**Хижняк Андрій Валерійович**

здобувач вищої освіти магістерського рівня

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID 0009-0005-5525-8353

**Лисенко Олександр Миколайович**

доктор технічних наук, професор

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID 0000-0003-1051-1149

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ БАГАТОКАНАЛЬНОГО ПРИЙОМУ СИГНАЛУ**

Сучасні умови інформаційного суспільства та швидкий розвиток безпровідних технологій висувають високі вимоги до систем радіомоніторингу. Насиченість спектра, часті часові та частотні завади, непередбачувані сигнали (наприклад, сигнали безпілотних літальних апаратів) ставлять завдання якісного та швидкого виявлення першочерговим. Традиційні системи радіоприймачів, що займаються обробкою окремих каналів, виявляють серйозні обмеження: низьку адаптивність, високі затрати на обладнання та неможливість швидкої реакції на зміни ситуації у спектрі.

Одним із поширених способів реалізації багатоканального прийому сигналів у телекомунікаційних системах є мультиплексування з часовим поділом (TDM — Time Division Multiplexing) [1]. Цей метод передбачає передачу кількох незалежних потоків даних через один фізичний канал шляхом їх рознесення в часі. Принцип дії полягає у поділі загального часу на послідовні інтервали — так звані тайм-слоти, кожен з яких відводиться окремому каналу. У результаті дані передаються послідовно, в строго визначені моменти часу, що дозволяє уникнути перешкод між каналами та ефективно використовувати доступну пропускну здатність.

Завдяки тому, що всі канали використовують спільний канал у різні моменти часу, відпадає необхідність у дублюванні фізичних ліній зв’язку або складних частотних розв’язок, що суттєво знижує вартість системи.

Серед недоліків цього методу є фіксованість виділеного часу для кожного каналу. У випадках, коли один із каналів має значно більший обсяг даних, ніж інші, його фіксований тайм-слот може виявитися недостатнім, що призведе до затримок у передачі або зниження ефективності. У той же час, канали з малим навантаженням можуть не повністю використовувати наданий їм часовий ресурс, що також знижує загальну ефективність системи.

Ще одним широко використовуваним підходом до організації багатоканального прийому є мультиплексування з частотним поділом (FDM — Frequency Division Multiplexing) [2]. Цей метод базується на принципі одночасної передачі кількох сигналів через спільний фізичний канал, при цьому кожен із сигналів передається у власному частотному діапазоні. Завдяки рознесенню сигналів за частотою забезпечується їх незалежна обробка та зменшення взаємних завад.

Основний принцип його реалізації полягає у використанні частотних фільтрів, які на приймальній стороні дозволяють виділити окремі сигнали з широкосмугового потоку. Кожен фільтр налаштовується на конкретну частотну смугу, у межах якої проходить сигнал певного каналу, що забезпечує його подальшу незалежну обробку.

Серед головних переваг цього підходу - здатність забезпечувати справжній паралельний прийом сигналів, що істотно підвищує загальну пропускну здатність системи. Це робить метод FDM особливо ефективним для тих випадків, де необхідна висока щільність інформаційного потоку та низька латентність, а також для систем із постійною конфігурацією каналів.

Разом із тим, реалізація методу FDM вимагає значних апаратних ресурсів. Для кожного частотного каналу необхідно передбачити окрему фільтраційну та обробну ланку, що збільшує складність системи й витрати на її розробку та виробництво. Крім того, у разі зміни частотного плану або параметрів сигналів, виникає потреба у переналаштуванні фільтрів або навіть у зміні апаратного забезпечення, що знижує гнучкість такої архітектури порівняно з програмно визначеними рішеннями.

Серед сучасних підходів до організації багатоканального цифрового радіоприйому важливе місце займає метод частотної селекції в цифровій області [3]. Цей метод передбачає розділення дискретизованого сигналу на окремі частотні компоненти, кожна з яких відповідає окремому інформаційному потоку. Завдяки цьому досягається ефективне використання доступного спектру, що дозволяє одночасно приймати та обробляти велику кількість каналів без потреби у значному збільшенні фізичних ресурсів або складності аналогової частини приймача.

Перевага цього підходу полягає у високому рівні гнучкості, яку забезпечує цифрова обробка сигналів. Використання програмно визначених параметрів дозволяє налаштовувати характеристики каналів відповідно до змін у спектральному середовищі, вимог до пропускної здатності або типу модуляції. Тут замість фіксованих апаратних фільтрів застосовуються цифрові фільтри, параметри яких можна змінювати в реальному часі.

Проте, попри всі переваги, такий підхід висуває підвищені вимоги до обчислювальних ресурсів системи. Обробка широкосмугового сигналу з наступним поділом на десятки або сотні вузькосмугових компонентів потребує високої продуктивності. Для реалізації таких систем необхідні або спеціалізовані цифрові сигнальні процесори (DSP) або використання ПЛІС (FPGA), які можуть забезпечити достатній рівень паралелізму. Водночас ресурси навіть сучасних FPGA є обмеженими і зростання кількості каналів у системі може призвести до перевантаження логіки, споживання енергії або складнощів із синтезом проєкту.

Серед перспективних підходів до побудови багатоканальних систем цифрового радіоприйому особливу увагу заслуговує метод конвеєрної обробки сигналів [4]. Цей підхід базується на концепції поділу процесу обробки на послідовність логічно зв’язаних етапів, де кожен етап виконується окремим функціональним блоком. Після завершення своєї частини обробки блок передає дані наступному, дозволяючи першому блоку одразу приступати до обробки нових вхідних сигналів. Такий принцип дозволяє суттєво оптимізувати розподіл обчислювальних ресурсів та забезпечити безперервний потік даних із мінімальними затримками.

Головною перевагою конвеєрного підходу є значне зниження загальної затримки обробки, що є критично важливим у системах реального часу, наприклад, у радіозв’язку, телекомунікаціях чи у системах моніторингу сигналів. Завдяки паралельному виконанню обробки на всіх етапах, приймач може оперативно реагувати на зміну спектральної ситуації, забезпечуючи високу продуктивність.

Узагальнюючи вищезазначене, слід зазначити, що саме метод конвеєрної обробки сигналів є найоптимальнішим рішенням для реалізації багатоканального цифрового радіоприймача, орієнтованого на роботу в складних і динамічних умовах спектрального середовища. Його ключові переваги — мінімізація затримок, висока швидкодія, ефективне використання обчислювальних ресурсів та відмінна масштабованість забезпечують стабільну й надійну роботу навіть у режимі реального часу при великій кількості одночасно оброблюваних сигналів.

Література

1. Time-division-multiplexing loop telecommunication system having a first and second transmission line - <https://patentimages.storage.googleapis.com/e5/b2/f7/b4439416c820ed/US4575843.pdf>
2. Multiple control slot TDM/FDM communication system [Електронний ресурс]: Патент US4942570A. – Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/US4942570A/en>
3. 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>
4. Pipeline Analog-to-Digital Converters for Wide Band Wireless Communications [Електронний ресурс]. – 2002. – Режим доступу: <http://lib.tkk.fi/Diss/2002/isbn9512262231/isbn9512262231.pdf>