УДК 621.391:004.4
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.2/14

Зилевіч М.О.
https://doi.org/0000-0003-1646-0557
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сваха Д.М.
https://doi.org/0000-0003-0986-1600
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИБІР ТА ВЕРИФІКАЦІЯ SDR-ЗАСОБІВ ДЛЯ НАВЧАЛЬНО-ДОСЛІДНИЦЬКИХ ЗАДАЧ У СФЕРІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Стаття присвячена аналізу та обґрунтуванню вибору програмно-апаратної платформи для проведення досліджень та експериментів у сфері аналізу телекомунікаційних сигналів. В умовах стрімкого розвитку телекомунікаційних технологій та розширення спектру використовуваних частот, важливим завданням є розробка ефективних інструментів для моніторингу, аналізу та обробки сигналів. Автори акцентують увагу на перевагах технології програмно-визначеного радіо (SDR), яка дозволяє реалізовувати значну частину функцій обробки сигналів програмно, забезпечуючи гнучкість, універсальність та економічну ефективність рішень.

У роботі проведено порівняльний аналіз популярних SDR-платформ, таких як RTL-SDR, HackRF One, PlutoSDR та USRP B210, за такими критеріями, як діапазон робочих частот, розрядність АЦП/ЦАП, смуга пропускання, можливості передачі сигналу та вартість. На основі аналізу обґрунтовано вибір платформи PlutoSDR як найбільш оптимального рішення для навчально-дослідницьких завдань. Платформа PlutoSDR вирізняється повнодуплексним режимом роботи, широким частотним діапазоном (70 МГц – 6 ГГц), 12-бітною розрядністю АЦП/ЦАП та наявністю вбудованої системи на кристалі Xilinx Zynq, що поєднує процесор ARM Cortex-A9 та FPGA Artix-7. Така архітектура забезпечує достатню обчислювальну потужність для обробки сигналів у реальному часі та гнучкість конфігурації.

Як програмне середовище для роботи з PlutoSDR обрано GNU Radio – відкритий набір інструментів, що дозволяє створювати складні схеми обробки сигналів за допомогою графічного інтерфейсу та мов програмування Python і C++. У статті детально розглянуто процес створення графу в GNU Radio для прийому та аналізу сигналів з частотною маніпуляцією (FSK). Описано основні блоки, використані у графі: джерело сигналу (PlutoSDR Source), фільтр нижніх частот (Low Pass Filter), ресемплер (Rational Resampler), FM-демодулятор (WBFM Receive) та засоби візуалізації спектру (QT GUI Frequency Sink).

Результати експерименту підтверджують ефективність обраної конфігурації. Представлені спектрограми демонструють успішний прийом та ідентифікацію FSK-сигналу в діапазоні 868 МГц, що є характерним для бездротових датчиків та систем IoT. Використання режиму Max Hold дозволило зафіксувати короткотривалі пакети даних, що підтверджує придатність розробленої системи для моніторингу ефіру та виявлення сигналів. Робота демонструє потенціал поєднання GNU Radio та PlutoSDR для створення доступних та функціональних інструментів аналізу радіосигналів, що можуть бути використані як у навчальному процесі, так і для вирішення прикладних завдань у сфері телекомунікацій та радіомоніторингу.

Ключові слова: *SDR, програмно-конфігуроване радіо, GNU Radio, PlutoSDR, аналіз сигналів, телекомунікаційні системи, цифрова обробка сигналів, FSK, частотна маніпуляція, радіомоніторинг.*

© Зилевіч М.О., Сваха Д.М., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Швидкий розвиток телекомунікаційних систем супроводжується зростанням обсягів інформаційних потоків та розширенням частотних діапазонів, у яких вони функціонують. Це призводить до необхідності створення ефективних засобів аналізу сигналів, здатних забезпечити точне вимірювання параметрів, виявлення аномалій, ідентифікацію видів модуляції та визначення джерел випромінювання.

На даний момент одним із найкращих рішень для створення таких засобів є програмно-конфігуроване радіо SDR (Software Defined Radio). Це гнучка програмована технологія, що поєднує програмне та апаратне забезпечення у вигляді потужної платформи для експериментів у галузі бездротового зв'язку. За допомогою SDR стало можливим швидше та дешевше, порівняно з традиційними пристроями, де зміна протоколу зв'язку чи стандарту модуляції (FM на QAM) вимагала фізичної переробки плати та заміни аналогових компонентів, створювати різноманітні системи бездротового зв’язку, а також відлагоджувати нові розробки без зміни апаратної частини. Завдяки використанню програмно-орієнтованого підходу, генерація сигналів реалізується за допомогою універсальних апаратних пристроїв, що виключає необхідність витрачатися на дороговартісне спеціалізоване обладнання. Даний підхід також дозволяє легше масштабувати розробки. Все це робить SDR актуальним інструментом для симуляції сигналів, дослідження частотного спектру, розробки бездротових протоколів зв’язку та багатьох інших. Однак, слід зазначити, що переважна більшість SDR використовують власне програмне забезпечення для взаємодії з користувачем через ПК, що може стати обмеженням в процесі розробки на різних ОС.

Виходячи з цього, для взаємодії з SDR в якості програмного забезпечення обрано GNU Radio. Дана публікація зосереджена на описі та обгрунтуванні використання GNU Radio у поєднанні з PlutoSDR для аналізу телекомунікаційного сигналу. Цей апаратно-програмний комплекс дозволить відслідковувати сигнали з частотною маніпуляцією (FSK, Frequency Shift Keying), де інформація передається зміною частоти несучої, записувати та аналізувати їх для подальшого використання в процесі постановки радіозавад.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У ряді наукових джерел розглянуто питання, пов’язані з технологією SDR та їхнім практичним застосуванням. Основоположником концепції «програмного радіо» вважається Джозеф Мітола III, який у 1993 році запропонував ідею заміни традиційних апаратних компонентів радіосистем програмними засобами. Цей підхід став фундаментом сучасного розвитку SDR-технологій. У подальших роботах, зокрема в огляді 1999 року, було відзначено потенціал SDR для розвитку нових стандартів зв’язку, включно з Wi-Fi та стільниковими мережами, що підкреслює ключову роль цієї технології у вдосконаленні бездротових систем[1].

Окремі дослідження присвячені аналізу апаратної складової SDR, зокрема програмованих радіочастотних модулів, високопродуктивних цифро-аналогових та аналого-цифрових перетворювачів, які забезпечують гнучкість та адаптивність систем. У працях також окреслено основні проблеми, з якими стикаються розробники SDR: габарити, вага, енергоспоживання, архітектура програмного забезпечення, безпека, сертифікація та комерційні перспективи. Ці аспекти відображають багатовимірність завдань у сфері створення SDR-рішень[2-4].

Попри наявність огляду платформ SDR, опублікованого у 2012 році, бракує глибокого порівняльного аналізу з точки зору обчислювальної потужності, енергоефективності, вартості, гнучкості та масштабованості. Такий аналіз дозволив би більш об’єктивно оцінити переваги та обмеження існуючих платформ. Значна увага у літературі приділяється також мікрохвильовим технологіям у приймально-передавальних пристроях, включно з дослідженнями перебудовуваних радіочастотних компонентів, підсилювачів, змішувачів та методів подавлення завад. Ці знання є критично важливими для розуміння технічних основ SDR[2,5].

Окремо варто відзначити приклади застосування SDR у космічних системах зв’язку, зокрема тестовий стенд NASA SCAN, який продемонстрував практичну доцільність і переваги програмно-визначених радіосистем у космічних місіях.

Постановка завдання. Метою роботи є ознайомлення з принципами побудови програмно-визначених радіосистем на базі відкритого програмного середовища GNU Radio та апаратної платформи PlutoSDR. Для досягнення цієї мети необхідно:

1. Проаналізувати апаратні можливості PlutoSDR, зокрема частотний діапазон, розрядність АЦП/ЦАП, пропускну здатність та підтримку інтерфейсів зв’язку.

2. Розглянути архітектуру та основні компоненти GNU Radio, які забезпечують створення

та моделювання цифрових радіосистем без залучення спеціалізованих, жорстко визначених радіочастотних апаратних компонентів.

3. Провести аналіз та обґрунтувати доцільність використання програмно-апаратної платформи GNU Radio у поєднанні з PlutoSDR для реалізації програмно-визначеної радіо системи у навчальних та дослідницьких цілях.

4. Розробити демонстраційний приклад прийому FSK-сигналів для верифікації працездатності програмно-апаратної конфігурації

Виклад основного матеріалу дослідження. PlutoSDR позиціонується як «портативний автономний інструмент для вивчення радіочастотних технологій», є навчально-дослідницькою платформою з відкритою апаратною архітектурою на базі GNU/Linux. Пристрій може функціонувати як незалежний модуль або як периферія персонального комп'ютера. Згідно з офіційним списком сумісних пристроїв GNU Radio, PlutoSDR є одним із найбільш доступних рішень серед SDR-пристроїв із підтримкою передачі та прийому сигналів. Дане апаратне рішення дозволяє передавати та приймати сигнали в діапазоні від 70 МГц до 6 ГГц. PlutoSDR використовує інтерфейс USB 2.0, що обмежує частоту дискретизації приблизно до 5 МГц. На рис. 1 наведена спрощена блок-схема PlutoSDR [2,4].

В якості передавача PlutoSDR використовує AD9363. Це високопродуктивний радіочастотний трансивер призначений для використання у фемтостільникових мережах 3G та 4G. Його програмованість і широкосмугові можливості роблять його ідеальним для широкого спектру застосувань. Два незалежні приймачі прямого перетворення характеризуються найсучаснішими показниками шуму та лінійності. Кожен приймач має незалежне автоматичне регулювання підсилення, корекцію зміщення постійного струму, корекцію квадратури та цифрове фільтрування. Передавачі використовують архітектуру прямого перетворення, яка забезпечує високу точність модуляції з наднизьким рівнем шуму. Ця конструкція передавача забезпечує найкращий у своєму класі показник Tx EVM –34 дБ, що дає значний запас міцності системи для вибору зовнішнього підсилювача потужності (PA). Вбудований монітор потужності Tx може використовуватися як детектор потужності, що забезпечує високу точність вимірювання потужності Tx. Повністю інтегровані фазові автопідстроювані контури (PLL) забезпечують низько енергетичний дробовий N-синтез частоти для всіх каналів прийому та передачі. Ізоляція каналів, необхідна для систем FDD, інтегрована в конструкцію. Всі керовані напругою генератори (VCO) та компоненти контурного фільтра інтегровані. Ядро AD9363 може живитися безпосередньо від стабілізатора 1,3 В. ІС керується через стандартний 4-провідний послідовний порт і чотири виводи керування введенням/виведенням у реальному часі. Для мінімізації енергоспоживання під час нормального використання передбачені комплексні режими вимкнення[1,3].

Центральним елементом обчислювальної частини PlutoSDR є Xilinx Zynq XC7Z010-1CLG225C – інтегрована система-на-кристалі, яка об'єднує FPGA-матрицю та високоефективний процесорний комплекс ARM Cortex-A9. Цей гібридний підхід дозволяє обробляти сигнали в режимі реального часу, викону-

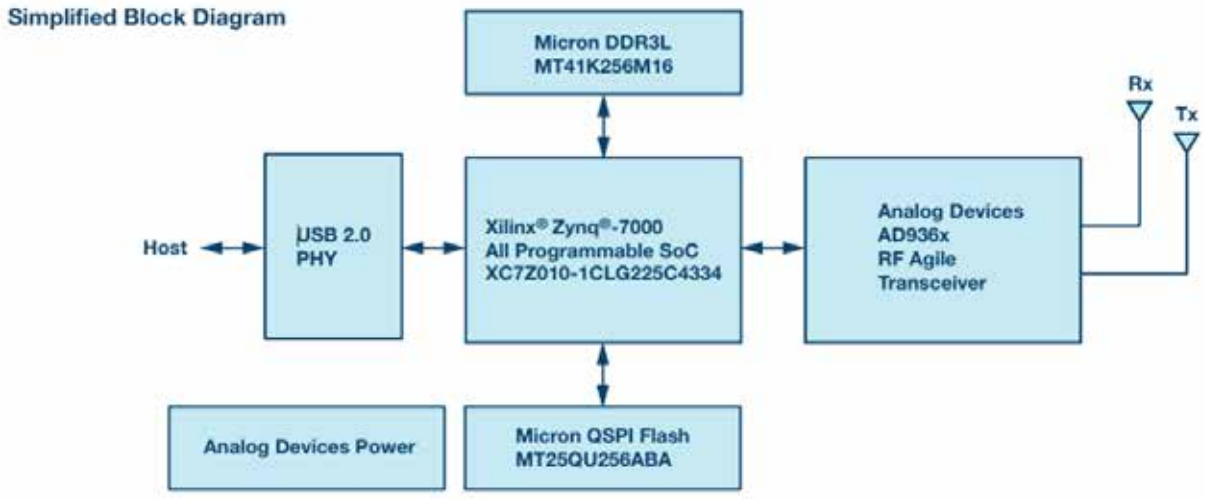

Рис. 1 Блок-схема PlutoSDR

вати складні DSP-алгоритми та реалізовувати індивідуальні апаратні блоки без необхідності додаткових зовнішніх компонентів[4].

Процесорна частина Zynq-7000 базується на двоядерному ARM Cortex-A9 із частотою до 1 ГГц, кешем L1 для команд і даних та спільним кешем L2, що забезпечує достатню продуктивність для робочих процесів високого рівня – включно з керуванням системою, взаємодією з інтерфейсами та виконанням користувацьких застосунків. Наявність вбудованої пам'яті та контролерів зовнішньої DDR дозволяє ефективно працювати з великими потоками даних, характерними для SDR-пристроїв[4].

Не менш важливою складовою є FPGA-частина на основі архітектури Artix-7, що містить тисячі логічних елементів, LUT-блоків і фліп-флопів, а також апаратні DSP-множники. Саме вона відповідає за швидку паралельну обробку даних, апаратні фільтри, синтезаторні структури та інші блоки, які важливо реалізувати з мінімальними затримками[4].

Комплекс інтерфейсів, доступних у Zynq XC7Z010, включає GPIO, SPI, I²C, UART, USB OTG та Ethernet, що дозволяє легко інтегрувати SDR у складні системи або забезпечувати автономну роботу. Завдяки тісній інтеграції ARM-процесора та програмованої логіки на одному кристалі, Zynq забезпечує низькі затримки та високу пропускну здатність між процесорними і апаратними блоками[4].

GNU Radio – це безкоштовний набір інструментів для розробки програмного забезпечення з відкритим кодом, який надає блоки обробки сигналів для реалізації програмних радіозасобів. Основною перевагою GNU Radio є його гнучка та добре структурована модульність. Платформа побудована так, що користувач може самостійно поєднувати різноманітні блоки обробки сигналів – наприклад генератори хвильових форм, модулювальні елементи чи фільтри – створюючи повноцінні ланцюги цифрової обробки. Усі ці компоненти можна вільно конфігурувати та з'єднувати між собою у вигляді графічної блок-схеми, що дозволяє швидко реалізовувати системи для передавання та приймання бездротових сигналів[5].

GNU Radio надає великий набір готових модулів, однак за потреби користувач може розробляти власні та інтегрувати їх у проєкт. Програмна частина системи базується на C++ та Python: перша мова використовується для реалізації високопродуктивних базових блоків, а друга – для швидкого створення та керування потоками обробки. Такий поділ дозволяє поєднати простоту та швидкість розробки на Python із високою продуктивністю, яку забезпечує C++. Хоча верхній рівень застосунків зазвичай створюється на Python, обчислювально складні операції фактично виконуються оптимізованими C++ модулями з підтримкою обчислень з плаваючою комою.

Основні компоненти GNURadio показано на найпростішому прикладі використання PlutoSDR при створенні графу FM-приймача (рис. 2).

Зверху представлені блоки «Variable» та «QT GUI Range». Блок «Variable» дозволяє створювати змінні та використовувати їх в інших блоках по декілька разів. «QT GUI Range» дозволяє створити елемент керування, який може змінювати значення відносно вхідної змінної та передавати ці зміни у визначений користувачем блок. В даному випадку «QT GUI Range» відповідає за зміну частоти в параметрі LO Frequency блоку «PlutoSDR Source».

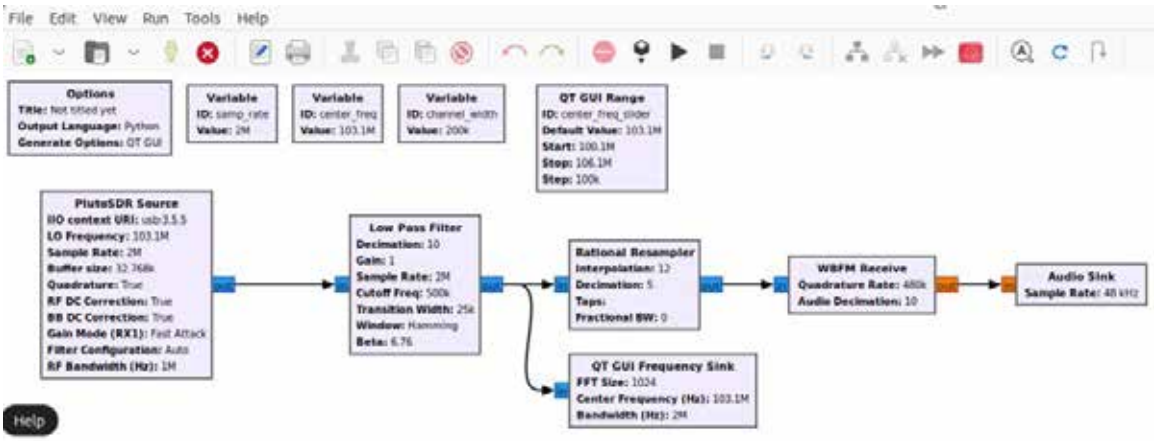

Рис. 2. Граф FM-приймача

В якості джерела сигналу використовується блок «PlutoSDR Source». Це вхідний блок в якому вказуються необхідні параметри для отримання сигналу з фізичного пристрою PlutoSDR. А саме:

– IIO context URI – це інтерфейс входу. В прикладі наведеному на рис. 2 в цей параметр поміщена функція iio.get_pluto_uri(), яка автоматично повертає номер USB порту, або IP адресу підключеного пристрою PlutoSDR.

– LO Frequency – частота осцилятора.

– Sample Rate – частота дискретизації в відліках на секунду.

– RF Bandwidth – налаштовує аналогові фільтри RX: RX TIA LPF та RX BB LPF.

«Low Pass Filter» використовується перед ресемплером для запобігання ефекту аліасингу (накладення високочастотних складових на корисний діапазон) під час децимації. Оскільки сигнал з пристрою надходить із високою частотою дискретизації, зайві високочастотні компоненти необхідно видалити перед зменшенням частоти вибірок. Фільтр пропускає лише ту частину спектра, яка відповідає смузі FM-станції, зменшуючи шум та обсяг даних, що передаються на подальшу обробку.

Блок «Rational Resampler» дозволяє перетворити вхідну послідовність відліків з одного sample rate в інших шляхом децимації та інтерполяції. Даний блок по суті використовується для підгонки під потрібний sample rate.

Блок «WBFM Receiver» використовується для демодуляції широкосмугового FM сигналу в аудіопотік. Після цього потік даних у форматі float передається в блок «Audio Sink». Завдяки останньому, під час роботи програми, можна послухати прийнятий FM, як звичайне радіо.

Візуалізацію отримуваного сигналу у вигляді спектру забезпечує блок «QT GUI Frequency Sink». Спектр сигналу під час виконання програми представлено на (рис. 3).

При виборі апаратної частини для досягнення цілей дослідження було порівняно декілька загальнодоступних SDR:

– Universal Software Radio Peripheral(USRP)
– HackRF One
– RTL-SDR
– PlutoSDR

USRP B210 розроблений для недорогих експериментів, він поєднує в собі трансівер прямого перетворення RFIC AD9361, що забезпечує смугу пропускання до 56 МГц в реальному часі, відкриту і з можливістю перепрограмування FPGA Spartan6, а також швидке з'єднання SuperSpeed USB 3.0 зі зручним живленням по шині. Повна підтримка програмного забезпечення USRP Hardware Driver™ (UHD) дозволяє вам негайно розпочати розробку з використанням GNU Radio. Інтегрований радіочастотний інтерфейс USRP B210 розроблений з використанням нового одно-

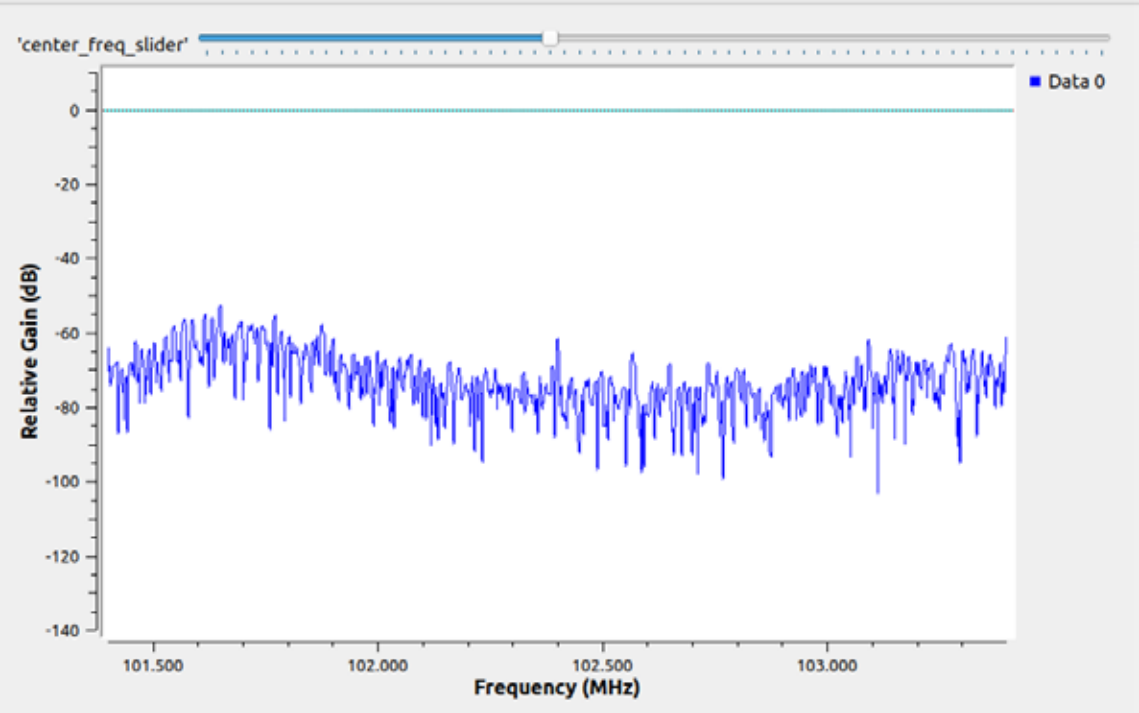

Рис. 3. Вікно з візуалізацією спектру вхідного сигналу

кристального трансівера прямого перетворення Analog Devices AD9361, здатного передавати радіочастотну смугу пропускання до 56 МГц в реальному часі. B210 використовує обидві сигнальні ланцюги AD9361, забезпечуючи когерентну можливість MIMO. Вбудована обробка сигналів та керування AD9361 виконуються FPGA Spartan6 XC6SLX150, підключеною до хост-комп'ютера за допомогою SuperSpeed USB 3.0. Пропускна спроможність USRP B210 у реальному часі забезпечує повну миттєву смугу пропускання РЧ 56 МГц на головний ПК для подальшої обробки з використанням GNU Radio або додатків, які використовують UHD API[6].

HackRF One – це портативний напівдуплексний SDR-трансивер, здатний працювати в надзвичайно широкому діапазоні частот від 1 МГц до 6 ГГц, що робить його універсальним інструментом для радіоекспериментів. Пристрій підтримує квадратичну вибірку зі швидкостями від 2 до 20 MSPS і використовує 8-бітну розрядність, що є раціональним рішення для недорогих широкосмугових SDR. Підключення до хост-комп’ютера здійснюється через високошвидкісний інтерфейс USB, який також забезпечує живлення, завдяки чому HackRF One не потребує зовнішнього блока живлення й залишається справді мобільним. Пристрій оснащений SMA-роз’ємами для антени та синхронізації, а також має програмно кероване живлення антенного порту, можливість розширення через пін-хедери та кнопки для зручного перепрограмування. Архітектура HackRF One є відкритою, що сприяє широкому використанню в дослідницьких проєктах. Водночас важливо враховувати чутливість приймального тракту: максимально допустима вхідна потужність становить –5 dBm, і її перевищення може призвести до незворотних пошкоджень, тому під час роботи з сильними сигналами рекомендується використовувати зовнішні атенюатори[7].

RTL-SDR (Real-Time Software Defined Radio) – це клас маловартісних програмно-визначених радіоприймачів, що базуються на масово поширених DVB-T USB-тюнерах із чипом RTL2832U, який надає доступ до необроблених квадратурних (I/Q) вибірок. Завдяки цьому приймальний тракт переноситься з апаратної частини у програмне забезпечення, де демодуляція, фільтрація та обробка сигналів реалізуються алгоритмічно. Типовий RTL-SDR забезпечує прийом у діапазоні приблизно 0.5 МГц – 1.75 ГГц (залежно від тюнера та конфігурації), з розрядністю АЦП 8 біт і максимальною частотою дискретизації близько 2.4 Мвиб/с, що визначає його динамічний діапазон і спектральну роздільну здатність. RTL-SDR пристрої призначені виключно для прийому та не підтримують передачу сигналів, що істотно відрізняє їх від повнофункціональних трансиверних SDR-платформ. Попри апаратні обмеження, вони набули широкого застосування у радіомоніторингу, аналізі спектру, прийомі авіаційних та морських сигналів, ADS-B, супутникових передач, а також у навчальних і дослідницьких цілях. Низька вартість, відкрита екосистема програмного забезпечення та кросплатформна підтримка зробили RTL-SDR де-факто стандартом початкового рівня, який часто використовується як базова точка порівняння з більш продуктивними SDR-рішеннями, що мають вищу розрядність, ширшу смугу пропускання та можливість передавання сигналів[8-10].

Проведений огляд показує, що сучасні SDR-платформи істотно відрізняються як за апаратною реалізацією, так і за експлуатаційними характеристиками. Відмінності стосуються частотних діапазонів, режимів роботи (прийом/передача), розрядності АЦП/ЦАП, пропускної здатності та обчислювальних ресурсів. Зазначені параметри безпосередньо впливають на можливості практичного використання SDR у навчальних та дослідницьких задачах. Для узагальнення отриманих даних та спрощення їх подальшого аналізу в табл. 1 наведено порівняння характеристик розглянутих SDR.

На основі проведеного порівняльного аналізу можна зробити висновок, що PlutoSDR є найбільш збалансованим рішенням для реалізації поставлених у роботі завдань. На відміну від RTL-SDR, який обмежений лише прийомом сигналів і має низьку розрядність АЦП, PlutoSDR підтримує як прийом, так і передачу, що є критично важливим для дослідження методів генерації сигналів та постановки радіозавад. У порівнянні з HackRF One, PlutoSDR забезпечує вищу розрядність перетворювачів, кращий динамічний діапазон і повнодуплексний режим роботи, що розширює можливості експериментів із цифровими модуляціями. З таблиці видно, що USRP B210 перевершує PlutoSDR за миттєвою смугою пропускання та продуктивністю, проте його висока вартість і надмірні для навчально-дослідницьких задач апаратні ресурси роблять його менш доцільним для використання в рамках даного дослідження. PlutoSDR, завдяки інтеграції RF-трансивера AD9363 та гібридної SoC-платформи Xilinx Zynq, поєднує достатню обчислювальну потужність,

Таблиця 1

Порівняння характеристик SDR

Характеристика	RTL-SDR	HackRF One	PlutoSDR	USRP B210
Тип пристрою	Приймач	Напівдуплексний трансивер	Повнодуплексний трансивер	
Діапазон частот	0,5 МГц – 1,75 ГГц	1 МГц – 6 ГГц	70 МГц – 6 ГГц	
Розрядність АЦП	8 біт	8 біт	12 біт	
Максимальна частота дискретизації	~2,4 MSPS	до 20 MSPS	~5 MSPS	до 61,44 MSPS
Миттєва смуга пропускання	~2 МГц	до 20 МГц	до 5 МГц	до 56 Мгц
Обчислювальна частина	Відсутня	MCU + CPLD	Xilinx Zynq-7000	FPGA Spartan-6
Вартість	~ 30$	~ 300$	~ 250$	~ 2000$

гнучкість апаратної конфігурації та повну сумісність із GNU Radio. Саме ці фактори зумовили вибір PlutoSDR як оптимальної програмно-апаратної платформи для аналізу телекомунікаційних сигналів у межах представленої роботи.

Для попередньої перевірки працездатності програмно-апаратної конфігурації було реалізовано спрощений граф (рис. 4) GNU Radio, що складається з мінімального набору блоків: PlutoSDR Source, Low Pass Filter та QT GUI Frequency Sink. Даний граф призначений для підтвердження факту прийому радіосигналу в заданому частотному діапазоні та оцінки його спектральних характеристик у реальному часі. Блок PlutoSDR Source використовується як джерело комплексних I/Q-відліків, отриманих безпосередньо з апаратного приймача PlutoSDR. Прийом здійснюється на центральній частоті 868,5 МГц. Параметри приймача налаштовані таким чином, щоб забезпечити стабільний прийом короткотривалих FSK-пакетів, характерних для малопотужних бездротових датчиків в даному діапазоні. Для зменшення обчислювального навантаження та обмеження спектра до корисної смуги застосовано низькочастотний фільтр із децимацією, який виконує попередню цифрову обробку сигналу. Фільтр одночасно пригнічує позасмугові шумові компоненти та зменшує частоту дискретизації, що дозволяє зосередити подальший аналіз на вузькій смузі навколо несучої частоти FSK-сигналу. Візуалізація спектра реалізована за допомогою блоку QT GUI Frequency Sink, який відображає спектральний розподіл сигналу в режимі реального часу. Це дозволяє спостерігати характерні частотні відхилення FSK-сигналу, а також оцінювати рівень шуму та відносну потужність прийнятих пакетів.

На рис. 5 представлено результат захоплення пакета з ефіру за допомогою вищенаведеного графа прийому. Синім кольором відображено поточний спектральний розподіл сигналу, що відповідає фоновому стану ефіру за відсутності

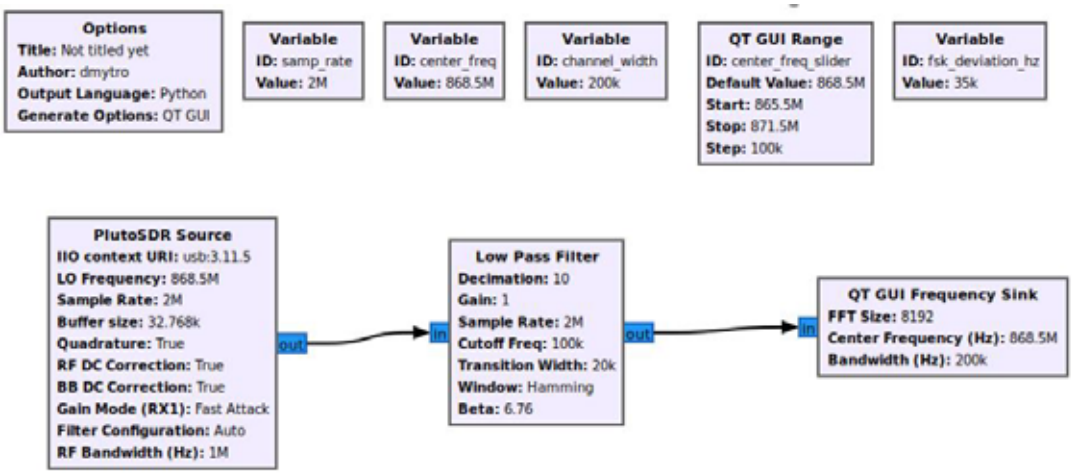

Рис. 4. Граф GNU Radio для візуальної верифікації прийому FSK-сигналу з використанням PlutoSDR

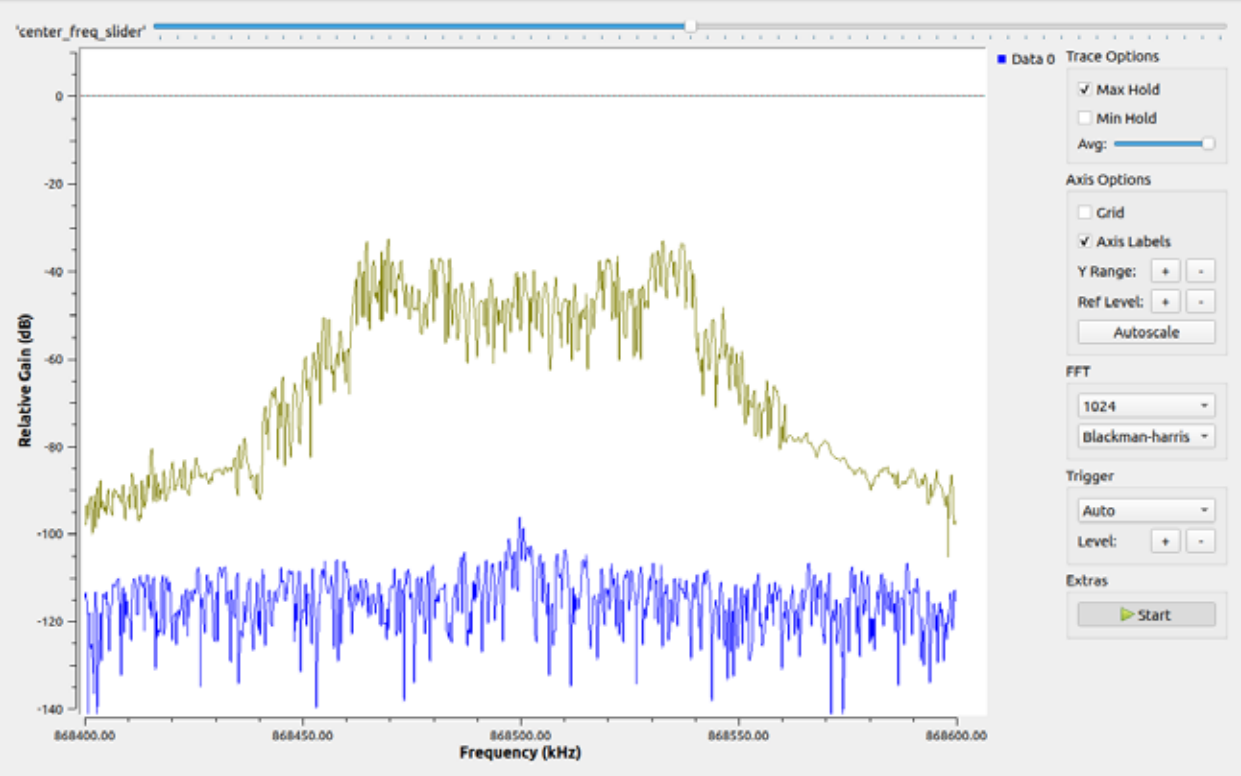

Рис. 5. Візуалізація прийому пакету у вікні QT GUI Frequency Sink

активної передачі. Золотавим кольором показано спектр у режимі Max Hold, який фіксує максимальні значення амплітуди за час спостереження та дозволяє виявити наявність короткотривалого FSK-пакета, що з'являється лише протягом обмеженого інтервалу часу. Застосування режиму Max Hold забезпечує наочну візуалізацію прийнятого пакета навіть за умови його рідкісної або імпульсної передачі.

Висновки. У роботі проведено комплексне дослідження та обґрунтування вибору програмно-апаратної складової для аналізу телекомунікаційних сигналів. На основі порівняльного аналізу характеристик популярних SDR-платформ (RTL-SDR, HackRF One, PlutoSDR, USRP B210) встановлено, що PlutoSDR є оптимальним вибором для навчально-дослідницьких цілей. Ця платформа поєднує в собі такі переваги, як доступна вартість, широкий частотний діапазон, повнодуплексний режим роботи та достатня обчислювальна потужність завдяки архітектурі на базі SoC Xilinx Zynq.

Вибір середовища GNU Radio як програмної складової дозволив реалізувати гнучку систему обробки сигналів. Модульна структура GNU Radio дає можливість легко адаптувати систему під різні завдання, змінюючи параметри блоків або додаючи нові алгоритми обробки. Розроблений та протестований граф для прийому FSK-сигналів підтвердив працездатність та ефективність запропонованого рішення. Отримані результати візуалізації спектру демонструють здатність системи виявляти та аналізувати сигнали у реальному часі, що є важливим для задач радіомоніторингу.

Таким чином, поєднання апаратної платформи PlutoSDR та програмного середовища GNU Radio створює потужний інструмент для дослідження сучасних телекомунікаційних систем. Це рішення дозволяє не лише аналізувати існуючі сигнали, а й моделювати нові протоколи зв'язку, досліджувати методи модуляції та розробляти алгоритми обробки сигналів без необхідності використання дорогого спеціалізованого обладнання. Перспективи подальших досліджень включають розширення функціоналу системи для роботи з іншими типами модуляції, реалізацію алгоритмів автоматичного виявлення та класифікації сигналів, а також дослідження можливостей платформи для задач радіоелектронної боротьби та кібербезпеки бездротових мереж.

Список літератури:

1. Зилевіч М.О., Сваха Д.М. Високоефективні методи постановки радіозавад на основі аналізу комунікаційного сигналу. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* 2025. Т. 36, № 1, Ч. 2, С. 78–83. DOI: https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/14
2. Nimbalkar V., Ingole A., Mane K., Sampurna, BazilRaj A. A. Generate FM wave using gnu radio establishing local communication using SDR platform. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science (IRJMETS).* 2023. DOI: https://doi.org/10.56726/IRJMETS46756.
3. Xu S., Guo J. Review of Design and Implementation of New Software Radio System based on GNU Radio and USRP. Physics Procedia. 2012.
4. Collins T., Getz R., Pu D., Wyglinski A. M. Software-Defined Radio for Engineers. Artech House, 2018. 370 p.
5. AD9363: RF Agile Transceiver : Data Sheet. Analog Devices. URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9363.pdf
6. Zynq-7000 SoC Data Sheet: Overview [Electronic resource]. AMD (Xilinx). URL: https://docs.amd.com/v/u/en-US/ds190-Zynq-7000-Overview.
7. GNU Radio Wiki : Main Page. URL: https://wiki.gnuradio.org/index.php?title=Main_Page
8. USRP B200/B210: USB Software Defined Radio (SDR) : Specification Sheet. Ettus Research. URL: https://www.ettus.com/wp-content/uploads/2019/01/b200-b210_spec_sheet.pdf
9. HackRF One Documentation. Great Scott Gadgets. URL: https://hackrf.readthedocs.io/en/latest/hackrf_one.html
10. About RTL-SDR. RTL-SDR.com. URL: https://www.rtl-sdr.com/about-rtl-sdr

Zylevich M.O., Svakha D.M. SELECTION AND VERIFICATION OF SDR TOOLS FOR EDUCATIONAL AND RESEARCH TASKS IN TELECOMMUNICATIONS

The article focuses on the analysis and justification for selecting a hardware-software platform to conduct research and experiments in the field of telecommunication signal analysis. Given the rapid development of telecommunication technologies and the expansion of the utilized frequency spectrum, developing effective tools for signal monitoring, analysis, and processing is a crucial task. The authors highlight the advantages of SDR technology, which enables the implementation of a significant portion of signal processing functions via software, thereby ensuring flexibility, versatility, and cost-effectiveness of solutions.

The study conducts a comparative analysis of popular SDR platforms, such as RTL-SDR, HackRF One, PlutoSDR, and USRP B210, based on criteria including operating frequency range, ADC/DAC resolution, bandwidth, signal transmission capabilities, and cost. Based on the analysis, the selection of the PlutoSDR platform is justified as the most optimal solution for educational and research tasks. The PlutoSDR platform features full-duplex operation, a wide frequency range (70 MHz – 6 GHz), 12-bit ADC/DAC resolution, and an embedded Xilinx Zynq System on Chip (SoC) that combines an ARM Cortex-A9 processor and an Artix-7 FPGA. This architecture provides sufficient computational power for real-time signal processing and configuration flexibility.

GNU Radio was selected as the software environment for working with PlutoSDR. It is an open-source toolkit that enables the creation of complex signal processing schemes using a graphical interface and Python and C++ programming languages. The article details the process of creating a flowgraph in GNU Radio for receiving and analyzing signals with FSK. The main blocks used in the flowgraph are described: the signal source (PlutoSDR Source), the Low Pass Filter, the Rational Resampler, the FM demodulator (WBFM Receive), and spectrum visualization tools (QT GUI Frequency Sink).

The experimental results confirm the effectiveness of the chosen configuration. The presented spectrograms demonstrate the successful reception and identification of an FSK signal in the 868 MHz band, which is typical for wireless sensors and IoT systems. The use of the Max Hold mode allowed for the capture of short-duration data packets, confirming the suitability of the developed system for spectrum monitoring and signal detection. The work demonstrates the potential of combining GNU Radio and PlutoSDR to create affordable and functional tools for radio signal analysis, which can be used both in the educational process and for solving applied tasks in the field of telecommunications and radio monitoring.

Keywords: *SDR, GNU Radio, PlutoSDR, signal analysis, telecommunication systems, digital signal processing, Frequency Shift Keying, radio monitoring.*

Дата першого надходження статті до видання: 07.01.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 03.02.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026