

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-79-20>

УДК 621.396.969.1

СЕМЕНКО Анатолій

Європейський університет

<https://orcid.org/0000-0002-7043-7801>

e-mail: [setel@ukr.net](mailto:setel@ukr.net)

БОЙКО Юлій

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0603-7827>

e-mail: [boiko\\_julius@ukr.net](mailto:boiko_julius@ukr.net)

ШПУР Ольга

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0001-8156-8017>

e-mail: [olha.m.shpur@lpnu.ua](mailto:olha.m.shpur@lpnu.ua)

## КОМПЛЕКСНА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНОЇ ПВП ГОЛДА І RAKE-ПРИЙМАЧІВ

При проектуванні телекомунікаційних систем важливим завданням є забезпечення мінімальної ймовірності бітової помилки приймання сигналу при даній потужності передавача. Для вирішення даної задачі прагнуть зменшити ширину смуги пропускання каналу аби зменшити рівень шумів, які неминуче надходять до каналу із зовнішнього середовища. В роботі запропонована і досліджена телекомунікаційна система (ТКС) з широкосмуговим сигналом, що передається в 2-х окремих антенних каналах. В системі здійснюється кодове розділення сигналів каналів з використанням модифікованої псевдовипадкової послідовності (ПВП) Голда і оптимальна обробка сигналів за допомогою RAKE-приймачів. При цьому досягається мінімальна ширина смуги пропускання каналу та максимальне відношення сигнал/шум.

Ключові слова: телекомунікаційна система, ймовірність бітової помилки, відношення сигнал/шум, псевдовипадкова послідовність, RAKE-приймач

SEMENKO Anatoliy

European University

BOIKO Juliy

Khmelnyskyi National University

SHPUR Olga

Lviv Polytechnic National University

## COMPREHENSIVE OPTIMIZATION OF TELECOMMUNICATION SYSTEM BASED ON MODIFIED PRS GOLD AND RAKE RECEIVERS

In designing telecommunication systems, the fundamental task is to ensure a low probability of bit error in signal reception at a given transmitter power. To solve this problem, they try to reduce the channel bandwidth in order to reduce the noise level that inevitably enters the channel from the external environment. In this paper, a telecommunication system (TS) with a wideband signal transmitted in 2 separate antenna channels is proposed and investigated. The system implements code division of channel signals using a modified pseudo-random sequence (PRS) of Gold and optimal signal processing using RAKE receivers. In this case, the minimum channel bandwidth and maximum signal-to-noise ratio are achieved. The main directions of optimization of the TCS based on the studied solutions are based on the formation of new modified Gold sequences with better correlation characteristics and a lower level of cross-correlation to improve the signal quality in communication systems. Quite promising is the approach that covers the development of algorithms for optimizing the operation of RAKE receivers, including adaptive tuning for working with various modified Gold sequences. The study of the efficiency of RAKE reception in combination with modified Gold sequences was carried out to reduce the negative impact of Multipath Propagation. A search for optimization of signal processing algorithms for RAKE receivers was carried out to reduce computational costs and ensure their effective application in real time. In order to synthesize optimal Gold sequences, cross-correlation plots are obtained showing how two realizations of the same Gold sequence (shifted by one element) interact with each other after they have been modulated using BPSK and QPSK. A RAKE receiver with BPSK type signals was simulated. The resulting graphs show signals with delays for each finger of the RAKE receiver, as well as the signal structure obtained as a result of processing the RAKE type receiver.

Keywords: telecommunication system, bit error rate, signal-to-noise ratio, pseudo-random sequence, RAKE receiver

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Функціонування сучасних телекомунікаційних систем пов'язане з численними викликами, такими як обмежена пропускна здатність, вплив інтерференції та зменшення якості сигналу через відбиття, а також явища коли сигнали, що накладаються один на одного можуть посилюватися чи гаситися в залежності від фазових відмінностей (англ. Multipath Propagation) і що в кінцевому рахунку може призводити до інтерференції за рахунок багатопроменевого поширення сигналів (БППС) [1]. Один з підходів до покращення ефективності таких систем полягає в застосуванні вдосконалених методів кодування та

прийому сигналів. В цьому контексті модифіковані послідовності Голда та RAKE-приймачі представляють собою перспективні технології для вирішення цих проблем [2].

Послідовності Голда, які є детермінованими ПВП [3-5], використовуються для покращення характеристик систем зв'язку, таких як покращення якості сигналу і зменшення впливу БППС. Модифікація класичних послідовностей Голда дозволяє підвищити їх ефективність у специфічних умовах застосування телекомунікаційних систем, адаптуючи їх до конкретних вимог системи. RAKE-приймачі є ефективним методом для боротьби з БППС в бездротових системах зв'язку. Вони дозволяють обробляти відбиті сигнали з різними затримками, що допомагає підвищити якість прийому сигналу. Оптимізація RAKE-приймачів у поєднанні з модифікованими послідовностями Голда може суттєво покращити продуктивність системи.

В цьому контексті можна виділити основні напрямки оптимізації ТКС на основі досліджуваних рішень. Зокрема, важливо сконцентруватись на розробці нових модифікованих послідовностей Голда, які мають кращі характеристики кореляції та менший рівень перехресної кореляції для покращення якості сигналу в системах зв'язку. Досить перспективним є підхід який охоплює розробку алгоритмів для оптимізації роботи RAKE-приймачів, що включають адаптивне налаштування для роботи з різними модифікованими послідовностями Голда і безперечно важливо провести вивчення ефективності RAKE-приймачів у поєднанні з модифікованими послідовностями Голда для зменшення негативного впливу БППС.

Стаття сконцентрована на описі запропонованої схеми ТКС у якій застосовуються підходи на основі використання модифікованих послідовностей Голда, а обробка сигналів реалізується RAKE-приймачами з метою комплексної оптимізації телекомунікаційної системи в умовах БППС.

### АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз методів предметної області досліджень [6, 7] показує, що модифіковані послідовності Голда і RAKE-приймачі можуть бути інтегровані в системи мобільного зв'язку, Wi-Fi, і супутникові системи для покращення їх продуктивності [8, 9]. В літературі [10-13] описано перспективні напрямки використання модифікованих послідовностей Голда для підвищення точності та надійності радіолокаційних систем. Окремі аспекти інтеграції RAKE-приймачів для покращення точності систем глобального позиціонування (GPS) в умовах БППС обговорюються в роботі [14]. В статті [15] автори описують методику застосування технології RARE як методу боротьби з багатопроменевістю в системах мобільного зв'язку. В статті [16] автори сконцентрувались на розгляді еволюції систем з кодовим розділенням каналів. Окремо досліджено принципи побудови та роботи RAKE-приймача, а також зміни, які вносять у приймач нові стандарти зв'язку.

Таким чином, аналіз літературних джерел відомих авторів дозволяє намитити певні тренди у подальших пошуках предметної області. Важливо розробити механізми синтезу алгоритмів для автоматизованої генерації та оптимізації модифікованих послідовностей Голда з урахуванням специфічних умов системи. Крім того, аналіз джерел дозволяє ставити питання пошуку засобів оптимізації алгоритмів обробки сигналів RAKE-приймачів для зменшення обчислювальних витрат та забезпечення їх ефективного застосування в реальному часі. Важливо, також, здійснити розробку сумісних інтерфейсів та протоколів для інтеграції модифікованих послідовностей Голда і RAKE-приймачів у вже існуючі системи без потреби значних змін у їх архітектурі. Реалізація таких надважливих задач неможлива без проведення комплексних тестів та моделювання для оцінки впливу нових технологій на існуючі системи та визначення оптимальних параметрів для їх спільної роботи. Таким чином, модифіковані послідовності Голда та RAKE-приймачі мають потенціал для значного покращення ТКС. Однак, для успішного впровадження цих технологій необхідно враховувати і вирішувати проблеми, пов'язані з їх реалізацією та інтеграцією в існуючі системи.

### Особливості формування та кроскореляції послідовностей Голда

Для візуалізації послідовностей Голда ми провели синтез та моделювання такої послідовності. В цьому моделюванні було використано лінійний зсувний регістр (ЛЗР) для генерації послідовностей Голда. По суті ЛЗР є цифровим генератором випадкових чисел, який використовує поліном для визначення послідовності виходів. В ЛЗР, бітовий регістр зсувається на одну позицію кожен раз коли генерується новий біт, а новий біт обчислюється як XOR (функція mod2) виходів деяких бітів регістру. В нашому дослідженні поліном визначає структуру ЛЗР і використовується для обчислення нового біту на основі поточного стану регістру. Тобто ми визначали поліном як масив коефіцієнтів, де коефіцієнти поліному є бітами (0 або 1).

Для генерації послідовності Голда був використаний поліном типу:  $x^5 + x^2 + 1$  який представлено масивом [1, 0, 0, 1, 1], а також поліном:  $x^5 + x^3 + x^2 + 1$  де в дослідженні ми отримали масив [1, 1, 0, 1, 1]. Причому ЛЗР містить регістр довжиною 5 бітів. Такі поліноми забезпечують специфічну структуру генерації послідовності Голда, де XOR виходи з обох ЛЗР утворюючи кінцеву послідовність яку за результатами моделювання представлено на рис. 1.

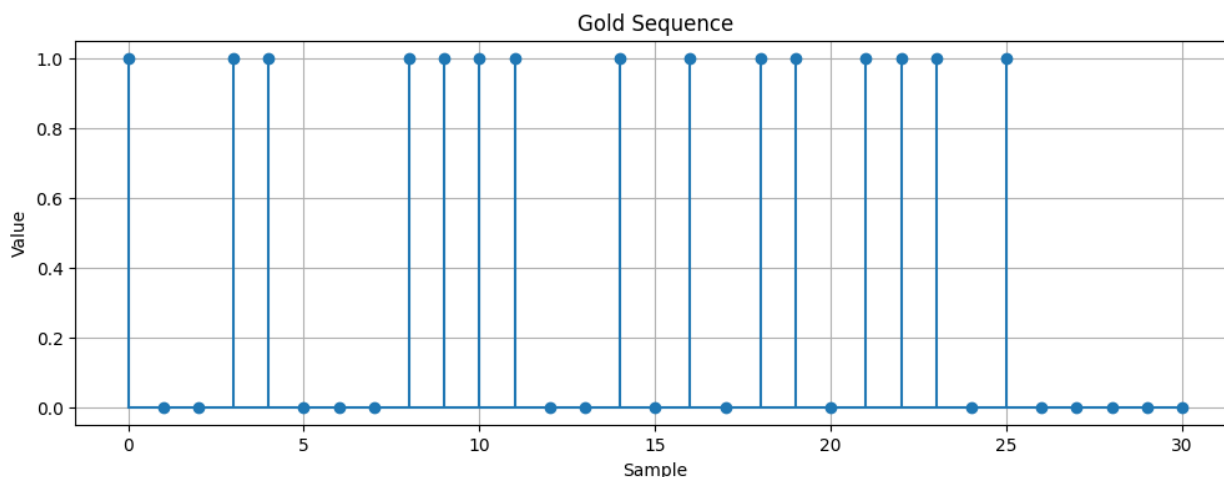


Рис.1. Згенерована послідовність Голда: Sample - це окреме значення або точка даних у послідовності (на графіку це відповідно до індексу вибірки і її значення (яке може бути або 0, або 1 для послідовності Голда))

З точки зору застосування послідовностей Голда у ТКС нас буде цікавити аспекти кроскореляції таких послідовностей. Зокрема ми отримали графіки кроскореляції які повинні показати, як дві реалізації однієї послідовності Голда (зсунутої на один елемент) взаємодіють між собою, після того як їх було модульовано за допомогою BPSK і QPSK (ФМ-2 і ФМ-4). Ми використовували сигнали фазової маніпуляції ФМ-2 та ФМ-4 при побудові схеми ТКС, рис. 2.

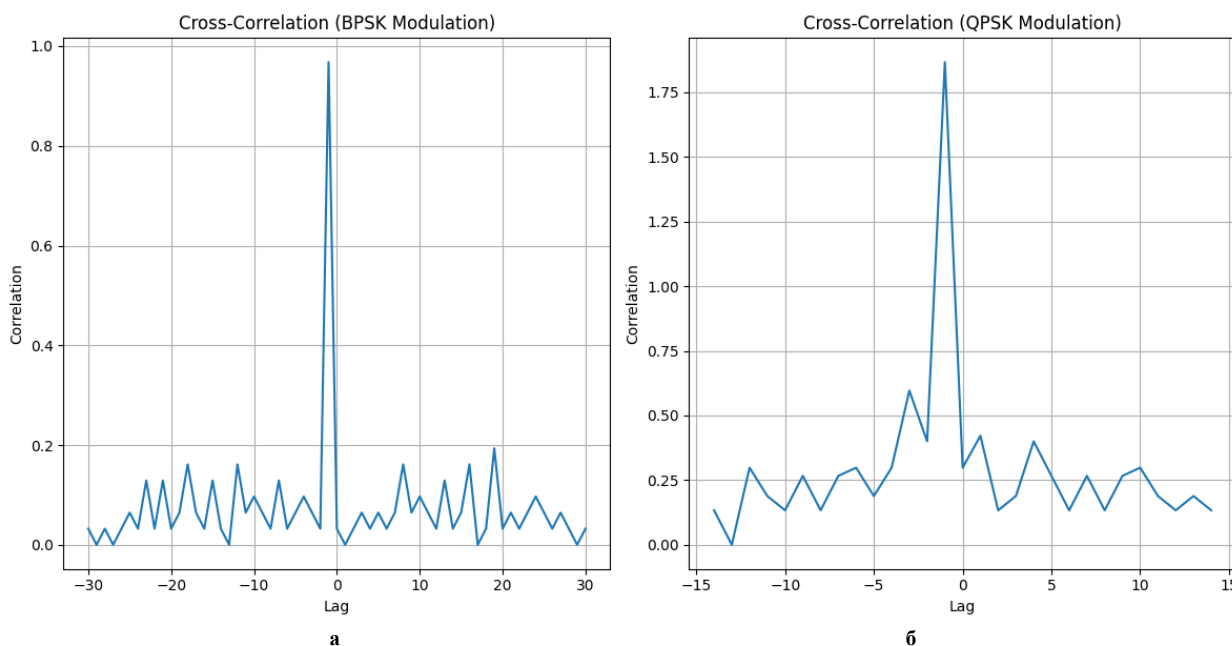


Рис.2. Згенеровані графіки кроскореляції які показують як дві реалізації однієї послідовності Голда (зсунутої на один елемент) взаємодіють між собою, після того як їх було модульовано за допомогою BPSK -а і QPSK -б (ФМ-2 і ФМ-4): Lag – зсув між двома послідовностями в часі або у просторі, який використовується для аналізу їхньої взаємозалежності

Аналіз отриманих графіків дозволяє зробити наступні висновки. Графіки показують амплітуду кроскореляційної функції для двох ФМ-2 та ФМ-4 модульованих послідовностей. Пік на графіку вказує на те, що ці послідовності дуже схожі або однакові на певному зсуві. В контексті кроскореляції, зсув означає на скільки елементів одна послідовність зсувається відносно іншої, щоб обчислити їх взаємну кореляцію. У випадку послідовностей Голда, кореляція звичайно має пік на центральному зсуві (при зсуві 0), що вказує на їх хороші автокореляційні властивості, а інші значення близькі до нуля. Відмітимо, що у випадку ФМ-4 (рис. 2 б) графік показує кроскореляцію для двох ФМ-4-модульованих послідовностей, де послідовність розбита на реальну та уявну частини. Подібно до ФМ-2, пік на графіку відповідає максимальній схожості послідовностей на певному зсуві. Через складнішу структуру ФМ-4 модульованих сигналів (реальна та уявна частини), кореляційна функція має більш складну форму, але центральний пік все ще вказує на схожість сигналів. За підсумками проведеного моделювання робимо висновок, що високі значення

кроскореляції на центральному зсуві (0) означають, що послідовності мають хороші автокореляційні властивості. Крім того, низькі значення кроскореляції на інших зсувах показують, що послідовності добре відокремлені одна від одної при будь-якому іншому зсуві, що є важливою властивістю для використання цих послідовностей в системах зв'язку для мінімізації взаємних завад. Таким чином отриманий результат підтверджує, що послідовності Голда мають хороші кореляційні властивості, що робить їх корисними для застосування в широкосмугових системах зв'язку і зокрема під час вирішення завдання комплексної оптимізації телекомунікаційної системи на основі модифікованої ПВП Голда і RAKE-приймачів які ми вирішуємо в представленому дослідженні.

### Розробка функціональної схеми ТКС із використанням модифікованої ПВП Голда і RAKE-приймачів

На рис. 3 наведена схема запропонованої ТКС.

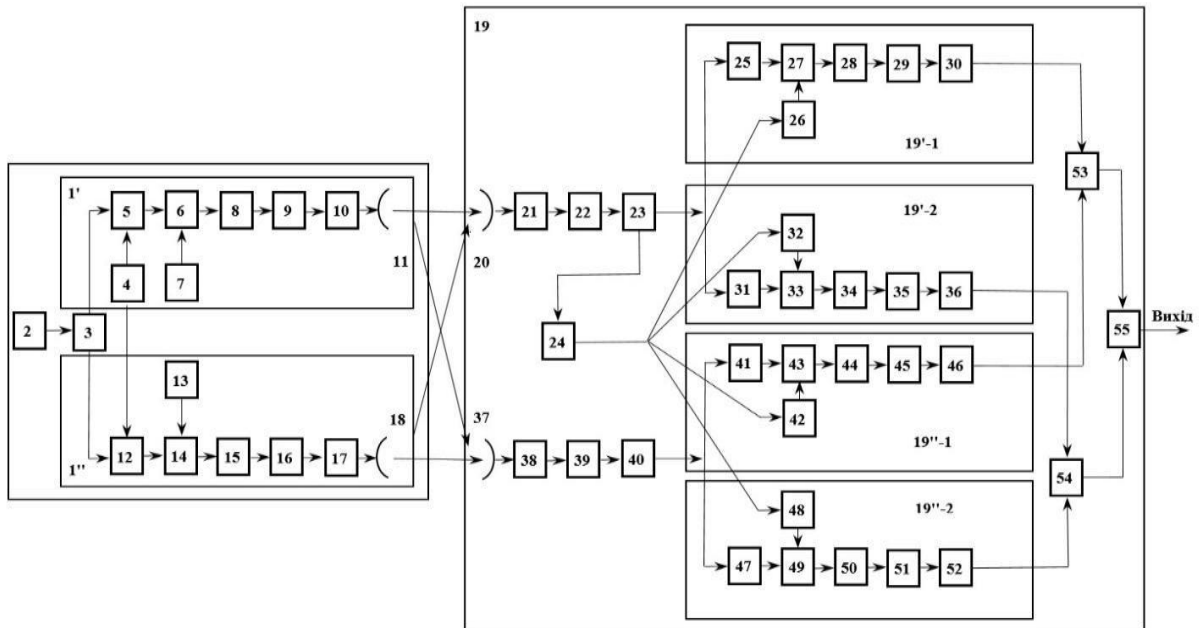


Рис.3. Функціональна схема ТКС

Таким чином на рис. 3 представлено 2-х каналну систему, що загалом представляє собою систему типу MIMO 2x2, в якій, в каналах з однаковою шириною смуги пропускання передаються різні сигнали.

Опишемо цю систему в позначеннях. На рис.3 введені позначення: 1-передавач; 2-джерело інформаційного сигналу; 3-дільник сигналу; 4-генератор сигналу проміжної частоти; 5,12-модулятори; 6, 14-пристрої створення шумоподібного сигналу ФМ-2; 7,13-генератори модифікованого коду Голда; 8,15-пристрої створення сигналів з ФМ-4; 9, 16-перетворювачі частоти; 10,17-підсилювачі потужності; 11, 18, 20, 37-антени; 19-приймач; 21,38-фільтр; 22, 39-малешумливі підсилювачі; 23, 40- перетворювачі частоти; 25,31,41,47-підсилювачі; 26, 32, 42, 48-генератори опорних радіосигналів ФМ 4; 24-синхронізатор; 27,33, 43, 49-RAKE-приймачі; 28,34, 44, 50-вирішувачі пристрої; 29, 35, 45, 51-детектори; 30, 36, 46, 52-формувачі відеосигналу; 53, 54, 55-суматори; 1', 1''-підсистеми передавача, 19'-1, 19'-2, 19''-1, 19''-2- підсистеми приймача.

Звичайно обробка сигналів в приймачі від 2-х антенних каналів в системах з MIMO здійснюється доволі складними способами [17].

В даній роботі пропонується прийнятний за складністю спосіб обробки сигналів в приймачі.

В системі здійснюється комплексна оптимізація системи за критерієм енергетичної ефективності в 3 етапи:

1. Зменшення смуги пропускання радіоканалу шляхом зменшення в 2 рази швидкості передачі сигналу.
2. Подальше зменшення смуги пропускання радіоканалу в 2 рази шляхом використання чотирирохпозиційного фазоманіпульованого сигналу ФМ-4.
3. Оптимальна обробка сигналів в RAKE-приймачах.

Передумовою розробки схеми ТКС є передача широкосмугового сигналу в радіоканалі з мінімальною смугою пропускання з огляду на дефіцит частотного ресурсу та зменшення потужності зовнішніх завад, що надходять до радіоканалу із навколишнього середовища.

Для цього, швидкість сигналу зменшена в 2 рази, тобто тривалість імпульсу інформаційного сигналу  $T_1$  збільшена вдвоє, що забезпечує використання радіоканалу із зменшеною вдвічі смугою пропускання.

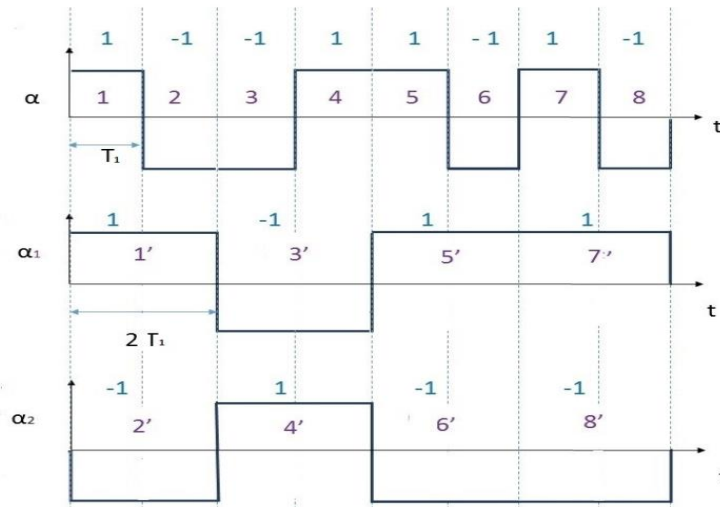


Рис.4. Структура вхідного сигналу  $\alpha$  і сигналів в каналах  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$

Тоді при уявній модуляції високочастотного сигналу даним сигналом і збереженні потужності передавачів відношення сигнал/шум буде:

$$\gamma_1 = \frac{A^2 T_1}{N_0} = 2\gamma, \quad (1)$$

де  $A$  – амплітуда імпульсу;  $T_1$  – тривалість імпульсу інформаційної послідовності;  $N_0$  – спектральна щільність шумів в радіоканалі;  $\gamma$  – відношення сигнал шум при уявній модуляції первинним інформаційним сигналом високочастотного сигналу.

Шумоподібний сигнал зазвичай створюється методом прямого розширення спектру за допомогою перетворення імпульсів інформаційного сигналу в послідовність коротких імпульсів тривалістю  $\tau$ , наприклад, за ПВП Голда. При модуляції таким сигналом високочастотного сигналу створюється складний псевдошумовий сигнал ФМ-2 з базою  $B = 2T_1/\tau$ . Тоді, відношення сигнал/шум буде зменшене в  $B$  разів:

$$\gamma_2 = \frac{A^2 \tau}{2N_0} = \frac{A^2 T_1}{N_0 B} = \frac{2\gamma}{B} \quad (2)$$

Для подальшого зменшення смуги пропускання радіоканалу в 2 рази слід використати фазоманіпульований сигнал ФМ-4 з тривалістю імпульсу  $2\tau$ . Для створення широкосмугового сигналу з ФМ-4 класична ПВП Голда не придатна, так як вона має непарну кількість бітів. Для створення системи з кодовим розділенням каналів із сигналом ФМ-4 доцільно використати модифіковану ПВП Голда з парною кількістю бітів шляхом додавання до класичної послідовності 1-го біта, наприклад, в кінці послідовності.

Як показали дослідження з використанням програмування в системі MATLAB, взаємкореляційна функція 2-х реалізацій модифікованої ПВП Голда практично не погіршується в порівнянні з використанням класичної ПВП Голда (див. рис. 2).

Тоді відношення сигнал/шум в системі з ФМ-4 буде покращено ще в 2 рази [18]:

$$\gamma_3 = \frac{A^2 2T}{N_0} = \frac{4\gamma}{B} \quad (3)$$

Створені в передавачі сигнали передаються до антен, з яких сигнали надходять до радіоканалу. На виході кожної антени приймача відношення сигнал/шум буде:

$$\gamma_a = \frac{P_c}{[P_m(1+m)]}, \quad (4)$$

де  $P_u$  – власні шуми передавача;  $m$  – відношення завада/власний шум передавача.

$$m = \frac{P_z}{P_m}, \quad (5)$$

де  $P_z$  – сумарна потужність завад, що надходять до радіоканалу.

Сигнали надходять до RAKE-приймачів 27, 33, 43, 49 (див. рис. 3), де автоматично формуються промені сигналів з визначенням величини їх запізнення та з використанням опорних ФМ-4 сигналів від генераторів 26, 32, 42, 48 (див. рис. 3), здійснюється кореляційна обробка сигналів [19]. При цьому, доцільно використати виділення головних пелюсток сигналів стробами, що дозволить видалити інші пелюстки меншої величини як завади.

В системі використовується кадрова синхронізація з формуванням в передавачі маркерного сигналу. В синхронізаторі створюються синхросигнали з використанням автокореляційного приймання сигналу проміжної частоти, які надходять до генераторів опорних сигналів кореляторів RAKE-приймачів.

Враховуючи, що при обробці сигналів в кореляторах RAKE-приймачів відношення сигнал/шум на виході корелятора буде збільшене в  $B$  разів, в системі буде відновлене відношення сигнал/шум, яке було погіршене в  $B$  разів при створенні шумоподібного сигналу. RAKE-приймач складається з кількох «пальців» або «каналів», кожен з яких обробляє сигнал, що надійшов через певний шлях або з певною затримкою. Кожен палець (канал) коригує і декодує сигнал для свого конкретного шляху. Результати обробки з усіх пальців комбінуються для відновлення вихідного сигналу. Це дозволяє покращити загальну якість прийому, компенсуючи затримки та ослаблення сигналу, які можуть бути присутніми в окремих каналах. RAKE-приймач може коригувати затримки сигналу, щоб забезпечити точний збір сигналів від різних шляхів. Отже, такий приймач використовує кореляцію для виявлення та розділення сигналів, що надійшли через різні канали. Кожен палець приймача призначений для обробки сигналу з певною затримкою, а результати обробки сумуються для покращення якості прийому.

Для представлення принципів роботи RAKE-приймача ми провели моделювання та отримали вигляд сигналів на вході та виході такого приймача за умови використання послідовностей Голда промодульованих сигналом ФМ-2 (див. рис. 2 а). Результати представлено на рис. 5.

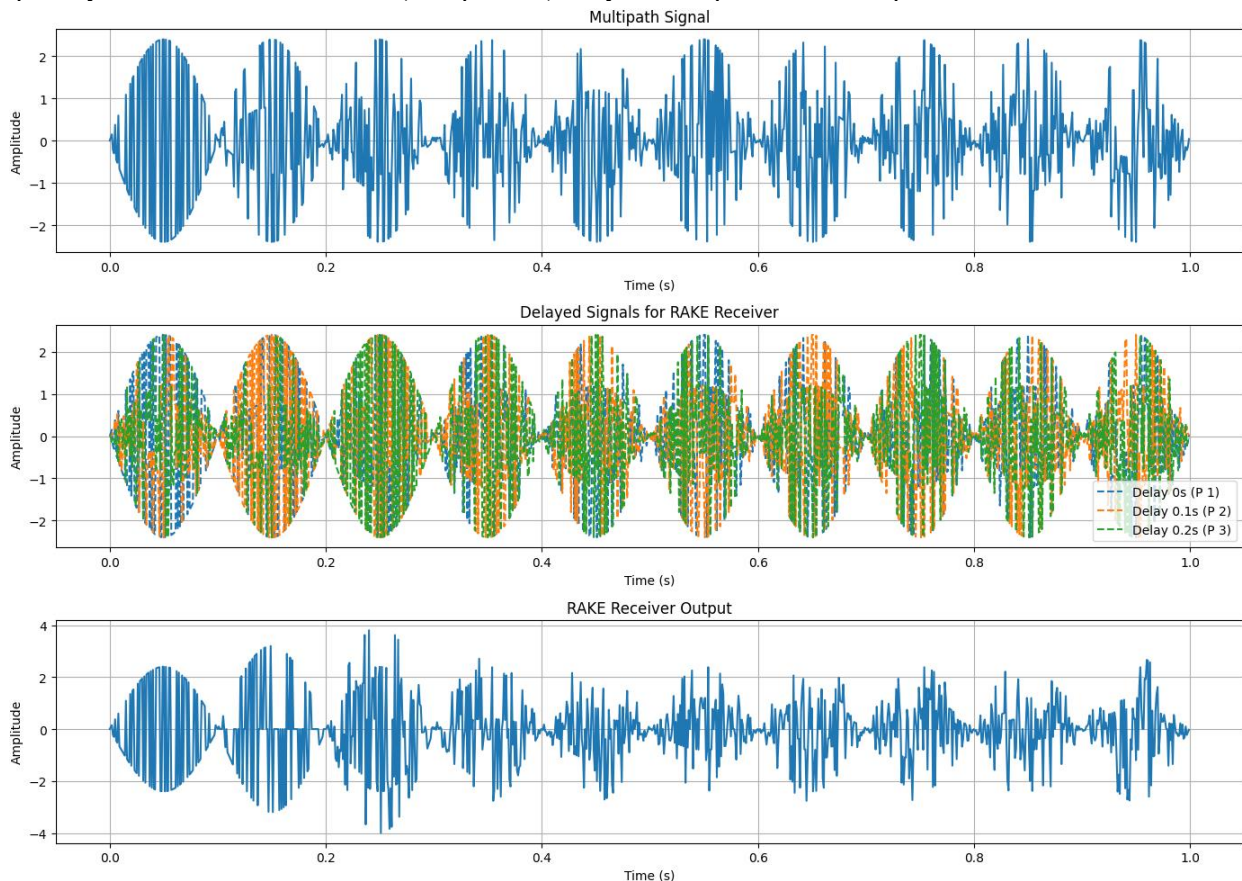


Рис.5. Структура сигналів на вході та виході RAKE-приймача

Згідно до рис. 5 сигнал типу ФМ-2 представляється у вигляді бітової послідовності де кожен біт у послідовності перетворюється у фазу сигналу [20]. В наслідок дії багатопроменовості (Multipath Propagation) утворюються сумарні маніпульовані сигнали типу ФМ-2 з різними затримками і амплітудами (дивитись рис.

5). За рахунок використання RAKE-приймача відбувається обробка сигналу утвореного продуктами явища багатоприменності і для цього використовуються кілька “пальців” RAKE-приймача з різними затримками. Тобто на рис. 5 зверху до низу маємо спочатку маємо вигляд сумарного сигнал з усіх шляхів. Далі на наступному графіку сигнали з затримками для кожного пальця RAKE-приймача. Тоді далі на нижньому графіку представлено результат обробки RAKE-приймачем.

Подача на вхід RAKE-приймачів збільшеного значення відношення сигнал/шум у порівнянні з вхідним значенням дозволяє одержати підвищене відношення сигнал/шум на виході системи в  $B$  разів завдяки обробці сигналів в кореляторах. В даній системі на вході RAKE-приймачів забезпечується в 4 рази більше відношення сигнал/шум в порівнянні із значенням на вході.

При об'єднанні сигналів променів за принципом максимального відношення сигнал/шум зважуються їх відношення сигнал/шум і потім складаються. При цьому необхідно досягти синфазності сигналів. Складання з максимальним відношенням сигнал/шум дає середнє значення сигнал/шум на виході кожного RAKE-приймача, що дорівнює сумі окремих відношень сигнал/шум.

Доведено, що на виході кожного RAKE-приймача відношення сигнал/шум буде [7]:

$$y_{\Sigma} = y_0 + \psi \sum_{i=0}^3 y_i, \quad (6)$$

де  $y_0$  – відношення сигнал/шум сигналу основного напрямку;  $y_i$  – відношення сигнал/шум  $i$ -ого променю ( $i_{\max} = 3$ );  $\psi$  – відношення суми значень променів сигнал/шум до значення сигнал/шум від сигналу основного напрямку:

$$\psi = (\sum_{i=0}^3 y_i) / y_0. \quad (7)$$

Звичайно  $\psi < 1$ . Слід зазначити, що в реальних випадках можуть бути відсутні окремі промені ( $i = 0$ ), тоді буде здійснюватися обробка тільки сигналу від основного напрямку  $y_0$  і  $\psi = 0$ .

В пристроях 14, 17, 27, 32 (див. рис. 3) здійснюється відновлення сигналів тривалістю  $T_1$  і знаходяться за розробленим методом значення окремо суми потужностей корисних сигналів від 4-х каналів:

$$P_c = P_{c1} + P_{c2} + P_{c3} + P_{c4}, \quad (8)$$

де  $P_{c1}, P_{c2}, P_{c3}, P_{c4}$  - потужності сигналів від каналів 19<sup>1-1</sup>, 19<sup>11-1</sup>, 19<sup>1-2</sup>, 19<sup>11-2</sup>, до складу яких входять сигнали основних каналів і променів (див. рис. 3), а також окремо сума потужностей шумів від 4-х каналів:

$$P_{\text{ш}} = P_{\text{ш}1} + P_{\text{ш}2} + P_{\text{ш}3} + P_{\text{ш}4}, \quad (9)$$

де  $P_{\text{ш}1}, P_{\text{ш}2}, P_{\text{ш}3}, P_{\text{ш}4}$  - потужності шумів від каналів 19<sup>1-1</sup>, 19<sup>11-1</sup>, 19<sup>1-2</sup>, 19<sup>11-2</sup>, до складу яких входять шуми основних каналів і променів.

Після складення потужностей сигналів та шумів в суматорах 53, 54, 55 (див. рис. 3) на виході системи одержується відношення сигнал/шум:

$$y = \frac{(P_{c1} + P_{c2} + P_{c3} + P_{c4})}{(P_{\text{ш}1} + P_{\text{ш}2} + P_{\text{ш}3} + P_{\text{ш}4})}, \quad (10)$$

За графіком рис. 6 можна знайти величину ймовірності помилки приймання сигналу за одержаним значенням відношення сигнал/шум. Якщо ймовірність помилки приймання сигналу (BER) [21] буде кращою за потрібну, можна зменшити відношення сигнал/шум, тобто зменшити потужність передавачів. Отриманий графік (рис. 6) демонструє залежність ймовірності бітової помилки (BER) від відношення сигналу до шуму ( $E_b/N_0$ ) для модуляцій BPSK (ФМ-2) та QPSK (ФМ-4) на виході RAKE-приймача. Як для ФМ-2, так і для ФМ-4, із зростанням відношення  $E_b/N_0$  ймовірність бітової помилки зменшується. Це очікуваний результат, оскільки при вищих значеннях  $E_b/N_0$  сигнал стає більш стійким до впливу шуму, що призводить до меншої кількості помилок при прийомі. Обидві маніпуляції мають схожі залежності BER від  $E_b/N_0$ , але для ФМ-4 значення BER трохи гірші при тому ж значенні  $E_b/N_0$ . Це пов'язано з тим, що при ФМ-4 передається два біти на символ, що робить її більш чутливою до шуму в порівнянні з ФМ-2, яка передає лише один біт на символ. При низьких значеннях  $E_b/N_0$  (від 0 до 5 dB) спостерігається більш різке зменшення BER для обох маніпуляцій, але все ж таки ФМ-4 має трохи вищу ймовірність помилки у цьому діапазоні. Це свідчить про те, що в умовах низького відношення сигнал/шум ФМ-2 забезпечує трохи кращу стійкість. При значеннях  $E_b/N_0$  більше 10 дБ обидві модуляції досягають дуже низьких значень BER ( $\sim 10^{-6}$  і нижче), що є свідченням їх високої ефективності при хороших умовах прийому.

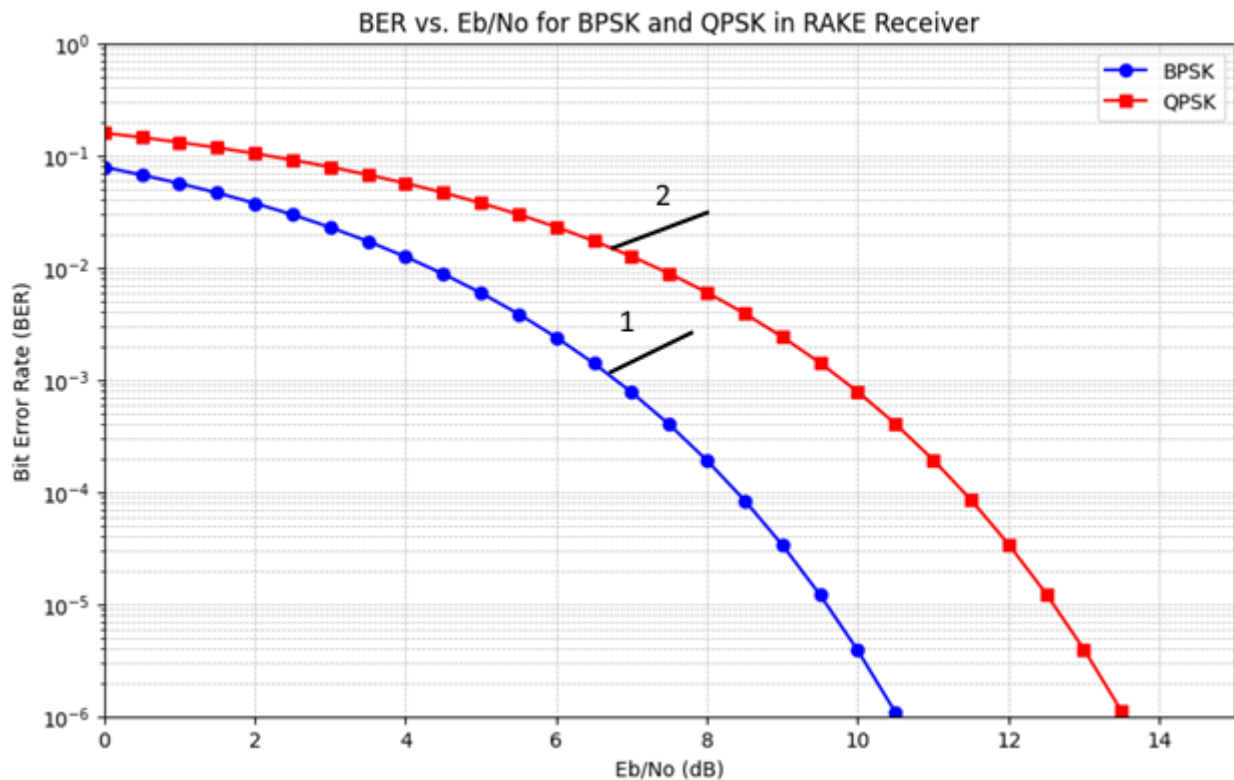


Рис.6. Графік залежностей BER для BPSK (ФМ-2) та QPSK (ФМ-4) при різних значеннях відношення  $E_b/N_0$  у ТКС з RAKE-приймачем: 1 – використання модуляції ФМ-2 (BPSK); 2 – використання модуляції ФМ-4 (QPSK)

Потрібно наголосити, що у практичних ТКС вибір між ФМ-2 та ФМ-4 може бути обумовлений компромісом між вимогами до спектральної ефективності та стійкістю до шуму. ФМ-2 може бути обраний у системах, де критично важлива низька ймовірність помилки при складних умовах прийому, тоді як ФМ-4 може бути використаний для підвищення пропускної здатності за умов відносно високого рівня сигналу. Отже, досить важливо забезпечити адаптивний формат модуляції за умов використання запропонованих рішень в сучасних ТКС.

## ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

### І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У даній роботі запропоновано комплексну оптимізацію ТКС на основі модифікованої ПВП Голда та RAKE-приймачів. Проведені дослідження показали, що використання модифікованих послідовностей Голда разом із RAKE-приймачами забезпечує ефективне зниження впливу БППС, що суттєво покращує якість приймання сигналів.

Отримані графіки крос-кореляції для двох реалізацій однієї послідовності Голда (зсунутої на один елемент), модульованих за допомогою ФМ-2 та ФМ-4, продемонстрували високу ступінь схожості сигналів при певних зсувах. Це свідчить про хороші кореляційні властивості модифікованих послідовностей, що є важливим для підвищення ефективності роботи ТКС в умовах впливу шумів та інтерференції.

Запропонована функціональна схема ТКС відзначається високою ефективністю у передачі даних, забезпечуючи оптимальний баланс між швидкістю передачі та енергетичною ефективністю. Розроблена методика визначення відношення сигнал-шум дозволяє здійснювати точний аналіз роботи системи в умовах різних рівнів завад, що важливо для забезпечення надійності та якості зв'язку в сучасних ТКС.

Перспективи подальших досліджень у даному напрямку полягають у розробці нових модифікованих послідовностей Голда з покращеними кореляційними характеристиками, що дозволить ще більше підвищити якість сигналів у ТКС. Крім того, перспективним є подальше вдосконалення алгоритмів RAKE-приймачів, включаючи адаптивне налаштування для роботи з різними послідовностями, що може знизити обчислювальні витрати та підвищити ефективність у реальних умовах експлуатації.

### Література

1. A. Hamza, H. AlShammary, C. Hill and J. F. Buckwalter, "A Full-Duplex Rake Receiver Using RF Code-Domain Signal Processing for Multipath Environments," in IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 56, no. 10, pp. 3094-3108, Oct. 2021.



2. A. F. Molisch, "Spread Spectrum Systems," in *Wireless Communications*, IEEE, 2011, pp.387-416.
3. Y.-H. Lee and S.-J. Kim, "Sequence acquisition of DS-CDMA systems employing Gold sequences," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49, no. 6, pp. 2397-2404, Nov. 2000.
4. A. I. Семенко, Н. І. Бокла, "Створення модифікованих псевдовипадкових послідовностей Голда для телекомунікаційних систем з кодовим розподілом каналів," *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, №3, с. 10-14, 2014.
5. A. I. Semenکو, N. I. Bokla, "Effektivnost telekommunikatsionnikh sistem s ispolzovaniem modifitsirovannikh psevdosluchainikh posledovatelnosti Golda," *Elektrosvyaz*, №3, pp. 37-40, 2014.
6. X. Peng, J. Chen, Y. Li and Y. Song, "Single Subcarrier Gold Sequences Modulated Timing Synchronization for Upstream OFDMA-PON," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 1-7, Feb. 2017, Art no. 7200207.
7. U. Grob, A. L. Welti, E. Zollinger, R. Kung and H. Kaufmann, "Microcellular direct-sequence spread-spectrum radio system using N-path RAKE receiver," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 8, no. 5, pp. 772-780, June 1990.
8. D. Dharmappa, M. V. Mandi and S. Ramesh, "Analysis of Binary Sequences with better correlation performance compared to Gold code under different doppler conditions for GNSS applications," 2018 3rd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), Bangalore, India, 2018, pp. 209-215.
9. J. -H. Yan, C. -W. Wang, K. -H. Lin and K. -M. Feng, "A Timing-Synchronization-Free WDM-Compatible Colorless DRoF Uplink System for 5G Mobile Fronthaul Employing Gold Sequence Multiplexing," 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose, CA, USA, 2019, pp. 1-2.
10. A. Semenکو, N. Bokla, A. Shokotko and V. Lusenکو, "Construction of microwave link using channel code division based on modified pseudorandom Gold sequences," 2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET), Lviv, Ukraine, 2016, pp. 634-637.
11. Y. Jun and Z. Xiang-Li, "A new design of Gold-like binary sequences," 2017 2nd Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS), Wuhan, China, 2017, pp. 118-124, doi: 10.1109/ACIRS.2017.7986077
12. K. Liu, Z. Zhou, A. R. Adhikary and C. Tang, "Large Sets of Binary Spreading Sequences With Low Correlation and Low PAPR via Gold Functions," in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 70, no. 7, pp. 5309-5322, July 2024.
13. L. Shufeng, H. Shiyao and W. Hongda, "Analysis of DS-CMDA system using orthogonal gold sequence," 2017 7th IEEE International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC), Macau, China, 2017, pp. 520-523.
14. D. Dharmappa, M. V. Mandi and S. Ramesh, "Generation of Binary Sequences Having Better Odd Correlation and Linear Complexity Property Compared to Gold Codes for use in Global Navigation Satellites Systems (GNSS) Applications," 2017 International Conference on Current Trends in Computer, Electrical, Electronics and Communication (CTCEEC), Mysore, India, 2017, pp. 155-160.
15. Н.І. Кунах, О.М. Ткаленко, "Застосування технології RAKE як методу боротьби з багатопроменевістю в системах мобільного зв'язку," *Сучасна спеціальна техніка*, №3(50), с. 34-41, 2017.
16. А.О. Кахно, С.М. Дяченко, "RAKE-приймачі в сучасних системах телекомунікації," *Вісник Національного технічного університету України "КПІ" Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування*, №34, с. 92-96, 2007.
17. Zhen Gao, Yikun Mei, Li Qiao, "Sparse Signal Processing for Massive MIMO Communications," Springer: Singapore, pp. 217, 2023.
18. А.І. Семенко, Н.І. Бокла, "Метод двократного зменшення необхідної смуги пропускання каналу зв'язку в телекомунікаційній системі з кодовим розподілом каналів," *Зв'язок*, №4, с.23-25, 2011.
19. J. Boiko, L. Karpova, "Increasing Efficiency in the Correlation Processing of Information Signals for Radar," *Proceedings of Fourth International Conference on Communication, Computing and Electronics Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 977. Springer: Singapore, pp. 549–569, 2023.
20. Ю. Бойко, А. Семенко, І. П'ятін, "Особливості формування кодової надлишковості у каналах передачі інформації," *Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології*, №04, Т. 2, с.12-25, 2023.
21. J. Boiko, I. Pyatin, L. Karpova, O. Eromenko, "Study of the Influence of Changing Signal Propagation Conditions in the Communication Channel on Bit Error Rate," in *Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol 69, Springer: Cham, pp. 79–103, 2021.

#### References

1. A. Hamza, H. AlShammary, C. Hill and J. F. Buckwalter, "A Full-Duplex Rake Receiver Using RF Code-Domain Signal Processing for Multipath Environments," in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 56, no. 10, pp. 3094-3108, Oct. 2021.
2. A. F. Molisch, "Spread Spectrum Systems," in *Wireless Communications*, IEEE, 2011, pp.387-416.

3. Y.-H. Lee and S.-J. Kim, "Sequence acquisition of DS-CDMA systems employing Gold sequences," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49, no. 6, pp. 2397-2404, Nov. 2000.
4. A. I. Semenko and N. I. Bokla, "Stvorennia modyfikovanykh psevdovypadkovykh poslidovnosti Holda dlia telekomunikatsiinykh system z kodovym rozpodilom kanaliv," *Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnologii*, №3, s. 10-14, 2014.
5. A. I. Semenko and N. I. Bokla, "Effektivnost telekomunikatsionnykh sistem s ispolzovaniem modifitsirovannykh psevdosluchainykh posledovatelnosti Golda," *Elektrosvyaz*, №3, pp. 37-40, 2014.
6. X. Peng, J. Chen, Y. Li and Y. Song, "Single Subcarrier Gold Sequences Modulated Timing Synchronization for Upstream OFDMA-PON," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 1-7, Feb. 2017, Art no. 7200207.
7. U. Grob, A. L. Welti, E. Zollinger, R. Kung and H. Kaufmann, "Microcellular direct-sequence spread-spectrum radio system using N-path RAKE receiver," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 8, no. 5, pp. 772-780, June 1990.
8. D. Dharmappa, M. V. Mandi and S. Ramesh, "Analysis of Binary Sequences with better correlation performance compared to Gold code under different doppler conditions for GNSS applications," 2018 3rd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), Bangalore, India, 2018, pp. 209-215.
9. J.-H. Yan, C.-W. Wang, K.-H. Lin and K.-M. Feng, "A Timing-Synchronization-Free WDM-Compatible Colorless DRoF Uplink System for 5G Mobile Fronthaul Employing Gold Sequence Multiplexing," 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose, CA, USA, 2019, pp. 1-2.
10. A. Semenko, N. Bokla, A. Shokotko and V. Lusenko, "Construction of microwave link using channel code division based on modified pseudorandom Gold sequences," 2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET), Lviv, Ukraine, 2016, pp. 634-637.
11. Y. Jun and Z. Xiang-Li, "A new design of Gold-like binary sequences," 2017 2nd Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS), Wuhan, China, 2017, pp. 118-124, doi: 10.1109/ACIRS.2017.7986077
12. K. Liu, Z. Zhou, A. R. Adhikary and C. Tang, "Large Sets of Binary Spreading Sequences With Low Correlation and Low PAPR via Gold Functions," in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 70, no. 7, pp. 5309-5322, July 2024.
13. L. Shufeng, H. Shiyao and W. Hongda, "Analysis of DS-CMDA system using orthogonal gold sequence," 2017 7th IEEE International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC), Macau, China, 2017, pp. 520-523.
14. D. Dharmappa, M. V. Mandi and S. Ramesh, "Generation of Binary Sequences Having Better Odd Correlation and Linear Complexity Property Compared to Gold Codes for use in Global Navigation Satellites Systems (GNSS) Applications," 2017 International Conference on Current Trends in Computer, Electrical, Electronics and Communication (CTCEEC), Mysore, India, 2017, pp. 155-160.
15. N.I. Kunakh and O.M. Tkalenko, "Zastosuvannia tekhnologii RAKE yak metodu boroty z bahatopromenevistiuv u systemakh mobilnoho zviazku," *Suchasna spetsialna tekhnika*, №3(50), s. 34-41, 2017.
16. A.A. Kahno and S.M. Dyachenko "Rake-receivers in the modern telecommunication systems," *Bulletin of National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»* №34, pp. 92-96, 2007.
17. Z. Gao, Y. Mei and L. Qiao, "Sparse Signal Processing for Massive MIMO Communications," Springer: Singapore, pp. 217, 2023.
18. A.I. Semenko, N.I. Bokla, "Metod dvokratnoho zmnshennia neobkhidnoi smuhy propuskannia kanalu zviazku v telekomunikatsiini systemi z kodovym rozpodilom kanaliv," *Zviazok*, №4, c.23-25, 2011.
19. J. Boiko and L. Karpova, "Increasing Efficiency in the Correlation Processing of Information Signals for Radar," *Proceedings of Fourth International Conference on Communication, Computing and Electronics Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 977. Springer: Singapore, pp. 549-569, 2023.
20. J. Boiko, A. Semenko and I. Pyatin, "Features of code redundancy formation in information transmission channels", *Infocommunication and computer technologies*, vol. 2, no. 04, pp. 12-25, 2023.
21. J. Boiko, I. Pyatin, L. Karpova and O. Eromenko, "Study of the Influence of Changing Signal Propagation Conditions in the Communication Channel on Bit Error Rate," in *Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol 69, Springer: Cham, pp. 79-103, 2021.