

УДК 621.391.8:621.396.96

DOI: 10.31673/2412-9070.2026.025307

І. Л. КОВАЛЕНКО, аспірант;

ORCID: 0009-0003-3417-5271

А. В. МОВЧАНЮК, канд. техн. наук, професор,

ORCID: 0000-0003-2901-0424

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського

**МОДИФІКОВАНИЙ АМПЛІТУДНИЙ МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ
З ПСЕВДОВИПАДКОВИМ ПЕРЕЛАШТУВАННЯМ РОБОЧОЇ ЧАСТОТИ
З НИЗЬКИМИ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИМИ ВИТРАТАМИ**

У середовищі GNU Radio Companion реалізовано та оцінено модифікований амплітудний метод виявлення сигналів з псевдовипадковим перелаштуванням частоти (ППРЧ), включаючи сигнали з частковим заповненням каналу, які характерні для реальних джерел випромінювання. Для генерації тестових сигналів із різним коефіцієнтом заповнення смуги частот використано вдосконалений параметричний синтезатор, що дозволило оцінити роботу алгоритму. Основна відмінність запропонованого методу полягає у здатності адаптивно обробляти сигнали з частковим заповненням каналу, що істотно розширює потенціал його застосування. Алгоритм включає етапи попередньої фільтрації, кореляційного та гістограмного аналізів, та амплітудної селекції, що забезпечує високу завадостійкість та селективність. Проведене моделювання підтвердило доцільність підходу в умовах різного заповнення частотного каналу та у широкому діапазоні вхідних амплітуд, а обчислювальна простота дозволяє реалізувати його на базі SDR систем.

Ключові слова: ППРЧ, сигнали з розширеним спектром, амплітудний метод виявлення, амплітудна селекція, гістограмний аналіз, пеленгація, моделювання сигналів.

Вступ

Реалії сучасного світу диктують необхідність стрімкого розвитку систем зв'язку, управління безпілотними платформами, засобів радіоелектронної розвідки та боротьби 0. Особливої актуальності набуває розробка методів виявлення джерел сигналів з розширеним спектром, зокрема таких, що використовують псевдовипадкове перелаштування робочої частоти (ППРЧ). Традиційні амплітудні методи демонструють низьку ефективність в умовах стрибків частоти-носія та низького відношення сигнал/шум 0, 0, 0. Запропонований у першій частині статті 0 непараметричний амплітудний метод виявлення сигналів, який орієнтований на визначення частоти-носія активного каналу передачі та обчислення енергії у вузькій смузі частот одного каналу ППРЧ, продемонстрував вищу ефективність порівняно з класичним амплітудним детектором, зокрема здатність до амплітудної селекції випромінювачів. У своїй роботі метод використовує послідовність простих математичних операцій, щоб відповідати критерію низьких обчислювальних витрат, що робить можливим його реалізацію на портативних SDR-платформах.

Попри продемонстровану ефективність розробленого методу у задачах амплітудної селекції та виявлення сигналів з ППРЧ, подальші експерименти з двома джерелами випромінювання виявили низку обмежень, що потребували доопрацювання. Зокрема, було встановлено, що при частковому або повному накладанні частот-носіїв двох випромінювачів, алгоритм не здатний коректно відокремити їх, що призводить до втрати інформації про слабший сигнал у даний момент часу. Крім того, метод показав високу залежність від умов безперервної передачі, то-

бто його ефективність значно знижується у випадках, коли між передачами сигналу присутні паузи або має місце низький рівень заповнення частотних каналів. У цьому дослідженні зроблено спробу подолати зазначені недоліки за рахунок вдосконалення структури алгоритму та введення механізмів, що враховують більш реалістичні форми сигналів, умови передачі та можливість наявності декількох джерел випромінювання з перекриттям їх частотних діапазонів.

Метою другої частини дослідження є удосконалення алгоритму амплітудної селекції з метою її подальшої локації, зокрема уточнення методів обробки в умовах перекриття каналів, підвищення стійкості до пауз передачі та реалізація більш гнучкої обробки вхідних спектральних даних. Особливу увагу приділено адаптації механізму оцінки локальних максимумів в умовах наявності шуму та багатосигнального середовища.

Подальший розвиток непараметричного амплітудного методу виявлення сигналів з псевдовипадковим перелаштуванням робочої частоти (ППРЧ) потребує розширення підходу з урахуванням реалістичніших параметрів передавачів та можливості перекриття каналів. Актуальною залишається задача відстеження змін частоти-носія в умовах наявності кількох сигналів із близькими параметрами та низьким рівнем заповнення частотних каналів.

Постановка задачі. Модифікувати розроблений у першій частині дослідження непараметричний алгоритм 0, з метою покращення здатності виявляти і розрізняти сигнали ППРЧ з низьким рівнем заповнення частотного каналу для подальшої оцінки їх амплітуди, з метою визначення напрямку приходу сигналів методами амплітудної локації. Модифікований алгоритм має мати можливість розрізняти декілька сигналів ППРЧ з низьким рівнем заповнення частотного каналу за амплітудною ознакою. Модифікований алгоритм має слідувати принципу використання простих математичних перетворень, що дозволить використати його на малопотужних SDR платформах.

Основна частина

При розробці нових методів радіопеленгації гостро стоїть завдання отримання тестових сигналів, що будуть якісно наближені за характеристиками до реальних джерел випромінювання, які є цільовими для виявлення 0. Особливо актуальним воно є для складних сигналів або модуляцій з розширеним спектром, якими є ППРЧ сигнали, що розглядаються в даному дослідженні. Очевидною є проблема роботи з сигналами реальних джерел випромінювання для поточного тестування розроблених алгоритмів, оскільки це вимагає передавання радіосигналів значної потужності в ліцензованих або закритих для цивільного використання частотних діапазонах. Для визначення характеристик цільових сигналів використовуються їх записи з автономних точок радіомоніторингу, розміщених в зонах їх застосування. Оскільки розробка синтезатора, що може виступати релевантним та адекватним аналогом реального джерела радіосигналу має практичну цінність і є важливою частиною розробки модифікованого алгоритму виявлення ППРЧ сигналів, він буде розглянутий більш детально.

Методика визначення параметрів цільових сигналів ППРЧ приводиться в 0 та 0. В межах даного дослідження важливими параметрами є смуга частот кожного каналу (150-300кГц), швидкість перемикання каналів (<20Гц) та рівень заповнення частотного каналу (>30%). Перемикання каналів відбувається за вседовипадковим законом, що невідомий спос-терігачу, тобто алгоритм, що модифікується є непараметричним.

В основі модифікованої системи покладено удосконалений параметричний синтезатор ППРЧ сигналів (Рис. 1), реалізований в GNU Radio Companion (далі – GRC) із використанням мови Python. Він дозволяє генерувати сигнали з заданими параметрами: діапазон частот, ширина каналу, частота перемикання, тип модуляції, рівень заповнення пакету. Для контролю амплітуди сигналів використовуються незалежні підсилувачі та атенюатори. Синтезатор забезпечує достовірну імітацію поведінки реальних джерел ППРЧ сигналів, включно з пропусками, спектральним розливом та змінами амплітуди.

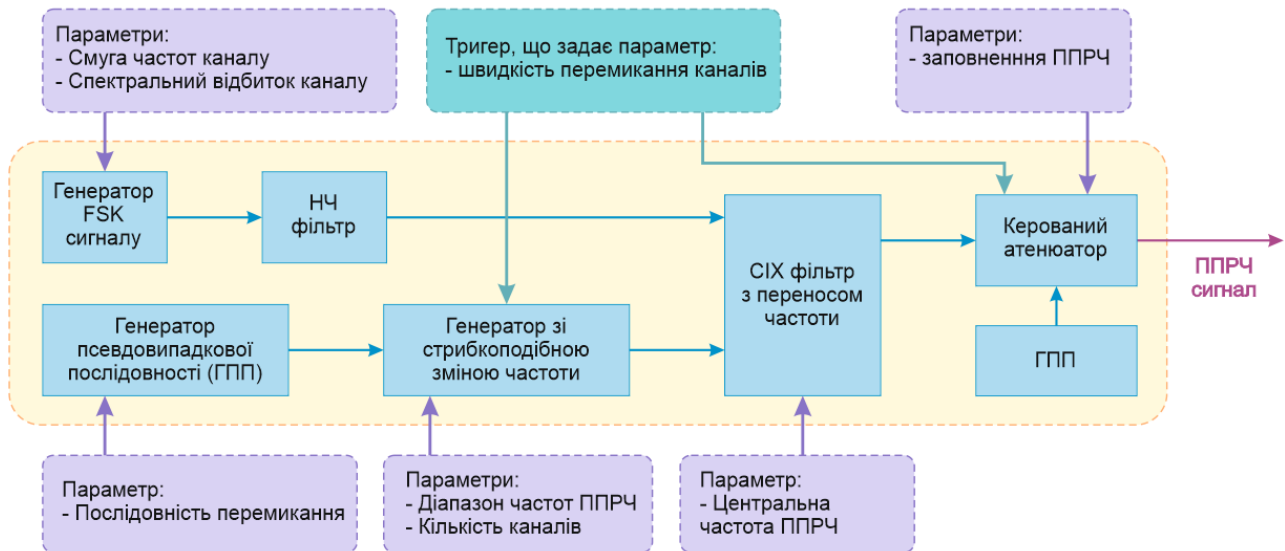


Рис. 1. Функціональна блок-діаграма модифікованого синтезатора з вказанням змінних параметрів та шляхів синхронізації

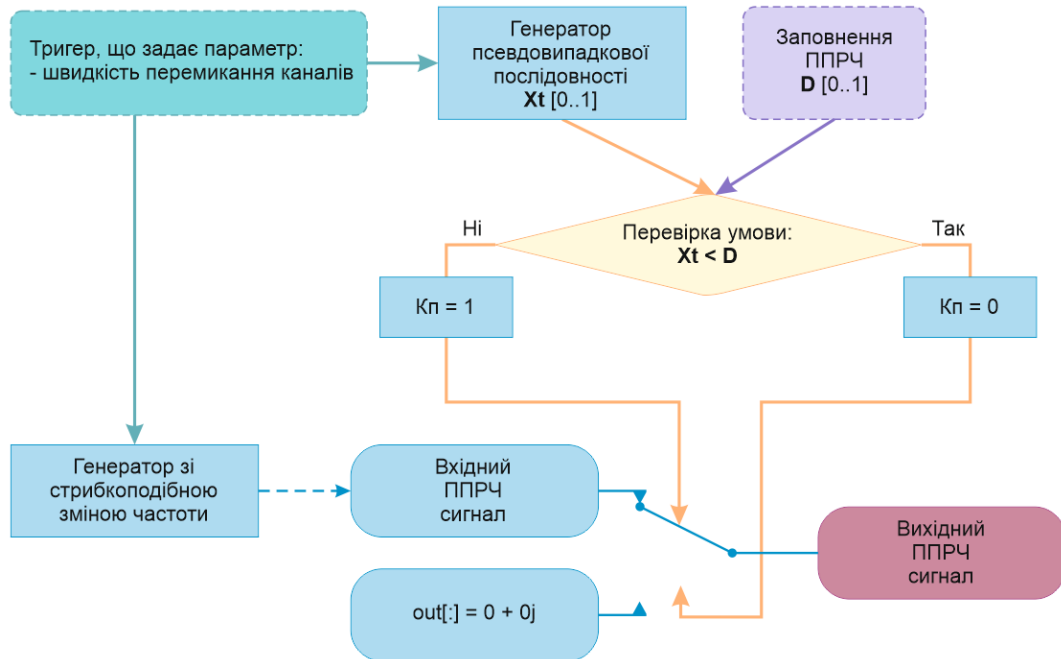


Рис. 2. Алгоритм роботи блока пропуску пакетів ППРЧ синхронізованого зовнішнім тригером

Для отримання ППРЧ сигналу з підтримкою змінного рівня заповнення частотного каналу було удосконалено опорний генератор сигналу шляхом додавання блоку пропуску пакетів ППРЧ, що синхронізований у часі з генератором стрибкоподібної зміни частоти. Блок реалізовано засобами мови Python. Функціонально даний блок виконує роль керованого атенюатора (Рис. 2), що використовуючи зовнішній тригер та вбудований генератор псевдовипадкових чисел, враховуючи необхідний рівень заповнення як вхідний параметр, подавляє або пропускає без спотворення пакети ППРЧ на виході СІХ-фільтра. Для точної синхронізації блоку пропуску пакетів і генератора стрибкоподібної зміни частоти-носія використовується спільний зовнішній циклічний тригер, який визначає швидкість перемикання частотних каналів.

З спектрограм сигналів ППРЧ з різними налаштуваннями вхідних параметрів, синтезованих модифікованою системою, що наведені в 0, можна зробити висновок, що розроблений синтезатор може використовуватися як генератор тестових вхідних сигналів при подальшому дослідженні покращеного алгоритму.

Щоб отримати тестовий сигнал, що більш наближений до реальних умов поширення радіохвиль, вихідні сигнали декількох модифікованих синтезаторів ППРЧ з різними характеристиками, що відтворюють вигляд сигналів різних цільових випромінювачів, змішується з адитивним білим Гаусовим шумом та/або керованим джерелом потужної завади незмінної частоти. Навантаженням системи виступає блок віртуального передавального тракту, який в подальшому легко може бути замінений вихідним трактом реального SDR передавача. Візуалізація сигналів та спектрограм здійснюється вбудованими засобами GRC, гістограм – засобами бібліотеки Python matplotlib.

Основним напрямком модифікації алгоритму виявлення та відстеження амплітуди ППРЧ сигналу (Рис. 3) є покращення роботи блоку обробки оцифрованого сигналу для коректної роботи при наявності пропусків пакетів – ППРЧ сигналу з рівнем заповнення частотного каналу <100%, який характерний для цільових джерел випромінювання, що широко застосовуються для передачі телеметрії та низько-швидкісних інформаційних каналів, для обміну службовою інформацією та, рідше, для передачі сигналів керування.

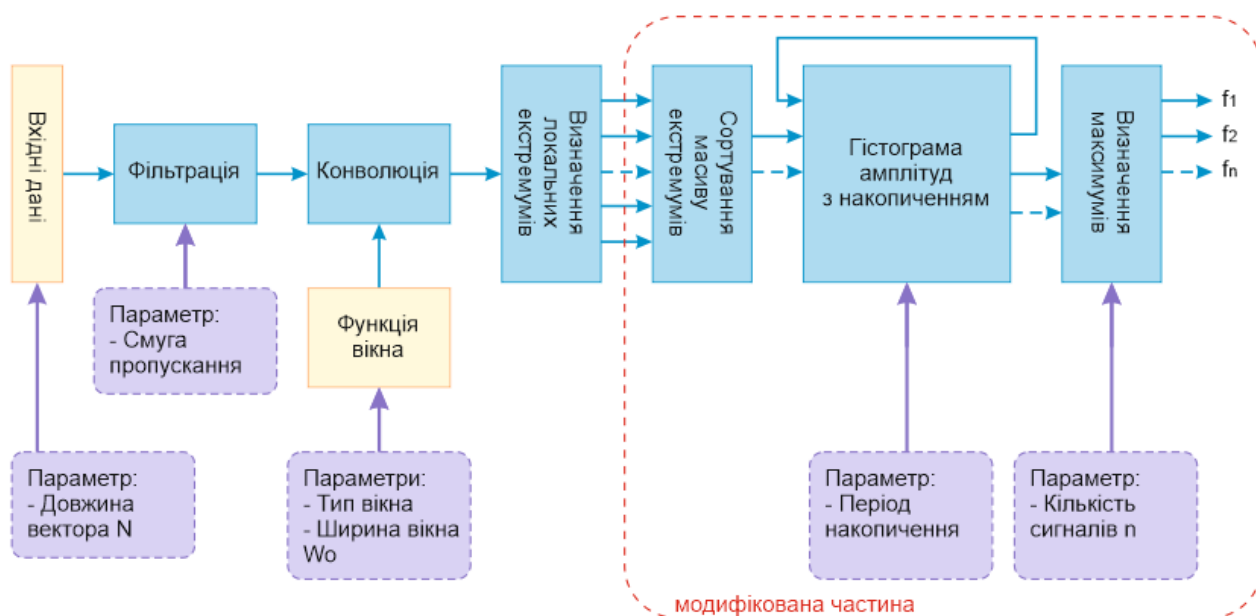


Рис. 3. Узагальнена структурна схема алгоритму з вказанням змінних параметрів і частини, що модифікується

Для забезпечення коректної амплітудної селекції та можливості відслідковування сигналів навіть при пропусках пакетів у блок обробки було додано кілька функціональних етапів, що реалізують селекцію сигналів на основі побудови гістограми амплітуд частотних відліків, накопичених у часі. На вхід блоку побудови гістограми надходить відсортований за спаданням масив координат локальних екстремумів на графіку взаємної кореляції вхідного сигналу з прямокутною віконною функцією, помножених на вагові коефіцієнти відповідно до їх номеру у масиві та вказаної кількості сигналів n . Блок має накопичений у часі масив вхідних значень, довжина якого визначається зовнішнім параметром періоду накопичення. Функціонально масив реалізований по принципу регістру послідовного зсуву FIFO (First-In-First-Out). На останньому етапі проводиться підрахунок кількості однакових за амплітудою відліків і нормалізація вихідної гістограми. Щоб пояснити принцип роботи даного підходу розглянемо кілька випадків одиночних ППРЧ сигналів та їх комбінацій.

Оскільки симуляція роботи проводиться в програмному середовищі – використовуються відносні одиниці амплітуди (далі – ВОа). Для оцінки переваг методу порівняємо його з роботою алгоритму, який розглянуто в 0, подавши на вхід тестовий ППРЧ сигнал амплітудою 22 ВОа з рівнем заповнення частотного каналу 50% на фоні білого шуму (2 ВОа) – Випадок 1 (Рис. 4, ліворуч).

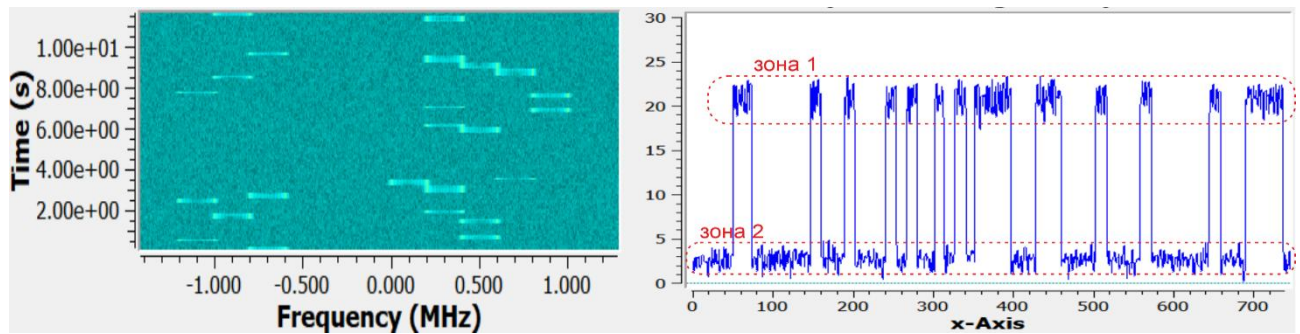


Рис. 4. Спектрограма ППРЧ сигналу з заповненням частотного каналу 50% (ліворуч) та вихідний сигнал амплітудного детектора (праворуч)

Як можна побачити на графіку вихідного сигналу амплітудного детектора (Рис. 4, праворуч) є дві характерні області, позначені «зона 1» та «зона 2». «Зона 1» відповідає моментам часу, коли на вході детектора наявний пакет ППРЧ сигналу і алгоритм коректно відпрацьовує пошук частоти-носія активного каналу передачі та може вирахувати його амплітуду. Відповідно, усереднене значення амплітуди даної зони становить 21 ВОа та рівне амплітуді тестового сигналу. Натомість, «зона 2» відповідає моментам часу, коли в передачі ППРЧ наявні пропуски пакетів – сигнал відсутній, амплітудний детектор обраховує помилкові значення через наявність шуму в каналі передачі. Випадок 1 є найпростішим для подальшої обробки, оскільки достатньо ввести звичайний пороговий фільтр. Варто зазначити, що графік вихідного сигналу (Рис. 4, праворуч) амплітудного детектора є допоміжним засобом візуального відображення, який функціонально реалізує накопичення масиву значень у часі. Алгоритм, що досліджується, не має даної інформації і працює лише з миттєвим значенням у даний конкретний час.

Більш складними для обробки є випадки, коли на вході детектора є комбінація двох і більше ППРЧ сигналів різної амплітуди, що передаються у смугах частот, що накладаються одна на одну. Розглянемо випадок 2 (Рис. 5, ліворуч), коли на вхід подається комбінація двох ППРЧ сигналів з рівнем заповнення частотного каналу 50%, амплітудами 14 та 21 ВОа, на фоні білого шуму (2 ВОа), робочі діапазони частот двох сигналів повністю перекриваються.

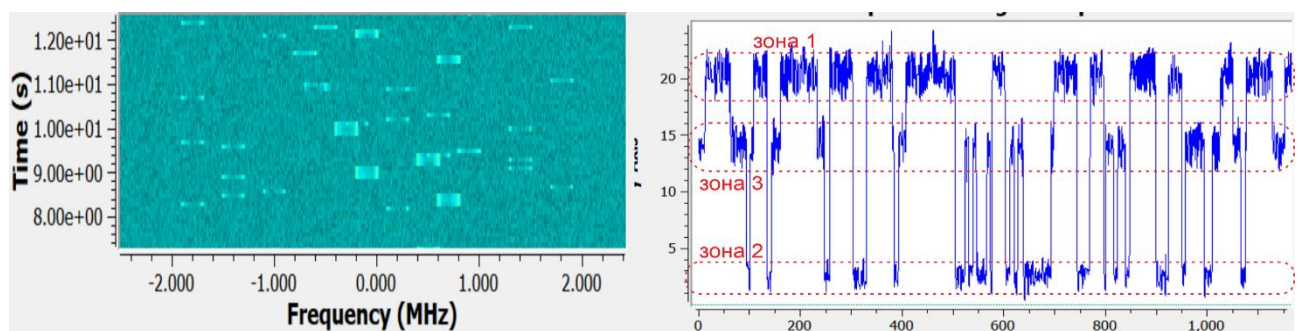


Рис. 5. Спектрограма двох ППРЧ сигналів з заповненням 50% (ліворуч) та вихідний сигнал амплітудного детектора (праворуч)

На графіку вихідного сигналу амплітудного детектора з'являється характерна область «зона 3», що відповідає амплітуді другого ППРЧ сигналу і значна кількість спрацювань детектора на інших амплітудах, коли активні канали передачі двох сигналів накладаються – детектор не може коректно визначити частоту носія за допомогою кореляційного аналізу, що ускладнює подальшу обробку і селекцію окремих сигналів, оскільки вже неможливо використати просту фільтрацію. Також неможливо розрізнити окремі джерела сигналів і реалізувати амплітудну селекцію з метою відстежування окремих джерел випромінювання у часі. При наявності більшої кількості передавачів або потужного джерела завад ситуація надалі погіршується.

Якщо застосувати запропонований підхід з накопиченою у часі гістограмою амплітудних відліків подальший аналіз спрощується. Розглянемо гістограми приведених вище випадків.

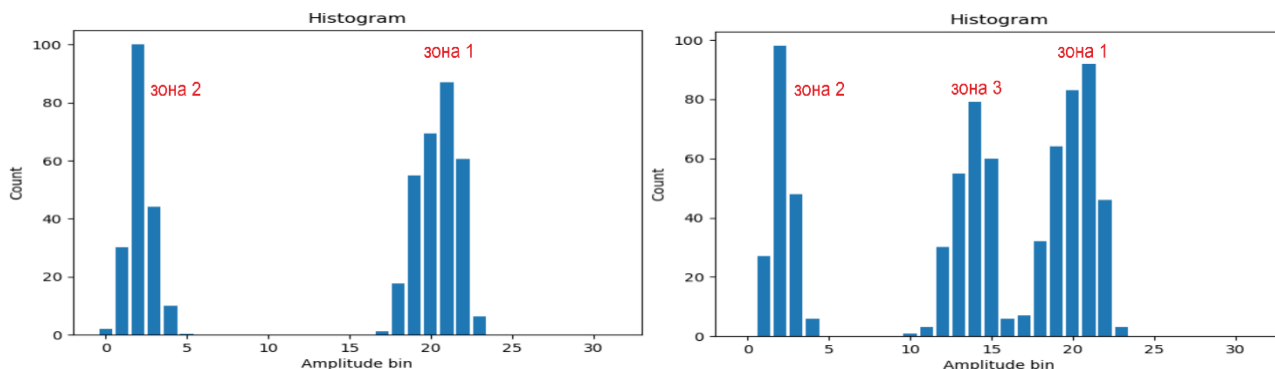


Рис. 6. Гістограми амплітудного розподілу для випадку 1 (ліворуч) та випадку 2 (праворуч)

На наведених гістограмах для випадків 1 (Рис. 6, ліворуч) та 2 (Рис. 6, праворуч) чітко спостерігаються зони концентрації миттєвих значень вихідного сигналу амплітудного детектора, на гістограмах підписані зони, що відповідають графікам на Рис. 4 та Рис. 5. Застосувавши підхід, який вже використовується у блоці обробки сигналу після кореляційного аналізу – обчислення координат локальних максимумів, можна отримати дані про амплітуду кожного окремого сигналу з потенційним автоматичним стеженням за сигналами, що виділяються на фоні шуму за амплітудною ознакою. Фільтрація шумової компоненти можлива за допомогою простого порогового фільтру. При переміщенні джерел випромінювання у просторі – у дальній зоні з відносно невисокою швидкістю відносно спостерігача, амплітуда сигналів їх передатчиків буде поступово змінюватися через наближення чи віддалення від приймача, або, якщо переміщення відбувається у куті азимуту, через вплив діаграми спрямованості приймальної антени.

Наступним кроком оптимізації є рефакторинг реєстру накопичення вихідних відліків з метою заміни FIFO буферу, що має довжину $n \cdot T_n$, де n – кількість сигналів, що відслідковується, T_n – період накопичення у відліках, на масив накопичених амплітудних значень. Така заміна дасть можливість уникнути необхідності додаткового циклу проходу по реєстру з підрахунком кількості однакових значень, з занесенням їх в тимчасовий масив для подальшого аналізу на локальні максимуми. Пропонується замінити послідовний реєстр накопичення на цілочисельний масив розмірністю A [BOa], де кожен елемент $A[i]$ масиву – це кількість відліків амплітудою i BOa. Таким чином зсув всього реєстру замінюється операцією інкременту одного елементу масиву $A[i]++$. Операція нормалізації гістограми лишається без змін. Така оптимізація дає значний вигравш у швидкодії за рахунок зменшення операційних витрат, що відповідає загальній цілі дослідження по розробці алгоритму амплітудної селекції з потенціалом подальшої його реалізації на базі доступних SDR платформ, що актуалізує задачу з точки зору фінансової доцільності.

У модифікованому алгоритмі для відстеження сигналів використовується, відповідно, не миттєве вихідне значення розробленого амплітудного детектору, а пікові значення (локальних екстремумів) кількості його відліків на накопиченій гістограмі амплітудних значень. Такий підхід дає можливість відслідковувати ППРЧ сигнали з малим заповненням частотного каналу та повільною зміною амплітуди на фоні шуму та сильних завад, використовуючи лише послідовність простих математичних операцій.

Результати дослідження

Експериментальним методом визначимо роздільну здатність розробленого алгоритму для двох ППРЧ сигналів з 2-FSK модуляцією і заповненням частотного каналу 50%, для чого поступово наближаємо значення амплітуди другого сигналу до першого. Момент, коли на гістограмі зникне графік з двома піками в області тестових сигналів буде ознакою втрати можливості відслідковувати окремо два сигнали. Експеримент показав стабільну роботу алгоритму при селекції сигналів з різницею амплітуд більше 2 BOa (Рис. 7, перший і другий графіки). При різниці в 2 BOa (Рис. 7, третій графік) алгоритм все ще здатний розрізнити два сигнали більшість часу, але через девіацію вхідного сигналу сумарна компонента з амплітудою 20 BOa інколи перевищує значення компонент з амплітудами 19 і 21 BOa, що призводить до зриву від-

слідкування двох сигналів незалежно. У такому випадку різниця між амплітудами даних сигналів складає 0.87 дБ.

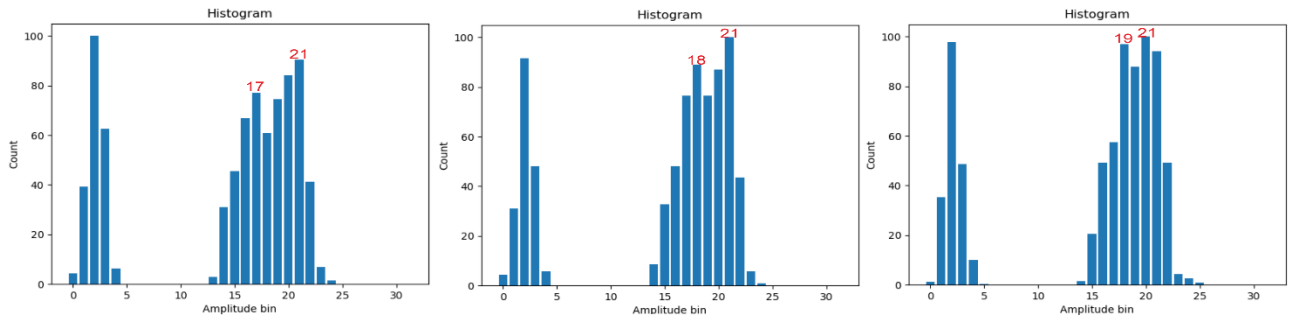


Рис. 7. Дослідження роздільної здатності алгоритму для двох сигналів

Щоб дослідити чутливість модифікованого алгоритму до рівня заповнення частотного каналу, подамо на вхід тестові сигнали ППРЧ, амплітудою 21 ВОа, з різним заповненням частотного каналу, від 90% до 10%, на фоні адитивного білого шуму (2 ВОа) і оцінимо кількість правильно визначених амплітудних значень на результуючій нормалізованій гістограмі, у порівнянні з шумовою компонентою, в залежності від заповнення ППРЧ. На Рис. 8 приведені результуючі гістограми для випадків 50%, 25% та 10% заповнення частотного каналу. У Таблиця 1 приводяться результати вимірювань для інших значень заповнення і наводяться теоретично очікувані рівні, які вираховуються за формулою:

$$L_T = \begin{cases} \frac{D}{100 - D} \cdot 100, & \text{для } D < 50\% \\ 100, & \text{для } D \geq 50\% \end{cases}$$

де D – заповнення частотного каналу ППРЧ сигналу, у відсотках.

Таблиця 1

Результати вимірювань 1

D, %	10	15	25	35	50	60	70	80	90
$L_{21 \text{ ВОа}}$	12	19	26	49	98	100	100	100	100
$L_{3 \text{ ВОа}}$	100	100	100	100	100	61	40	24	9
L_T	11	18	33	54	100	100	100	100	100
$ L_{21 \text{ ВОа}} - L_T $	1	1	7	5	2	0	0	0	0

Враховуючи незначні девіації амплітудних компонент на нормалізованій гістограмі протягом часу симуляції, правильно визначений тестовий сигнал з амплітудою 21 ВОа має значення близькі до теоретичних для всіх рівнів в діапазоні, що досліджується. Отримані результати дозволяють стверджувати, що реальна чутливість модифікованого алгоритму до сигналів ППРЧ з різним рівнем заповнення частотного каналу близька до теоретично розрахованих значень.

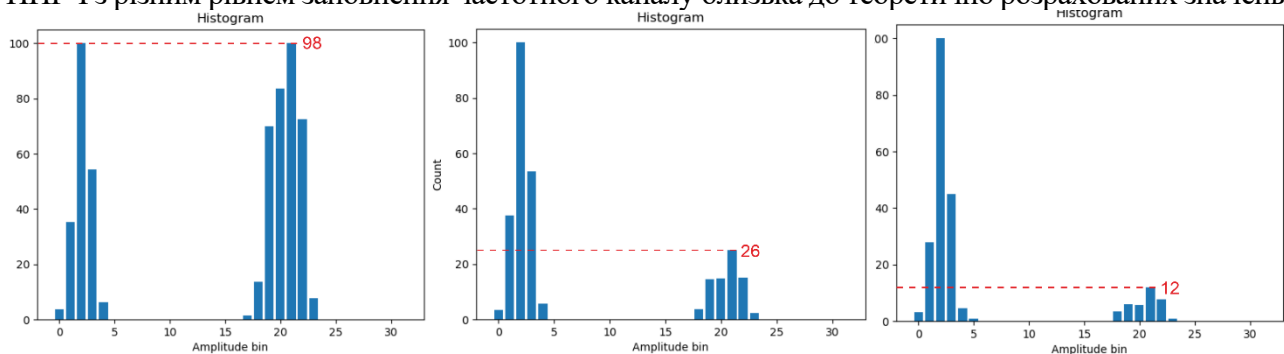


Рис. 8. Дослідження чутливості модифікованого алгоритму від заповнення частотного каналу ППРЧ (50%, 25% і 10%, зліва направо)

Для дослідження динамічного діапазону модифікованого алгоритму подамо на вхід тестові ППРЧ сигнали з різною амплітудою, в діапазоні 5-30 ВОа. Заповнення частотного каналу 50% для всіх випадків, тому теоретично досягне значення корисної компоненти на результую-

чий гістограмі 100 одиниць. На Рис. 9 наведено гістограми для тестових сигналів на краях діапазону, що досліджується, з амплітудами 5, 10 та 25 ВОа, інші значення наводяться у Таблиця 2

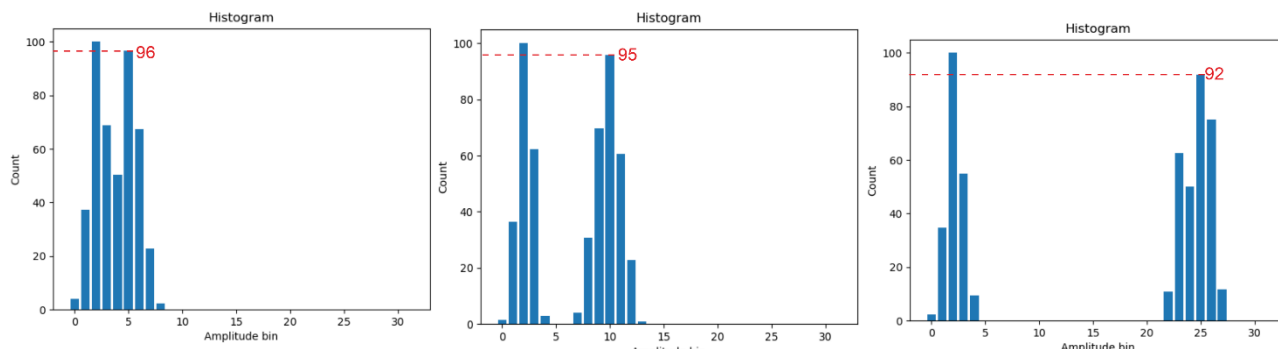


Рис. 9. Дослідження динамічного діапазону модифікованого алгоритму (тестові сигнали 5, 10 і 25 ВОа, зліва направо)

Таблиця 2

Результати вимірювань 2

A, ВОа	5	7	10	15	20	22	25	27	30
L_A	96	94	95	96	96	91	92	94	96
$ L_A - L_T $	4	6	5	4	4	9	8	6	4

Враховуючи незначні девіації амплітудних компонент на нормалізованій гістограмі протягом часу симуляції, рівень правильно визначених тестових сигналів має значення близькі до теоретично очікуваних на всьому діапазоні амплітуд, що досліджувався. Отримані результати дозволяють стверджувати, що реальний динамічний діапазон модифікованого алгоритму здатний відслідковувати ППРЧ сигнали у широкому діапазоні амплітуд, не менше 20дБ, без значного падіння параметрів.

Висновки

У роботі запропоновано і досліджено модифікований амплітудний метод виявлення ППРЧ сигналів, здатний працювати з різним рівнем заповнення частотного каналу. Основні результати моделювання підтверджують такі властивості алгоритму. Алгоритм коректно відокремлює два ППРЧ сигнали з різницею амплітуд понад 2 відносні одиниці ($\approx 0,87$ дБ), що дозволяє здійснювати амплітудну селекцію навіть у випадках часткового перекриття каналів. Встановлено, що метод зберігає здатність правильно визначати амплітуду сигналів у діапазоні заповнення від 90% до 15%. При заповненні нижче 15% ймовірність коректного виявлення суттєво зменшується, однак результати залишаються близькими до теоретично очікуваних. Алгоритм забезпечує стабільне відслідковування сигналів в амплітудному діапазоні не менше, ніж 20 дБ (від 5 до 30 ВОа), без значного погіршення точності визначення параметрів. Таким чином, модифікований метод довів працездатність для задач виявлення та локації ППРЧ сигналів у широкому діапазоні вхідних параметрів, зокрема при частковому заповненні каналу, що наближує його застосування до реальних умов роботи систем зв'язку та радіомоніторингу.

Внесок авторів

Ігор КОВАЛЕНКО – аналіз джерел, підготовка теоретичних основ дослідження, концептуалізація, розробка програмного забезпечення та проведення дослідження; Андрій МОВЧАНЮК – методика дослідження, аналіз та інтерпретація результатів.

Декларація про штучний інтелект

Автор не використовував штучний інтелект при створенні матеріалів статті.

Конфлікт інтересів

Автор підтверджує відсутність конфлікту інтересів та зазначає, що в процесі підготовки цієї роботи не було жодних комерційних, фінансових або інших зв'язків, які могли б вплинути на результати дослідження або їх трактування. Дослідження виконано з дотриманням принципів академічної доброчесності, етичних стандартів наукової діяльності та редакційної політики щодо запобігання конфлікту інтересів.

Список використаної літератури

1. Коваленко, І. Л., Мовчанюк, А. В. (2025). Непараметричний амплітудний метод виявлення сигналів з псевдовипадковим перелаштуванням робочої частоти з низькими обчислювальними витратами. *Вісті вищих навчальних закладів. Радіоелектроніка*. <https://doi.org/10.20535/S0021347024090012>
2. Igor Kovalenko, Andriy Movchaniuk (2025). Development of a parametric synthesizer for frequencyhopping spread spectrum signals with specified characteristics. XIX International Scientific Conference "Modern Challenges in Telecommunications" MCT-2025. Conference proceedings. Kyiv. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2025 – p. 390.
3. Коваленко І. Л.; Мовчанюк А. В. Розробка непараметричного амплітудного методу виявлення сигналів з псевдовипадковим перелаштування робочої частоти з низькими обчислювальними витратами. XIII-th International scientific and technical conference «Radioengineering Problems, Signals, Devices and Systems». Kyiv, November, 27 – 28, 2024: conference proceedings — Kyiv: 2024.
4. Subhi, W., & Jabir, S. Modulation and Frequency Estimation of FHSS Signal in the Presence of Interference Environments., 2008, Nahrain University <https://www.researchgate.net/profile/Jabir>
5. J. Ye et al., "A New Frequency Hopping Signal Detection of Civil UAV Based on Improved K-Means Clustering Algorithm," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 53190-53204, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3070491.
6. D. Mototolea, R. Youssef, E. Radoi and I. Nicolaescu, "Non-Cooperative Low-Complexity Detection Approach for FHSS-GFSK Drone Control Signals," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 401-412, 2020, doi: 10.1109/OJCOMS.2020.2984312.

I. Kovalenko, A. Movchaniuk

**MODIFIED AMPLITUDE METHOD FOR DETECTING FREQUENCY-HOPPING
SPREAD SPECTRUM SIGNALS MODULATION WITH A LOW
COMPUTATIONAL COST**

A modified amplitude-based method for detecting frequency-hopping spread spectrum (FHSS) signals is presented and evaluated using numerical simulations in the GNU Radio Companion environment. The proposed modification addresses a key limitation of the previously developed non-parametric amplitude method, namely its reduced performance when processing FHSS signals with partial channel occupancy, which is a common characteristic of real-world emitters transmitting telemetry or low-rate control data. To enable controlled testing, an enhanced parametric FHSS signal synthesizer was developed, allowing independent adjustment of channel bandwidth, hopping rate, signal amplitude, and channel occupancy factor. The modified detection algorithm incorporates correlation-based frequency estimation followed by time-accumulated amplitude histogram analysis, enabling stable detection in the presence of packet gaps and overlapping hopping patterns.

Simulation results demonstrate that the proposed method reliably separates multiple FHSS signals with overlapping frequency ranges when the amplitude difference exceeds approximately $<1\text{dB}$. The sensitivity analysis shows that correct amplitude estimation is maintained for channel

occupancy levels down to 15%, with deviations closely matching theoretical expectations. Furthermore, the algorithm exhibits stable operation across a dynamic input amplitude range of at least 20 dB without significant degradation in detection accuracy.

The use of simple mathematical operations and histogram-based accumulation ensures low computational complexity, making the method suitable for implementation on low-power SDR platforms. The obtained results confirm that the introduced modifications significantly improve the robustness of amplitude-based FHSS signal detection under realistic transmission conditions with intermittent activity.

Keywords: FHSS, signal detection, amplitude-based detection method, amplitude-based signal selection, histogram analysis, SDR.

Надійшла до редакції: 26.02.2026

Прийнята до друку: 21.04.2026

Опубліковано: 27.04.2026

© 2026 Коваленко І. Л., Мовчанюк А. В.

Цей матеріал ліцензовано за умовами CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>