генерації на виході сигналів на проміжних частотах (суми та різниці вхідних частот) [8].

Якщо вхідний сигнал має частоту f_{RF} , а частота гетеродина — f_{LO} , то вихід змішувача міститиме компоненти $f_{RF} + f_{LO}$ і $f_{RF} - f_{LO}$. Сигнал гетеродина діє як затвор змішувача: змішувач активується, коли гетеродин має високу напругу і деактивується при низькій напрузі. LO може бути лише вхідним портом, тоді як порти RF і IF можуть змінюватися між другим входом або виходом [9,10].

IQ змішувач — це спеціальний тип міксера, який генерує два вихідні сигнали I (In-phase) та Q (Quadrature) (рис. 3). Цей тип змішувача дозволяє зберігати інформацію про амплітуду та фазу у сигналі, що важливо для цифрової модуляції, наприклад, для QAM (квадратурної амплітудної модуляції) [11].

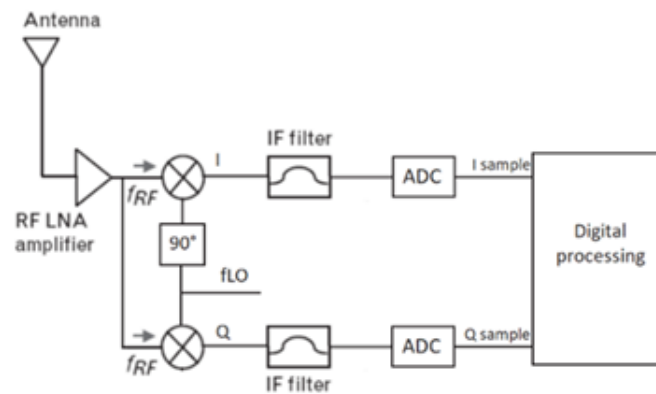


Рис. 3. Структура IQ радіоприймача

У радіосистемах традиційні змішувачі, відомі як односторонні змішувачі, відіграють ключову роль у процесі перетворення частоти. Проте ці пристрої мають значні недоліки, які можуть негативно вплинути на загальну продуктивність та ефективність системи. Однією з основних їх проблем є чутливість до частотних перешкод зображення. Коли радіочастотний сигнал перетворюється на проміжну частоту (ПЧ), традиційні змішувачі генерують як сумарну, так і різницеву частоти виходячи з вхідного сигналу і локального осцилятора (LO). Цей процес іноді призводить до появи небажаних частот, що може викликати перекриття сигналів і перешкоди та, як наслідок, потребує додаткової фільтрації та ускладнення конструкції системи. Крім того, традиційні змішувачі часто не здатні точно зберігати інформацію про фазу й амплітуду вхідного сигналу, що створює виклики для сучасних комунікаційних систем, які використовують складні схеми модуляції, такі як квадратурна амплітудна модуляція (QAM) та мультиплексування з ортогональним частотним поділом (OFDM).

В цьому контексті IQ змішувачі ефективно усувають вказані недоліки, застосовуючи два змішувачі з фазовим зрушенням сигналів гетеродина на 90 градусів. Ця конфігурація дозволяє їм чітко розрізняти бажаний сигнал і частоту зображення, що, в свою чергу, виключає потребу в додатковій фільтрації. Крім того, IQ змішувачі точно фіксують інформацію про фазу й амплітуду, що сприяє більш складній обробці модуляції, підвищуючи швидкість передачі даних та ефективність використання спектру в сучасних технологіях зв'язку.

Ще однією з переваг IQ змішувачів є те, що після переносу частоти вниз отримуємо сигнал вже в комплексному вигляді і можемо його відразу перевести в цифровий вигляд на базовій частоті, що дозволяє охоплювати ширший діапазон спектра при однаковій частоті дискретизації АЦП.

Незважаючи на очевидні переваги IQ змішувачів, потрібно приділити увагу їх недолікам та можливим у майбутньому викликам при роботі із цими змішувачами.

По-перше, дисбаланс IQ виникає, коли існують розбіжності в амплітуді або фазі між I (інтерфейсним) та Q (квадратурним) каналами. Це може негативно вплинути на якість сигналу, призводячи до зниження чіткості та достовірності передачі даних. В результаті може зменшитися відхилення зображення, що ускладнює процес розпізнавання сигналу, а також підвищується рівень бітових помилок у цифрових комунікаціях, знижуючи загальну ефективність системи.

По-друге, зміщення постійного струму є ще одним серйозним викликом для змішувачів типу IQ, оскільки воно може призвести до появи небажаних низькочастотних компонентів у вихідному сигналі, що викликає спотворення та ускладнює подальшу обробку. Крім того, постійне зміщення може зменшити співвідношення сигнал/шум, що суттєво погіршує якість сигналу, а також обмежує динамічний діапазон системи, знижуючи її здатність ефективно працювати із слабкими сигналами.

Таким чином, хоча IQ змішувачі забезпечують багато переваг у сучасних комунікаційних технологіях, існуючі проблеми, такі як дисбаланс IQ і зміщення постійного струму, потребують розв'язання та подальшого вдосконалення, щоб реалізувати їх повний потенціал у складних комунікаційних системах. При виборі між RF і IQ змішувачем важливо враховувати вимоги конкретної системи або застосування та всі переваги і недоліки кожної з систем. У ситуаціях, коли необхідна висока точність і надійність передачі сигналу, IQ змішувачі можуть виявитися більш ефективними завдяки своїй здатності знижувати рівень бітових помилок та забезпечувати кращу якість сигналу. У нашому випадку, оскільки плануємо працювати із широкою смугою частот, доцільно вибрати IQ змішувач, оскільки він забезпечує покращене розділення сигналів і зменшує вплив частотних перешкод зображення [12].

Вибір IQ змішувача також відкриває можливість для використання сучасних схем модуляції, що дозволяє досягнути вищих швидкостей передачі даних і ефективності використання спектру. Коли мова йде про роботи з широкосмуговими системами, стабільність і точність IQ змішувачів вносять значний вклад у підвищення загальної продуктивності. Таким чином, хоча IQ змішувачі можуть вимагати додаткових зусиль для усунення деяких викликів, їх переваги здебільшого переважають потенційні недоліки, роблячи їх ідеальним вибором для застосувань, що вимагають високої продуктивності та надійності.

Забезпечення в радіоприймачі програмної багатоканальності здійснюється блоком розподілення вхідного потоку сигналу на N паралельних частотно-контрольованих каналів. Центральна частота кожного каналу задається окремо за допомогою перемноження вхідного потоку на сигнал із внутрішніх генераторів. Після розподілення вхідного потоку необхідно виконати обробку даного потоку за допомогою фільтрів.

Для задачі децимації в цифровій обробці сигналів доцільно використовувати СІС-фільтр (Cascaded Integrator-Comb). Це тип фільтра використовується, зокрема, для зниження частоти дискретизації сигналів і складається із каскаду інтегруючих елементів, що дозволяє ефективно згладжувати сигнали та видаляти високочастотні компоненти.

Цифровий інтегруючий каскадний фільтр ідеально підходить для згладжування сигналів перед децимацією (зниження частоти дискретизації), оскільки його амплітудно-частотна характеристика є $\sin(x)$ -подібною, за фільтрами СІС, зазвичай, слідують або їм передують фільтри з лінійною фазою низьких частот із кінцевою імпульсною характеристикою (FIR) із відведеною лінією затримки, завдання яких полягають у компенсації нерівної смуги пропускання фільтра СІС. СІС-фільтри популярні в апаратних пристроях; їм не потрібне зберігання даних про коефіцієнт фільтра та множення. Арифметика, необхідна для реалізації СІС-фільтрів, полягає лише в додаванні та відніманні.

Розглянемо детально структуру СІС-фільтра (рис. 4).

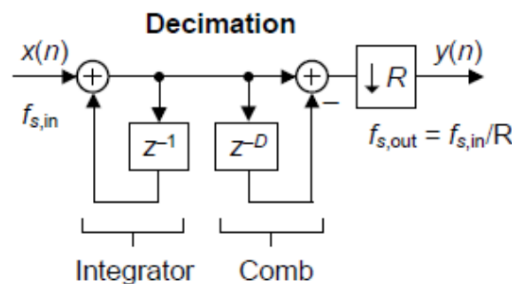


Рис. 4. Структурна схема СІС-фільтра

Частина прямого зв'язку СІС-фільтра називається гребінчастою секцією, диференціальна затримка якої дорівнює D , тоді як секція зворотного зв'язку має назву інтегратора. Ступінь гребінки віднімає затриману вхідну вибірку з поточної вхідної вибірки, а інтегратор є просто накопичувачем. Різницеве рівняння СІС-фільтра у часовій області має такий вигляд [14]:

$$y(n) = x(n) - x(n-D) + y(n-1)$$

Оскільки після СІС-фільтра буде виконуватися операція децимації, фактично будемо зменшувати вибірку шляхом відкидання всіх відліків, крім R -го, при коефіцієнті децимації R . Якщо побудувати амплітудно-частотну характеристику цього фільтра та відмітити на ній (сірим кольором) бажану область пропускання після децимації (рис. 5), то смугою пропускання фільтра є спектральна смуга з центром на 0 Гц та сума бокових пелюсток, які накладуться в результаті спектральної згортки.

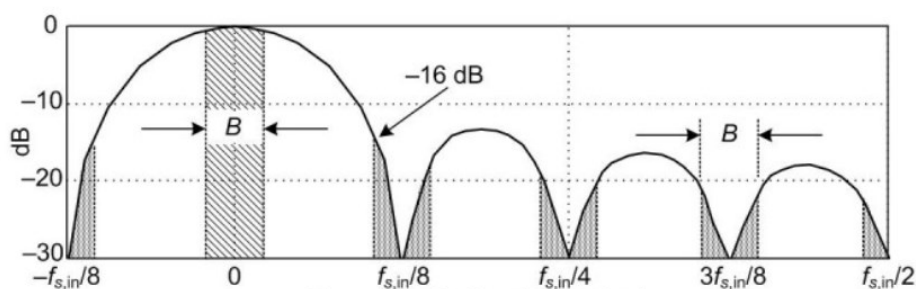


Рис. 5. Амплітудно-частотна характеристика СІС-фільтра

Із рис. 5 можна зробити висновок, що порядок СІС-фільтра потрібно збільшити, для цього пропонується встановити його рівним 6, що дозволить отримати достатнє згладжування бокових пелюсток.

Після цього виникає потреба згладжування синус-подібної АЧХ фільтра. Важливою відмітити, що характеристикою дециматора із фіксованим порядком є те, що форма амплітудно-частотної характеристики головної пелюстки фільтра майже не змінюється в залежності від децимації, що дозволить використовувати один і той самий компенсаційний FIR-фільтр незалежно від коефіцієнта проріджування. Для компенсаційного FIR-фільтра необхідно підібрати коефіцієнти таким чином, щоб після пропускання через нього сигналу вирівняти широкі перехідні області СІС-фільтра. Результати роботи FIR-фільтра зображено на рис. 6 [14].

Різницеве рівняння, що пов'язує вхідний і вихідний сигнал FIR-фільтра, має наступний вигляд:

$$y(n) = b_0 * x(n) + b_1 * x(n-1) + \dots + b_P x(n-P)$$

де P - порядок фільтра, $x(n)$ - вхідний сигнал, $y(n)$ - вихідний сигнал, b_i — коефіцієнти, що характеризують налаштування фільтра.

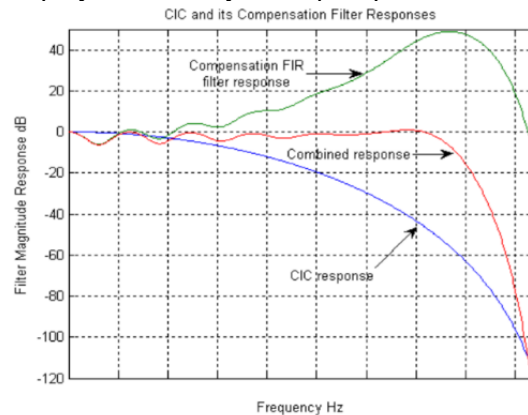


Рис. 6. Згладжування АЧХ компенсаційним FIR-фільтром

Тобто значення будь-якого відліку вихідного сигналу визначається як сума масштабованих значень P попередніх відліків вхідного сигналу $x(n)$.

Таким чином, FIR-фільтр забезпечує своєчасну обробку сигналів з чітко визначеними характеристиками, що дозволяє йому виконувати такі функції, як фільтрація, згладжування або корекція частотних характеристик оброблюваного сигналу. Структурно FIR-фільтр представляє собою лінію затримки, яка перемножується на відповідні вагові коефіцієнти (рис. 7).

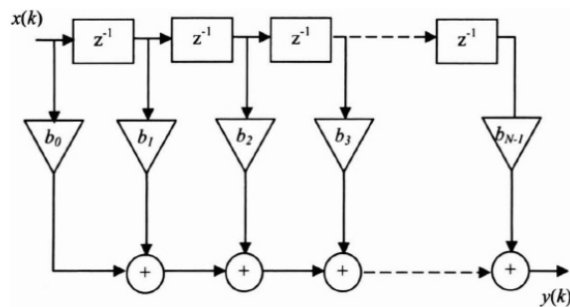


Рис. 7. Структурна схема FIR-фільтра

При побудові багатоканального радіоприймача з відповідним FIR-фільтром виникає проблема з обчислювальними ресурсами, оскільки кількість операцій перемноження, які можна виконати обчислювальним компонентом, наприклад, на FPGA, є обмеженою. Якщо реалізувати N таких фільтрів, то швидко будуть використані практично всі доступні ресурси.

Пропонується альтернативний підхід шляхом реалізації конвеєра, який буде використовувати оперативну пам'ять для зберігання відліків кожного каналу. Це дозволить періодично записувати дані в пам'ять і виконувати обробку сигналу на фільтрі, знижуючи затримки, оскільки частота дискретизації вже є пониженою. Таким чином, можна реалізувати одночасну обробку сигналів з усіх каналів, не перевантажуючи ресурси блоку FPGA (рис. 8).

Функціонування цифрової частини конвеєрного радіоприймача на FPGA коротко зводиться до наступного. Сигнал з виходу АЦП надходить на N паралельних каналів, кожен з яких містить внутрішній генератор частоти та змішувач. Ці елементи виконують перенесення сигналу на необхідну проміжну частоту.

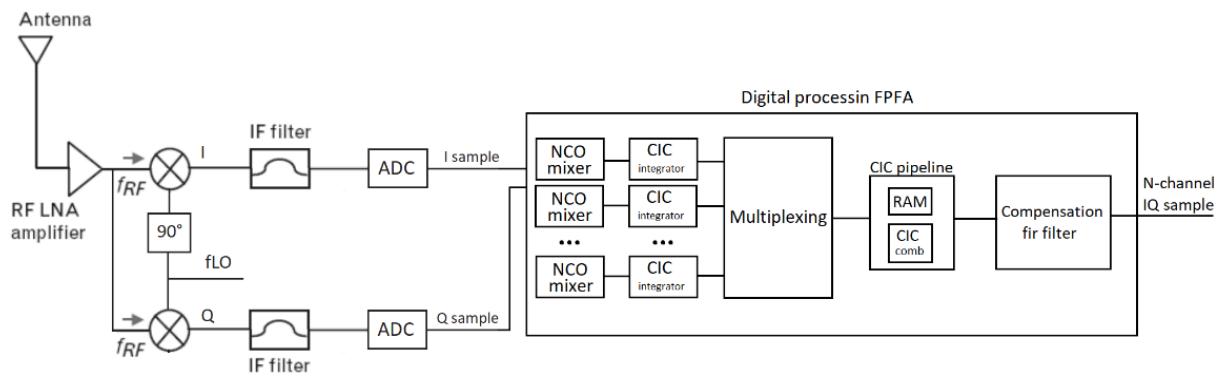


Рис. 8. Структурно-функціональна організація багатоканального конвеєрного радіоприймача на FPGA

На наступному етапі обробки сигнал проходить через CIC-фільтр (Cascaded Integrator-Comb), який складається з N інтеграторів. Інтегратори здійснюють накопичення (сумування) вхідних дискретних значень на кожному такті, реалізуючи тим самим інтегрування сигналу.

Після CIC-фільтра сигнал надходить до мультиплексора, який по черзі перемикається між каналами. Кожен канал, у свою чергу, передається до блоку диференціювання. У цьому блоці попередній відлік сигналу зберігається в пам'яті, а поточний – обробляється диференціатором, після чого також записується в пам'ять.

Така архітектура дозволяє ефективно понижувати частоту дискретизації сигналу в N разів, забезпечуючи одночасно фільтрацію у конвеєрному режимі.

Оскільки CIC-фільтр має синусоїдальну форму амплітудно-частотної характеристики, наступним етапом є компенсація цих спотворень. Для цього використовується компенсаційний FIR-фільтр, який також працює в конвеєрному режимі. Така архітектура дозволяє ефективно обробляти всі канали на апаратному рівні, використовуючи ті ж самі ресурси FPGA, що робить технічне рішення більш економічним та продуктивним. Після обробки сигналів фільтром доцільно також ввести блок демультимплексування, який розділятиме канали та направлятиме оброблені дані до відповідних виходів. В свою чергу це забезпечить більш структуровану організацію даних та спростить їх подальшу обробку на наступних етапах.

Завдяки запропонованій вище на рис. 8 архітектурі можна досягти високої ефективності обробки сигналів у багатоканальних конвеєрних радіоприймачах з використанням обмежених ресурсів FPGA, що є суттєвим для багатьох реальних застосувань.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Проведені дослідження багатоканального радіоприймача з конвеєрною обробкою сигналів підтвердили практичну доцільність і ефективність застосування цифрових технологій у сучасних телекомунікаційних рішеннях. Використання технології програмно-визначеного радіо (SDR) надає значні переваги у порівнянні з класичними аналоговими рішеннями, зокрема, завдяки здатності гнучко адаптуватися до умов навколишнього середовища, змінювання параметрів прийому в реальному часі та одночасної обробки сигналів різних частотних смуг.

Запропонована у статті архітектура із використанням IQ-міксерів забезпечує ефективне перенесення частотних діапазонів у базову смугу, що дозволяє реалізувати якісний цифровий прийом сигналів без суттєвого погіршення їх характеристик. Водночас, встановлено, що застосування IQ-міксерів супроводжується низкою недоліків, таких як дисбаланс IQ-каналів і зміщення постійного струму, що вимагає використання додаткових компенсаційних алгоритмів.

Під час експериментальних досліджень перевірено ефективність цифрових CIC- та FIR-фільтрів для компенсації нерівномірності АЧХ приймача. Ці напрацювання разом із архітектурою дають основу для подальших досліджень та реалізації багатоканального конвеєрного радіоприймача на основі FPGA. Це дозволить створити більш ефективні технічні рішення підвищеної ефективності за рахунок реалізації конвеєрної структури фільтрів та розділення широкого частотного каналу і децимації підвищеного відношення сигнал-шум.

Література

1. Комутація каналів TDM [1 ресурс]. – Режим доступу: <https://studfile.net/preview/1401968/page>
2. Time-division-multiplexing loop telecommunication system having a first and second transmission line - <https://patentimages.storage.googleapis.com/e5/b2/f7/b4439416c820ed/US4575843.pdf>
3. Multiple control slot TDM/FDM communication system [Електронний ресурс]: Патент US4942570A. – Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/US4942570A/en>
4. Патент на корисну модель № 39243 Багатоканальний приймальний пристрій [електронний ресурс] – 2025 – Режим доступу до ресурсу: <https://iprop-ua.com/inv/r1iocs7k/>
5. Designing a Super-Heterodyne Multi-Channel Digital Receiver [Електронний ресурс]. – Analog Devices, 2025. – Режим доступу: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/371982266wideband.pdf>
6. Патент Multi-channel digital radio [електронний ресурс] – 2025 – Режим доступу до ресурсу: <https://patentimages.storage.googleapis.com/44/75/41/e28d1c8500316d/CA2983912C.pdf>
7. Pipeline Analog-to-Digital Converters for Wide Band Wireless Communications [Електронний ресурс]. – 2002. – Режим доступу: <http://lib.tkk.fi/Diss/2002/isbn9512262231/isbn9512262231.pdf>
8. Приймально-передавальні пристрої: навчальний посібник [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу: http://kinf.nangu.edu.ua/library_files/Doc/%D0%9F%D0%9F%D0%9F%D1%80_25.11.2020_sec.pdf
9. RF Mixers [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.qsl.net/va3iul/RF%20Mixers/RF_Mixers.pdf
10. Класичні змішувачі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.everythingrf.com/search/microwave-rf-mixers>

11. IQ Mixer [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.everythingrf.com/community/what-are-iq-mixers>
12. Mixers [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.linkedin.com/pulse/what-iq-mixers-rf-pcb-nkspc>
13. Cascaded Integrator-Comb (CIC) Filter Introduction [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dsprelated.com/showarticle/1337.php>
14. Compensation FIR Filter Coefficients [Електронний ресурс]. – Intel Documentation, 2025. – Режим доступу: <https://www.intel.com/content/www/us/en/docs/programmable/683246/19-3-19-3/fir-filter-compensation-coefficients.html>

References

1. Channel Switching TDM [Electronic resource]. – Access mode: <https://studfile.net/preview/1401968/page>
2. Time-division-multiplexing loop telecommunication system having a first and second transmission line – <https://patentimages.storage.googleapis.com/e5/b2/f7/b4439416c820ed/US4575843.pdf>
3. Multiple control slot TDM/FDM communication system [Electronic resource]: Patent US4942570A. – Access mode: <https://patents.google.com/patent/US4942570A/en>
4. Utility Model Patent No. 39243 Multichannel Receiving Device [Electronic resource] – 2025 – Access mode: <https://iprop-ua.com/inv/r1iocs7k/>
5. Designing a Super-Heterodyne Multi-Channel Digital Receiver [Electronic resource]. – Analog Devices, 2025. – Access mode: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/371982266wideband.pdf>
6. Patent Multi-channel digital radio [Electronic resource] – 2025 – Access mode: <https://patentimages.storage.googleapis.com/44/75/41/e28d1c8500316d/CA2983912C.pdf>
7. Pipeline Analog-to-Digital Converters for Wide Band Wireless Communications [Electronic resource]. – 2002. – Access mode: <http://lib.tkk.fi/Diss/2002/isbn9512262231/isbn9512262231.pdf>
8. Transceiver Devices: Textbook [Electronic resource]. – 2020. – Access mode: http://kinf.nangu.edu.ua/library_files/Doc/%D0%9F%D0%9F%D0%9F%D1%80_25.11.2020_sec.pdf
9. RF Mixers [Electronic resource]. – Access mode: https://www.qsl.net/va3iul/RF%20Mixers/RF_Mixers.pdf
10. Classical Mixers [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.everythingrf.com/search/microwave-rf-mixers>
11. IQ Mixer [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.everythingrf.com/community/what-are-iq-mixers>
12. Mixers [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.linkedin.com/pulse/what-iq-mixers-rf-pcb-nkspc>
13. Cascaded Integrator-Comb (CIC) Filter Introduction [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.dsprelated.com/showarticle/1337.php>
14. Compensation FIR Filter Coefficients [Electronic resource]. – Intel Documentation, 2025. – Access mode: <https://www.intel.com/content/www/us/en/docs/programmable/683246/19-3-19-3/fir-filter-compensation-coefficients.html>