

МОДИФІКАЦІЯ АМПЛІТУДНОГО МЕТОДУ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ З ПСЕВДОВИПАДКОВИМ ПЕРЕЛАШТУВАННЯМ ЧАСТОТИ

Коваленко І. Л.; Мовчанюк А. В., к.т.н., проф.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Радіотехнічний факультет, м. Київ, Україна

Актуальність дослідження

Системи зв'язку та радіомоніторингу все частіше використовують сигнали з розширеним спектром, зокрема сигнали з псевдовипадковим перелаштуванням робочої частоти (ППРЧ). Такі сигнали є основою сучасних каналів передачі телеметрії, керування безпілотними платформами, а також застосовуються у системах радіоелектронної боротьби. Попри поширеність ППРЧ, їхнє виявлення в умовах низького рівня сигналу, часткового заповнення частотного каналу або перекриття смуг декількох випромінювачів залишається складною задачею.

Раніше запропонований непараметричний амплітудний метод показав високу ефективність у задачах амплітудної селекції та виявлення ППРЧ-сигналів. Проте проведені експерименти продемонстрували низку обмежень, зокрема зниження точності при пропусках пакетів, накладанні частот-носіїв та низькому рівні заповнення каналів. Це зумовлює необхідність удосконалення алгоритму для наближення його роботи до реальних умов функціонування радіосистем.

Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є модифікація та розширення можливостей непараметричного амплітудного методу для забезпечення виявлення та амплітудної селекції ППРЧ сигналів із різним рівнем заповнення частотного каналу, включно з випадками перекриття каналів.

Основні завдання дослідження:

- удосконалити структуру алгоритму амплітудної селекції для роботи в умовах неповного заповнення частотного каналу
- забезпечити розрізнення декількох ППРЧ сигналів за амплітудною ознакою навіть при частковому накладанні їх частотних смуг;
- інтегрувати механізм накопичення та аналізу гістограм амплітуд частотних відліків;
- зберегти низькі обчислювальні витрати, характерні для попередньої версії методу.

Методологія

Для дослідження модифікованого алгоритму було розроблено вдосконалений параметричний синтезатор ППРЧ сигналів у середовищі GNU Radio Companion (GRC). Синтезатор генерує сигнали з різними параметрами: швидкістю перемикавання каналів, шириною смуги, рівнем заповнення частотного каналу та амплітудою. Додатково реалізовано блок пропуску

пакетів, що дозволяє контролювати заповнення каналу в діапазоні (10–100)%.

Вхідні тестові сигнали формувалися шляхом змішування декількох ППРЧ сигналів різних амплітуд з білим шумом та стаціонарними завадами. Алгоритм обробки включав:

- попереднє перетворення у спектральну область;
- фільтрацію та нормалізацію сигналів;
- кореляційний аналіз із прямокутною віконною функцією;
- пошук локальних максимумів кореляції;
- побудову та накопичення гістограм амплітуд.

Було оптимізовано регістр накопичення шляхом заміни FIFO-буфера на масив лічильників амплітудних відліків, що значно зменшило обчислювальні витрати та прискорило обробку.

Результати дослідження

1. *Роздільна здатність алгоритму:* Алгоритм здатен розрізняти два ППРЧ сигнали з різницею амплітуд понад 2 ВОа ($\approx 0,87$ дБ) навіть при перекритті їх робочих частотних діапазонів.

2. *Стійкість до змін заповнення частотного каналу:* Модифікований алгоритм стабільно виявляв сигнали при заповненні каналу від 90% до 15%. При заповненні нижче 15% ефективність очікувано знижувалася, але залишалась близькою до теоретичних значень.

3. *Чутливість до амплітуди сигналу:* Алгоритм продемонстрував коректне визначення амплітуди ППРЧ сигналів у діапазоні (5–30) ВОа, що відповідає динамічному діапазону понад 20 дБ.

4. *Робота в умовах завад та шуму:* Механізм гістограмного аналізу дозволив ефективно відокремлювати корисні компоненти навіть у присутності шуму та при пропусках пакетів ППРЧ.

Висновки

У роботі запропоновано модифікований амплітудний метод виявлення ППРЧ сигналів, що розширює можливості попередньої версії алгоритму та наближає його до реальних умов експлуатації систем зв'язку.

В ході дослідження підтверджено можливість коректного розрізнення двох сигналів із різницею амплітуд понад 2 ВОа, працездатність методу для сигналів із заповненням каналу від 90% до 15%, досягнуто стабільної роботи в динамічному діапазоні не менше 20 дБ, реалізовано підхід, що забезпечує низькі обчислювальні витрати та можливість роботи на SDR-платформах.

Результати демонструють перспективність методу для практичних задач радіомоніторингу та пеленгації ППРЧ сигналів у складних завадових умовах.

Перелік посилань

1. Коваленко, І. Л., Мовчанюк, А. В. (2025). Непараметричний амплітудний метод виявлення сигналів з псевдовипадковим перелаштуванням робочої частоти з низькими обчислювальними витратами. *Вісті вищих учбових 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. 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-Aziz/publication/310604587_Modulation_and_Frequency_Estimation_of_FHSS_Signal_in_the_Presence_of_Interference_Environments/links/5833097108ae102f07365f7b/Modulation-and-Frequency-Estimation-of-FHSS-Signal-in-the-Presence-of-Interference-Environments.pdf

Анотація

У роботі досліджено модифікований амплітудний метод виявлення ППРЧ сигналів, здатний коректно працювати при різному рівні заповнення частотного каналу та в умовах перекриття смуг кількох випромінювачів. Запропоновано підхід на основі гістограмного аналізу амплітуд, що дозволяє здійснювати амплітудну селекцію та відстеження сигналів у широкому діапазоні параметрів. Результати моделювання підтвердили високу селективність та низькі обчислювальні витрати алгоритму, що забезпечує його придатність для реалізації на SDR-платформах малої потужності.

Ключові слова: ППРЧ, виявлення сигналів, амплітудна селекція, SDR, гістограмний аналіз.

Abstract

A modified amplitude-based method for detecting FHSS signals is presented. The approach incorporates histogram analysis to improve signal separation under partial channel occupancy and overlapping frequency bands. Simulation results demonstrate the method's robustness across a wide range of amplitudes and occupancy ratios, while maintaining low computational cost suitable for low-power SDR platforms.

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