

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra30.02.109>
УДК 621.396.2, 621.396.6

**А.В. Варавін, Г.П. Єрмак, Д.П. Кудрявцев, О.С. Васильєв,
М.В. Балабан, С.С. Мельник, В.М. Желтов, О.В. Фатєєв**

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України
вул. Акад. Проскури, 12, м. Харків, 61085, Україна
E-mail: ermak.gennadiy@gmail.com

ЗАВАДОЗАХИЩЕНА СИСТЕМА ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ ПЕРЕДАЧІ ЦИФРОВИХ ДАНИХ НА БАЗІ БАГАТОКАНАЛЬНОГО КОРЕЛОМЕТРА Частина 2. РОЗРОБКА ПРИЙМАЧА-ПЕРЕДАВАЧА КОРЕЛЯЦІЙНОГО ТИПУ НА ОСНОВІ БАГАТОКАНАЛЬНОГО КОРЕЛОМЕТРА

Предмет і мета роботи. Метою другої частини роботи є розробка та експериментальне дослідження багатоканального корелометра для створення приймача-передавача кореляційного типу на базі програмно-обумовлених радіосистем; дослідження процесів формування, приймання та декодування сигналів, сформованих за технологією *direct sequence spread spectrum (DSSS)* — розширення спектра методом прямої послідовності для організації малопомітної передачі цифрової інформації та приймання відеозображень із використанням програмно-обумовлених радіосистем.

Методи та методологія. У роботі наведено результати розробки та програмна реалізація алгоритму роботи багатоканального корелометра для створення кореляційного приймача системи кореляційного зв'язку з розширеним спектром із використанням технології DSSS, експериментальне відпрацювання й апаратний контроль програмних рішень з приймання, перетворення, обробки та відображення даних.

Результати. Реалізовано алгоритм формування та декодування сигналів системи підшумового кореляційного зв'язку з використанням методу розширюючого сигналу для передачі даних шумоподібними сигналами на основі кодів Голда. Проведено модифікацію базового програмного забезпечення радіосистеми *bladeRFx40*, а саме розробку програмних модулів для створення приймача-передавача кореляційного типу для когерентного і некогерентного приймання з використанням одноканального та багатоканального корелометрів. Проведено експериментальне дослідження та відпрацювання основних програмних рішень з приймання, перетворення, обробки та відображення даних, оцінка й аналіз функціональних можливостей програмно-апаратних засобів для їхнього наступного синтезу в систему.

Висновки. Розробка та дослідження цифрових каналів зв'язку з використанням кодування сигналу методом розширення спектра прямою послідовністю та використанням кодів Голда дозволяє розробляти сучасні малогабаритні пристрої для організації завадозахищеного підшумового багатоканального зв'язку для передачі даних в сучасних умовах.

Ключові слова: система зв'язку, завадозахищений зв'язок, технологія DSSS, коди Голда, багатоканальний корелометр, SDR-приймач, цифровий потік.

Вступ

У першій частині роботи [1] проведено дослідження можливості використання завадозахищених і шифрованих каналів радіозв'язку, які

реалізовано на базі сучасних програмно-обумовлених радіосистем цифрового зв'язку, більш відомих як *software-defined radio (SDR)* [2, 3], і показано можливість їхнього ефективного використання в таких системах. Для забезпечення

Цитування: Варавін А.В., Єрмак Г.П., Кудрявцев Д.П., Васильєв О.С., Балабан М.В., Мельник С.С., Желтов В.М., Фатєєв О.В. Завадозахищена система зв'язку для передачі цифрових даних на базі багатоканального корелометра. Частина 2. Розробка приймача-передавача кореляційного типу на основі багатоканального корелометра. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2025. Т. 30. № 2. С. 109—119. <https://doi.org/10.15407/rpra30.02.109>

© Видавець ВД «Академпериодика» НАН України, 2025

 Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>)

завадозахищеної передачі запропоновано використовувати кореляційний підшумовий спосіб радіообміну. За таких умов, для кодування біт інформаційного повідомлення запропоновано використовувати псевдошумові сигнали великої довжини (сотні або навіть тисячі біт повідомлення в кодуєчій чіп-последовності). Було розроблено методику формування та декодування сигналу системи підшумового кореляційного зв'язку з розширеним спектром із використанням методу розширюючого сигналу. Відновлення вихідних даних із приймача («звуження спектра») було запропоновано здійснювати шляхом зіставлення отриманого сигналу та синхронізованої копії розширюючого сигналу, що отримано на базі бітової последовності «ключа». Проведено математичне моделювання процесів формування, випромінювання, приймання та декодування широкосмугових псевдовипадкових сигналів, сформованих за технологією *direct sequence spread spectrum* (DSSS) [4] із використанням кодів Голда.

Як було зазначено в [1], робота радіолінії підшумового зв'язку може відбуватися за двох різних умов приймання сигналу. Приймання сигналу в умовах, коли момент надходження корисного сигналу на вхід приймача та частота високочастотного заповнення корисного сигналу точно відомі, а також відомі всі параметри сигналу, називається когерентним. У разі коли частота високочастотного заповнення корисного сигналу достеменно невідома, тобто відома з можливою похибкою, що може бути спричиненою неузгодженістю частот гетеродина приймача і передавача, впливу доплерівського зсуву частоти, а також в умовах багатопроменового радіоприйому, режим роботи приймача називається некогерентним. У разі розузгодження частот гетеродинів і використання наддовгих чіпових последовностей слід розробляти методи кореляційної обробки сигналу з використанням декількох паралельно працюючих незалежних кореляторів, що дозволяє реалізувати концепцію цифрової фазової корекції та автоматизувати процес налаштування приймача системи задля зменшення кількості бітових похибок при декодуванні демодульованого сигналу проміжної частоти.

У другій частині роботи на етапі створення системи підшумового зв'язку (результати якого наведено в цій статті) з метою перевірки роботи

алгоритму формування та декодування широко-смугових сигналів, сформованих за технологією DSSS, було реалізовано приймально-передавальну систему кореляційного типу та досліджено когерентні режими роботи системи у випадку застосування одноканального й багатоканального корелометрів.

Для забезпечення когерентності кореляційного приймання було вжито таких заходів: як приймач і передавач використовувалися приймальний і передавальний тракти того самого SDR, антени приймального й передавального трактів розташовувалися на невеликій відстані та в ході експериментів не переміщувалися. Слід зазначити, що подібні умови роботи лінії радіозв'язку сильно спрощують вирішуване завдання, роблячи його далеким від практики.

Зважаючи на вищезазначене, на другому етапі розробки системи зв'язку (у третій частині роботи, що планується до публікації авторами в майбутньому) з метою покращення надійності радіосистеми проведено розробку некогерентного кореляційного приймача, що реалізує алгоритм цифрової фазової корекції для прийнятого з ефіру сигналу на базі багатоканального корелометра. За цих обставин кількість ідентичних паралельно працюючих каналів такого корелометра бажано обирати, виходячи з умов використання системи зв'язку, на практиці кількість паралельно працюючих каналів корелометра дорівнювала кількості чіпів шумоподібної чіп-последовності, яка використовується для кодування інформаційних біт повідомлення [1].

Для проведення досліджень щодо створення системи підшумового зв'язку було обрано одну із стандартних SDR — *bladeRFx40* [4]. У зв'язку з тим, що в цій SDR вже інтегровано програмовану логічну інтегральну схему типу *field-programmable gate array* (FPGA), привабливим є використання ресурсів FPGA для реалізації функцій корелометра. Архітектура FPGA дозволяє реалізувати вищеописані алгоритми з використанням паралельних (при необхідності асинхронних) обчислень. Тобто можна стверджувати, що при розробці пристрою для організації системи радіозв'язку між абонентами з використанням цифрових завадозахищених і шифрованих каналів на основі стандартної SDR необхідно запрограмувати належним чином FPGA.

Метою цієї роботи є експериментальне дослідження процесів формування, випромінювання, приймання та декодування сигналів методом DSSS, а також розробка й впровадження алгоритму роботи багатоканального корелометра для реалізації кореляційного приймача на базі FPGA системи SDR bladeRFx40, відпрацювання програмно-технічних рішень і розробка програмних модулів.

1. Загальні відомості про технологію SDR на прикладі радіосистеми bladeRFx40

Програмно-обумовлена радіосистема SDR-технологія радіозв'язку, в якій аналогову апаратуру радіозв'язку частково замінено програмно-керованим устаткуванням. Вона ґрунтується на використанні програмного забезпечення та обчислювальної потужності центрального процесора для виконання функцій, які раніше здійснювали апаратні компоненти.

У SDR весь процес налаштування параметрів і режимів роботи приймача-передавача, таких як діапазон робочих частот, вихідна потужність, тип модуляції та демодуляції сигналу, здійснюється програмно, що дозволяє гнучко налаштовувати радіозв'язок і використовувати його в різних стандартах і частотних діапазонах [5]. Надалі наведемо опис архітектури та схемотехніки, технічних характеристик і базового програмного забезпечення (ПЗ) (stock firmware) FPGA SDR bladeRFx40.

1.1. Опис архітектури та базові характеристики SDR bladeRFx40

На рис. 1 наведено зовнішній вигляд плати розробки (development board) bladeRFx40. Під час розробки радіосистеми bladeRF розробник дотримувався концепції відкритої платформи, що полягає в наданні можливості повного доступу до технічної документації та опису вихідного коду базового ПЗ, що складається з декількох мікропрограм, написаних мовою опису апаратури very high speed integrated circuits hardware description language (VHDL) [6] для FPGA bladeRFx40. Також у відповідності до цієї концепції радіосистема bladeRF дозволяє змінювати ПЗ мікроконтролера USB 3.0, що забезпечує високошвидкісний інтерфейс взаємодії FPGA SDR із хост-системою (host-system).

На рис. 2 наведено блок-схему архітектури SDR BladeRF, на якому зображено схематично три основні програмно-апаратні модулі та периферійні пристрої системи. До основних модулів системи відносяться радіочіп LimeMicro LMS6002D, FPGA Altera Cyclone IV і USB 3.0 мікроконтролер Cypress FX3. Також на платі системи присутні: генератор тактових імпульсів Si5338, ЦАП/АЦП, кристалічний генератор із керуванням напругою VCTCXO, допоміжні роз'єми для відладки (JTAGs), а також порти для підключення приймальної (RX) та передавальної (TX) антен, як зображено на рис. 1 та 2.

FPGA Altera Cyclone IV забезпечує інтерфейс між мікроконтролером Cypress FX3 і радіочас-

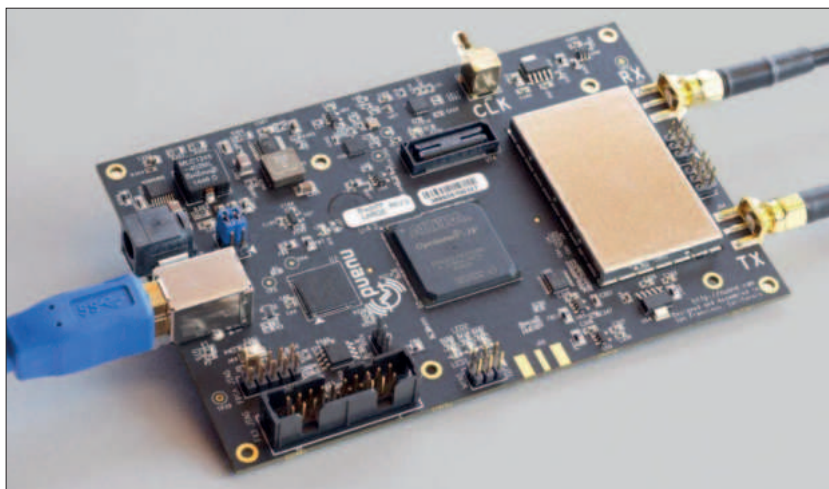


Рис. 1. Зовнішній вигляд SDR bladeRFx40

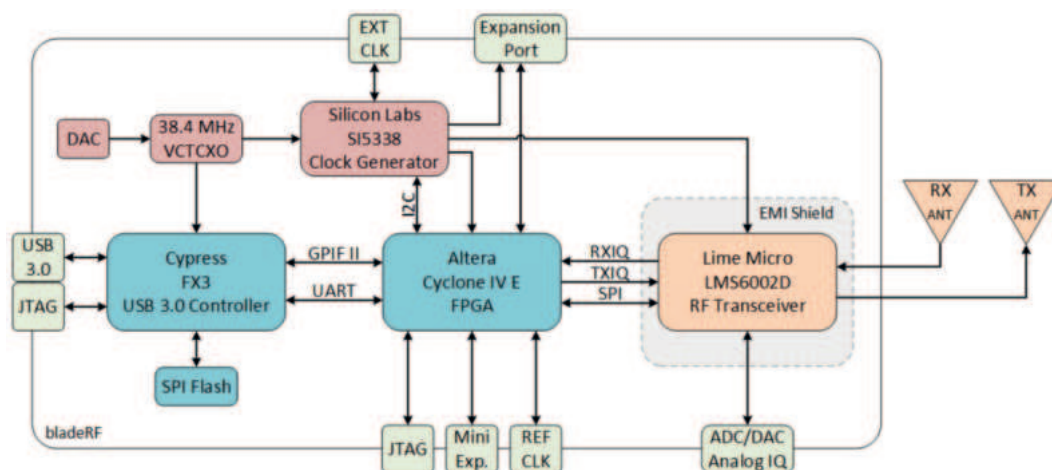


Рис. 2. Блок-схема архітектури SDR BladeRFx40

тотним приймачем LimeMicro LMS6002D. FPGA може виступати як прискорювач будь-якого обчислювального процесу та має можливість доступу до вбудованої пам'яті, вбудованих перемножувачів (18×18) і загальних логічних елементів.

Радіочіп LimeMicro LMS6002D є інтегрованим радіочастотним приймачем-передавачем, що здійснює частотне перетворення радіосигналу до сигналу проміжної частоти (та зворотне) із подальшим поділом сигналу на квадратурні складові (I/Q канали).

До базових можливостей SDR BladeRFx40 можна віднести такі:

- діапазон частот — від 300 МГц до 3.8 ГГц із можливістю розширення до високої та надвисокої смуги частот;
- можливість роботи у повнодуплексному або напівдуплексному режимах роботи;
- можливість програмованої зміни частотного каналу, частоти дискретизації, смуги пропускання та налаштувань підсилення;
- прямий доступ до контактів аналогових АЦП/ЦАП;
- зворотна сумісність з USB 2.0;
- довільні частоти дискретизації до 40 мільйонів сигналів за секунду;
- повний доступ до FPGA Altera Cyclone 4E, що розташована на платі та використовується як цифровий обробник сигналів;
- 12-розрядні I/Q вибірки;
- розширений зовнішній GPIO порт (general-purpose input/output port) з 32 роз'ємами вводу/виводу, JTAG роз'єми;

- висока ефективність, архітектура з низьким рівнем потужності шуму;
- калібрування в межах 1 Гц, від 38.4 МГц;
- вихідна потужність +6 дБм;
- діапазон робочих температур від 0 до 70 °C.

Радіосистема bladeRF підтримує стороннє програмне забезпечення, таке як: GnuRadio, SDR консолі, SDR #, MathWorks MATLAB & Simulink.

Існуючі драйвери bladeRF із відкритим кодом забезпечують підтримку GnuRadio, що забезпечує користувачу SDR bladeRF гнучкість роботи як радіочастотного модему, GSM і LTE пікосоти, GPS приймача, комбінації Bluetooth/Wi-Fi клієнта без необхідності будь-яких плат розширення.

1.2. Опис стандартного програмного забезпечення FPGA SDR BladeRF

Завдання, які вирішує FPGA Altera Cyclone IV з встановленим стандартним ПЗ (мікропрограмами), складається з наступного:

- пакетування та корекція квадратурних складових сигналу I/Q в проміжку між USB-контролером Cypress FX3 і приймачем LMS6002D;
- налаштування приймача через SPI інтерфейс командами, що отримуються від Cypress FX3;
- управління чипом генератора тактових імпульсів Si5338;
- управління ЦАП/АЦП VCTCXO;
- управління перемикачами радіочастотних ліній, які розташовано між LMS6002D і портами SMA RX/TX;
- сполучення з платами розширення.

Вихідний код стандартного ПЗ FPGA Altera Cyclone IV розроблено на мові опису апаратури VHDL і умовно поділяється виробником на код платформи та код IP-ядер. До складу софт-модулів (IP-ядер) входять IP-модулі, розроблені фірмою Nuand (розробником SDR BladeRF), IP-модулі з відкритим вихідним кодом.

Стандартне ПЗ складається з декількох файлів вищого рівня, що визначає порти, які підключено до зовнішніх контактів та біт-стрім файлів прошивки FPGA, які зберігаються в різних файлах для різних проектів. Також існують інші мікропрограми, що можуть виконувати обробку та декодування сигналів замість сортування квадатурних складових сигналу I/Q .

2. Розробка системи цифрового кореляційного зв'язку на базі SDR bladeRFx40

Розробку системи цифрового кореляційного зв'язку на базі SDR bladeRFx40, як зазначено вище, було поділено на декілька етапів. Перший етап, що є предметом цієї статті, присвячено створенню експериментального макету багатоканального когерентного кореляційного приймача. Для спрощення процесу розробки, тестування та налагодження, для забезпечення когерентності кореляційного приймання як приймач і передавач використовувалися приймальний і передавальний тракти того самого SDR, антени приймального і передавального трактів розташовувалися на невеликій (близько 2 метрів) відстані та під час експериментів не переміщувалися. Такі спрощення дозволили створити експериментальний макет системи, провести його тестування та налагодження складових апаратно-програмних модулів у лабораторних умовах. Також це дозволило протестувати та підтвердити основну концепцію створення системи цифрового кореляційного зв'язку й виявити необхідність її подальшого удосконалення та модернізації одноканального когерентного кореляційного приймача до багатоканального шляхом збільшення кількості інтегрованих в систему паралельно працюючих модулів кореляційної обробки сигналу.

З метою створення експериментального макету багатоканального когерентного кореляційного приймача на базі SDR BladeRFx40 у роботі було запропоновано провести модернізацію ПЗ

FPGA Altera Cyclone IV та інтегрувати в його ПЗ апаратно-програмну реалізацію алгоритму розрахунку кореляційного інтегралу, наведеного в роботі [1]. За такої умови передбачалося, що обробка вибірок I/Q -сигналів мала відбуватися як і раніше всередині FPGA, а ПЗ USB-контролера мало бути змінено для пакетування та передачі кореляційних даних додатково.

2.1. Принцип роботи

Далеко не завжди стандартне ПЗ FPGA SDR bladeRFx40 задовольняє всім вимогам кінцевого користувача. Досить часто в ПЗ необхідно додати/модернізувати програмний модуль цифрової обробки сигналу в приймальному або передавальному пристроях SDR [7] (наприклад, блоки, що виконують модуляцію/демодуляцію, фільтрацію, кореляцію сигналів тощо). Нами було запропоновано модернізувати ПЗ і додати такі апаратно-програмні модулі:

- модуль синхронізуючих міток;
- модуль обчислення кореляції;
- мультиплексор значень кореляційних коефіцієнтів;
- модуль сигналів збігу.

Вищезазначені модулі умовно поділялися на модулі вищого та нижчого рівнів. До модулів нижчого рівня відносилися модулі з виконанням програмного коду на FPGA SDR і контролері USB 3.0 Cypress FX3, а до модулів вищого рівня — модулі з програмним кодом, що виконувався на сторонньому обчислювачі (одноплатному або персональному комп'ютері, який було поєднано з SDR bladeRFx40 через інтерфейс передачі даних USB 3.0). Далі розглянемо запропоновану принципову схему роботи багатоканального когерентного кореляційного приймача на базі SDR BladeRFx40, що наведено на рис. 3.

Відразу після запуску (старту роботи приймача) модуль синхронізуючих міток формує нумеровані мітки по кожному тактовому відліку зі зсувом в один такт і запускає відповідні (за номером) окремі модулі обчислення кореляції. Тут слід зазначити, що для обробки I/Q каналів приймача можливо використовувати один із двох варіантів роботи:

- застосування одного модуля обчислення кореляції, що працює послідовно для I , а після для Q каналів (у разі, якщо обчислення кожного з ка-

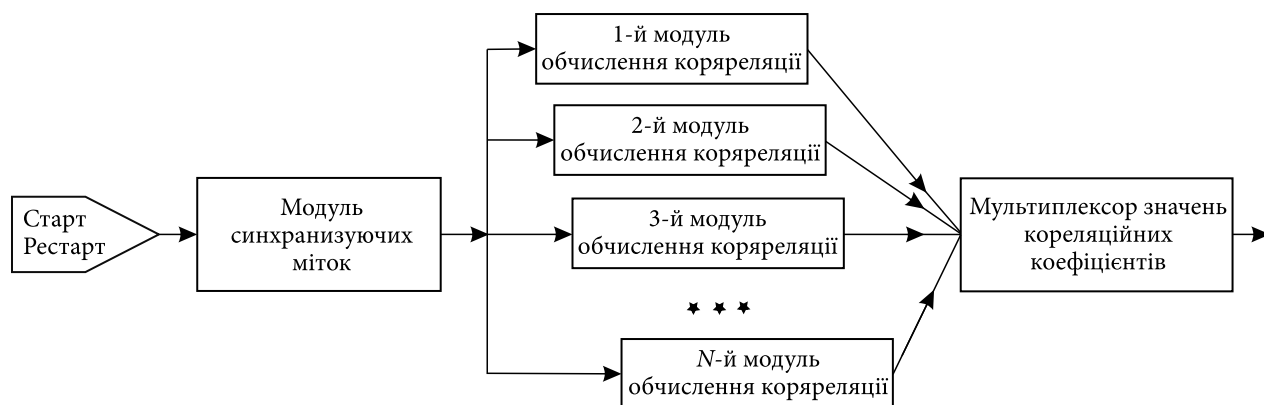


Рис. 3. Принципова схема роботи багатоканального корелятора

налів у часі займає менш ніж $N/2$ відліків тактового генератора, де змінною N тут і далі в тексті буде позначатися кількість чіпів у послідовності коду Голда);

- застосування двох паралельно працюючих модулів обчислення кореляції, один працює для I каналу, а інший для Q каналу незалежно.

Далі в статті для спрощення подачі матеріалу припустимо, що інформаційна складова сигналу присутня лише в I каналі, та будемо розглядати необхідність цифрової обробки лише цього каналу, тоді як кореляційну обробку Q каналу розглядати не будемо (при цьому припущенні це не потрібно).

Кожен модуль обчислення кореляції працює за алгоритмом, що розраховує коефіцієнт кореляції ітераційно, з кількістю ітерацій, яка дорівнює N . У процесі роботи кожного модуля прийнятий і оцифрований сигнал згортається з опорним сигналом-ключем і розраховується кореляційний коефіцієнт, величина якого характеризує ступень відповідності сигналів. Якщо в результаті обчислення (одним із модулів) значення кореляційного коефіцієнта виявляється вище порогового, то це свідчить, що виявлено високий збіг відповідної підвибірки відліків сигналу з опорним сигналом. Фактично це означає, що виявлено в часі підвибірку сигналу, який кодує один біт інформаційного повідомлення. Асинхронний (зі зсувом у часі в один такт) запуск N одиниць працюючих модулів обчислення кореляції, кожен з яких формує значення кореляційного коефіцієнта, дозволяє формувати N значень кореляційних коефіцієнтів, які після впорядкування формують набір значень взаємкореляційної функції.

Для впорядкування набору значень кореляційних коефіцієнтів використовується мультиплексор значень кореляційних коефіцієнтів — апаратно-програмний модуль-комутатор, який встановлює на виході (по кожному тактовому відліку) значення кореляційного коефіцієнта, що розраховано відповідним модулем обчислення кореляції.

Модуль сигналів збігу виконує операцію логічного АБО, а саме, якщо в результаті роботи хоча б одного модуля обчислення кореляції розрахований кореляційний коефіцієнт був вище за порогове значення (тобто хоча б один модуль обчислення кореляції виявив ділянку сигналу з високим ступенем подібності сигналу-ключа), то модуль сигналів збігу встановлює одинбітний сигнал високого логічного рівня на виході. Це сигналізує про прийняття пристроєм одного біта інформаційного повідомлення й може бути використано як вхідний сигнал для модулів/пристроїв верхнього рівня, сполучених із пристроєм, який розробляється (наприклад, для програмних модулів, що формують/декодуєть бітовий потік в інформаційне повідомлення та обробляють його).

Додатковий та більш детальний опис і принципи роботи зазначених модулів нижчого й вищого рівнів наведено нижче.

2.2. Модуль синхронізуючих міток

Модуль синхронізуючих міток запускає окремі модулі розрахунку кореляції з заданим запізненням і «диригує» їхньою роботою та синхронізує з модулем верхнього рівня. При першому запуску (відразу після рестарту) даний модуль формує

стартові мітки по кожному тактовому сигналу зі зсувом у один такт відповідно до діаграми, наведеної на рис. 4. Сформовані таким чином стартові мітки залишаються незмінними протягом усього циклу роботи багатоканального корелометра, тобто до наступного рестарту приймача.

2.3. Модуль обчислення кореляції

Модуль обчислення кореляції виконує розрахунок значень коефіцієнта кореляції прийнятого сигналу з опорним сигналом-ключем, який зберігається в пам'яті модуля. Кількість ітерацій алгоритму розрахунку коефіцієнта кореляції дорівнює N -кількості відліків в коді Голда. Розрахунок кореляційного коефіцієнта проводиться за наступної формулою (що є дискретним аналогом кореляційного інтеграла):

$$Korr_coeff = K_{norm} \sum_{i=1}^N (Sug_i * Key_i), \quad (1)$$

де Sug_i — значення i -го елементу послідовності оцифрованого сигналу (з урахуванням знака); Key_i — значення i -го елементу сигналу-ключа; K_{norm} — деякий коефіцієнт нормування, що використовується для обмеження абсолютного значення коефіцієнта кореляції з метою непереповнення буфера пам'яті модуля та який підбирають, виходячи з довжини коду Голда N і бітовості буфера модуля обчислення кореляції. Для врахування знаку відліків прийнятого сигналу використовувалось перенормування прийнятого сигналу до знакового 16-бітового. Відліки сигналу-ключа зберігалися в масиві пам'яті модуля у вигляді знакових 16-бітових величин. Після закінчення циклу роботи модуля розрахунку кореляції значення кореляційного коефіцієнта, розрахованого з використанням виразу (1), обнулялось, і робота модуля починалась спочатку.

2.4. Мультиплексор значень кореляційних коефіцієнтів

Мультиплексор значень кореляційних коефіцієнтів встановлює по кожному тактовому відліку на виході значення кореляційних коефіцієнтів, отриманих у результаті роботи різних модулів розрахунку кореляції. Принцип роботи мультиплексора пояснює діаграма на рис. 5.

На перших $N - 1$ відліках вихідне значення модуля вважається невизначеним. На N такті (від-

ліку) на вихід модуля встановлюється значення першого кореляційного коефіцієнта, що отримано в результаті роботи першого модуля обчислення кореляції. На $N + 1$ такті на вихідне значення дорівнює другому кореляційному коефіцієнту, що отримано в результаті роботи другого модуля обчислення кореляції і т. д. Нарешті, на $2 * N$ такті на вихід модуля встановлюється значення кореляційного коефіцієнта, що отримано в результаті роботи останнього модуля обчислення кореляції. Після цього цикл роботи мультиплексора та всього пристрою в цілому повторюється (у залежності від наявності міток, що встановлено модулем синхронізуючих міток). Визначення черговості мультиплексування вхідних сигналів на загальний вихід модуля встановлюється в залежності від черговості наявних синхронізуючих міток.

3. Експериментальні дослідження багатоканального корелометра системи зв'язку

Для проведення експериментальних досліджень багатоканального корелометра, створеного на базі SDR bladeRFx40, нами було поставлено та вирішено такі завдання: створити стенд для налагодження роботи розробленого алгоритму розрахунку коефіцієнтів кореляції на базі багатоканального корелометра й тестування роботи апаратно-програмних модулів розробленої системи; отримати результат розрахунку функції кореляції прийнятого і опорного сигналів за результатами роботи розробленого багатоканального корелометра та розробленого ПЗ; продемонструвати можливість ідентифікації сигналу кодової чіп-послідовності в прийнятому сигналі в довільний момент часу.

Для тестування та налагодження роботи розробленого багатоканального корелометра використовувався тестовий стенд, схема й зовнішній вигляд якого зображено на рис. 6. До складу стенду входять:

- ПК із встановленим ПЗ, що конфігурує та керує роботою SDR bladeRFx40 і поєднаний з нею через інтерфейс передачі даних USB 3.0;
- плата SDR bladeRFx40 із додатково розробленою платою розширення, що встановлено на роз'єм зовнішнього порта («Expansion Header»);

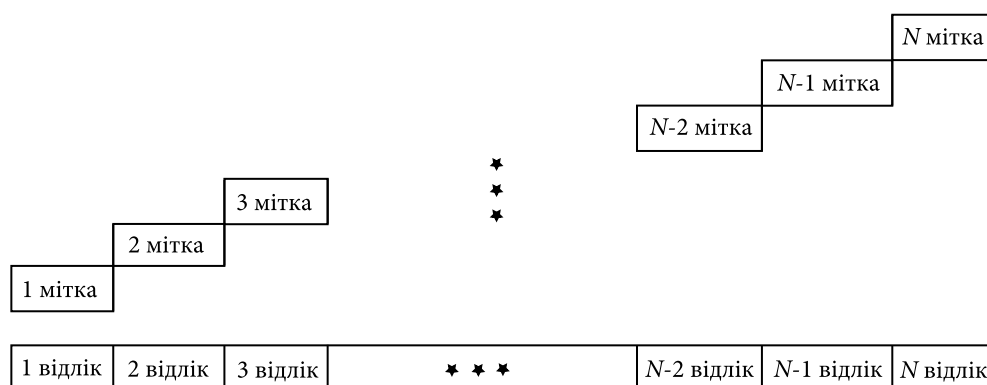


Рис. 4. Формування стартових синхронізуючих міток

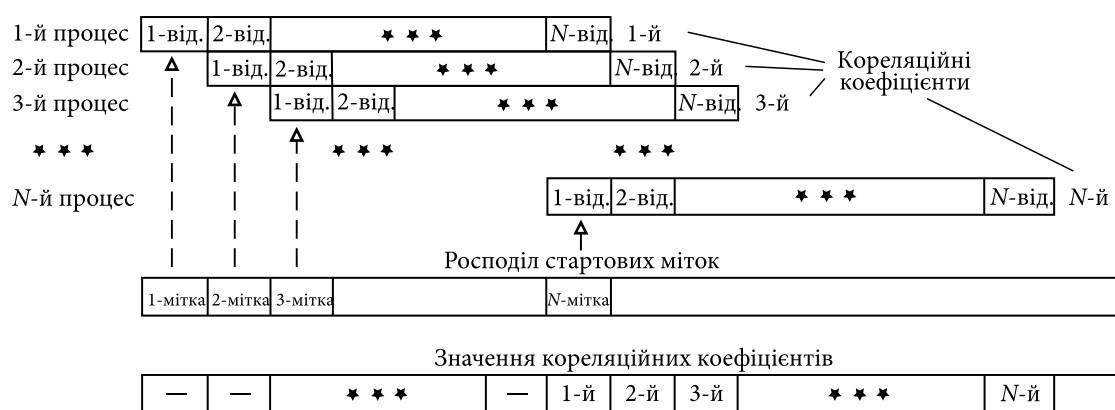


Рис. 5. Принцип роботи мультіплексора значень кореляційних коефіцієнтів

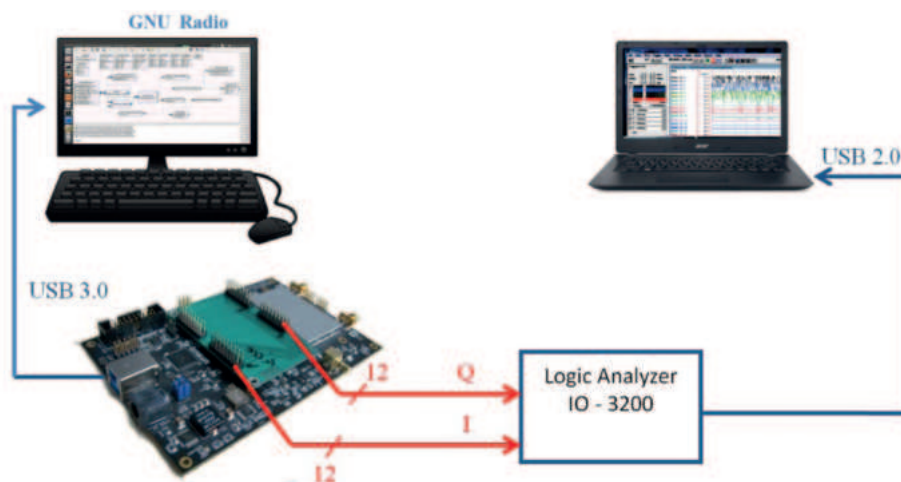


Рис. 6. Тестовий стенд для дослідження багатоканального корелометра на базі SDR bladeRFx40

• логічний аналізатор IO-3200 ANALYZER фірми Link Instruments, що підключено до SDR bladeRFx40 через плату-розширення, а також з'єднано з ноутбуком через інтерфейс передачі даних USB 2.0;

• цифровий осцилограф Siglent SDS 1053 DS, який при проведенні експерименту підключався опціонально паралельно логічному аналізатору й використовувався для візуалізації та уточнення форми сигналу проміжної частоти.

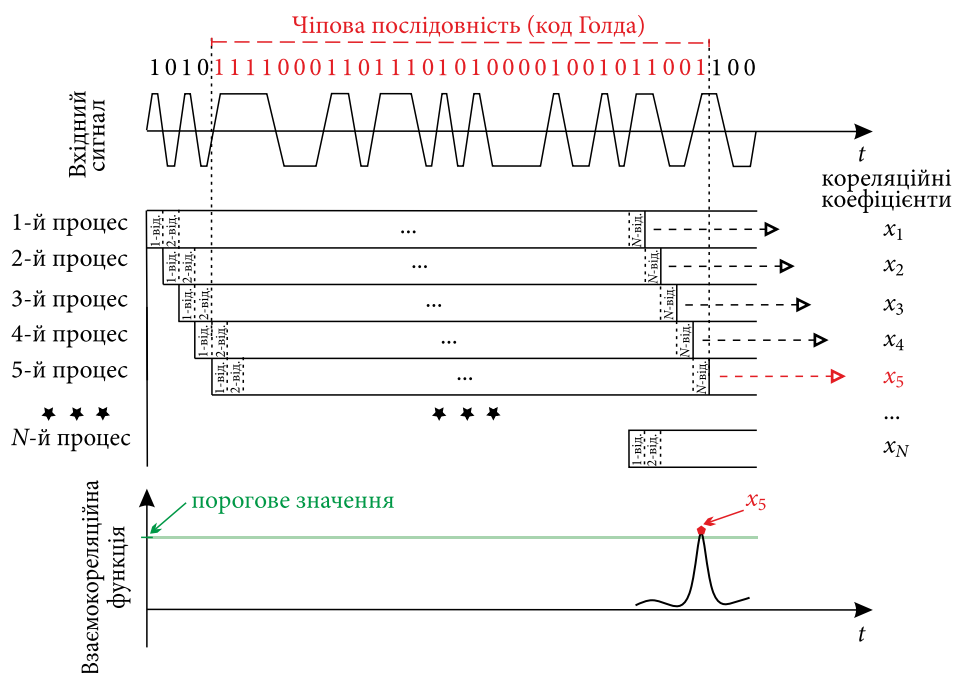


Рис. 7. Схематичне зображення принципу роботи багатоканального корелометра

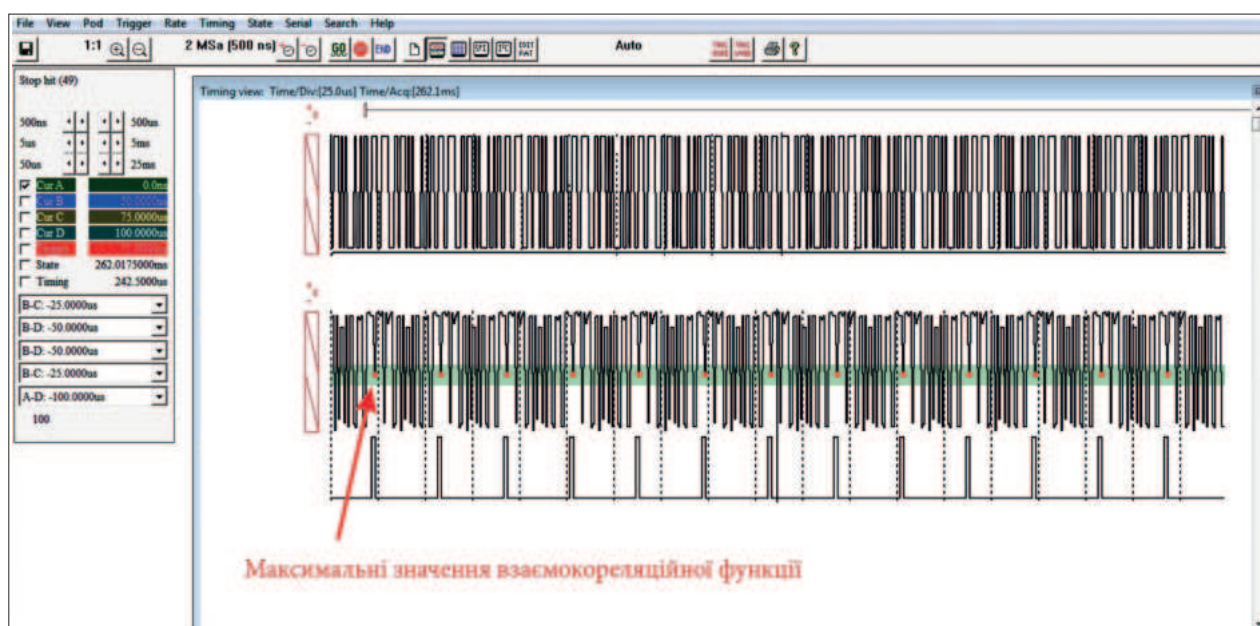


Рис. 8. Скріншот робочого вікна термінальної програми логічного аналізатора з графічним зображенням результату роботи одного з каналів багатоканального корелометра

Для забезпечення конфігурування та роботи програмно-обумовленої радіосистеми на персональному комп'ютері було встановлено GNU Radio — вільно розповсюджуване ПЗ, яке має великий набір програмних модулів і можливість легкого розширення інструментарію. Також GNU Radio дозволяє проводити моделювання (схе-

матично, на високому рівні абстракції) апаратно-програмних модулів і програмних одиниць, що суттєво спрощує розробку алгоритмів обробки сигналів.

Для візуалізації результатів дослідження та оцінки правильності роботи алгоритму розробленого багатоканального корелометра вико-

ристовувався ноутбук зі спеціальним ПЗ, що графічно відображає як самий прийнятий сигнал проміжної частоти, так і результат обчислення кореляційного коефіцієнта в часі (функції взаємної кореляції прийнятого сигналу з опорним) для заданого каналу корелометра.

У процесі налагодження роботи багатоканального корелометра використовувалася псевдошумова послідовність у вигляді коду Голда довжиною 31 відлік:

1111000110111010100001001011001.

На рис. 7 наведено схему роботи багатоканального корелометра. На схемі показано випадок появи в радіоефірі кодової послідовності, «синхронізованої в часі» з роботою п'ятого модуля розрахунку кореляції. Також проілюстровано процес формування послідовності кореляційних коефіцієнтів. Значення отриманих таким чином кореляційних коефіцієнтів послідовно відповідають сукупності точок функції кореляції прийнятого і опорного сигналів.

Результат роботи багатоканального корелометра графічно зображено на рис. 8 у вигляді скріншоту робочого вікна термінальної програми логічного аналізатора. У вікні термінальної програми наведено три графіки, що візуалізують різні сигнали в часі, а саме:

1) сигнал проміжної частоти, який створено на базі декількох шумоподібних послідовностей (кодів Голда), що розподілено в часі (верхній графік на рисунку);

2) значення взаємкореляційної функції на виході модуля мультиплексора (графік посередині);

3) однобітовий сигнал високого логічного рівня, що знімався з виходу модуля сигналів збігу (нижній графік).

З наведених графіків видно, що в результаті обчислення значень кореляційних коефіцієнтів було виявлено збіги сигналу кожної шумоподібної послідовності в сигналі проміжної частоти з сигналом-ключем. При цьому сигнал високого

логічного рівня, що сигналізує про прийняття пристроєм одного біта інформаційного повідомлення, відрізнявся від нуля у відповідних тактових відліках.

Отже, в результаті роботи багатоканального корелометра було продемонстровано можливість ідентифікації сигналу кодової чіп-послідовності в прийнятому сигналі в довільний момент часу.

Висновки

У роботі розглянуто основні складові програмно-обумовленої радіосистеми SDR bladeRFx40, а також реалізовано алгоритм формування та декодування сигналів системи підшумового кореляційного зв'язку з використанням методу розширюючого сигналу для передачі даних шумоподібними сигналами на основі кодів Голда.

Проведено модифікацію базового (стандартного) програмного забезпечення FPGA радіосистеми SDR bladeRFx40, а саме розробку апаратно-програмних модулів для створення приймача-передавача кореляційного типу на базі багатоканального корелометра.

Розроблено стенд і проведено налагодження та тестування роботи алгоритму розрахунку коефіцієнтів кореляції прийнятого сигналу проміжної частоти із сигналом, сформованим на базі послідовності кода Голда, і тестування роботи апаратно-програмних модулів розробленої системи.

Проведено тестування роботи багатоканального корелометра з приймання, перетворення, обробки та відображення даних в умовах когерентного приймання сигналів. Експериментально зафіксовано спрацювання розроблених пристроїв по кожному випадку появи кодової чіп-послідовності в радіоефірі.

Розроблено та досліджено приймач-передавач кореляційного типу з використанням багатоканального корелометра для створення захищеної системи радіозв'язку на базі SDR. Результати дослідження режимів роботи такої системи буде наведено в третій частині роботи.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Варавін А.В., Єрмак Г.П., Кудрявцев Д.П., Васильєв О.С., Балабан М.В., Мельник С.С., Желтов В.М., Фатєєв О.В. Завадозахищена система зв'язку для передачі цифрових даних на базі багатоканального корелометра Ч. 1. Розробка алгоритму формування та декодування сигналу системи підшумового зв'язку. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2025. Т. 30, № 1. С. 11–23. DOI: 10.15407/rpra30.01.011

2. Proakis J.G., Salehi M. *Digital Communications*. 5th ed. McGraw-Hill, New York: 2008. 1150 p.
3. Dillinger M., Madani K., Alonistioti N. *Software Defined Radio: Architectures, Systems and Functions*. Wiley & Sons: 2003. 454 p.
4. Ipatov V.P. *Spread Spectrum and CDMA. Principles and Applications*. Wiley: 2004. 396 p.
5. Rami A., Dezfouli B. Software-defined Radios: Architecture, State-of-the-art, and Challenges. *Comput. Commun.* 2018. Vol. 128, Sept. P. 106–125. DOI: 10.1016/j.comcom.2018.07.012
6. 1076/INT-1991 – IEEE Standards Interpretations: IEEE Std 1076-1987, IEEE Standard VHDL Language Reference Manual. 1992. DOI: 10.1109/IEEESTD.1992.101084
7. Bard J., Kovarik V. *Software defined radio: the software communications architecture*. Wiley & Sons: 2007. 465 p.

Стаття надійшла 09.02.2025

REFERENCES

1. Varavin, A.V., Yermak, H.P., Kudryavtsev, D.P., Vasiliev, O.S., Balaban, M.V., Melnyk, S.S., Zheltov, V.M., Fateev, O.V., 2025. Interference-resistant communication system for digital data transmission based on a multi-channel correlator P. 1. Development of the signal formation and decoding algorithm of the sub-noise communication system. *Radio Phys. Radio Astron.*, **30**(1), pp. 11–23. DOI: 10.15407/rpra30.01.011
2. Proakis, J.G., Salehi, M., 2008. *Digital Communications*. 5th ed. McGraw-Hill, New York.
3. Dillinger, M., Madani, K., Alonistioti, N., 2003. *Software Defined Radio: Architectures, Systems and Functions*. Wiley & Sons.
4. Ipatov, V.P., 2004. *Spread Spectrum and CDMA. Principles and Applications*. Wiley.
5. Rami, A., Dezfouli, B., 2018. Software-defined Radios: Architecture, State-of-the-art, and Challenges. *Comput. Commun.*, **128**, Sept., pp. 106–125. DOI: 10.1016/j.comcom.2018.07.012
6. 1076/INT-1991 – IEEE Standards Interpretations: IEEE Std 1076-1987, IEEE Standard VHDL Language Reference Manual. 1992. DOI: 10.1109/IEEESTD.1992.101084
7. Bard, J., Kovarik, V., 2007. *Software defined radio: the software communications architecture*. Wiley & Sons.

Received 09.02.2025

A.V. Varavin, G.P. Ermak, D.P. Kudryavtsev,
O.S. Vasiliev, M.V. Balaban, S.S. Melnyk, V.M. Zheltov, O.V. Fateev
O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics NAS of Ukraine
12, Acad. Proskury St., Kharkiv, 61085, Ukraine

AN INTERFERENCE-IMMUNE COMMUNICATION SYSTEM FOR DIGITAL DATA TRANSMISSION BASED ON A MULTI-CHANNEL CORRELATOR Part 2. DEVELOPMENT OF A CORRELATION-TYPE TRANSCEIVER BASED ON A MULTI-CHANNEL CORRELATOR

Subject and Purpose. The objective of Part 2 of the work is the development and experimental study of a multichannel correlator for creating a correlation-type transceiver based on software-defined radio (SDR) systems. The signal formation, reception, and decoding due to direct sequence spread spectrum (DSSS) technology are studied for organizing discreet transmission of digital information and reception of video images using software-defined radio systems.

Methods and Methodology. The algorithm software for the multichannel correlator is designed to integrate with a correlation-type receiver in a spread-spectrum communication system that uses direct sequence spread spectrum technology. This includes testing and hardware checks for software solutions related to data reception, conversion, processing, and mapping.

Results. An algorithm for generating and decoding signals of a sub-noise correlation communication system has been implemented, using the spreading signal method for data transmission with noise-like Gold-code-based signals. The basic software of the bladeRFx40 radio system has been modified. Namely, software modules for the correlation-type transceiver have been developed for coherent and incoherent reception using single-channel and multi-channel correlators. The main software solutions for data reception, conversion, processing, and mapping have been experimentally studied and tested. The functional capabilities of the software and hardware to incorporate with the system have been assessed and analyzed.

Conclusions. The research and development of digital communication channels through signal coding by the direct sequence spread spectrum method and with Gold codes have shown the technical feasibility of advanced compact devices for organizing interference-immune sub-noise multi-channel communication for data transmission in contemporary contexts.

Keywords: communication system, interference-immune communication, DSSS technology, Gold codes, multi-channel correlator, SDR receiver, digital stream.