

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

ІНДИК СЕРГІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 621.391

**МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ АНСАМБЛІВ СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ  
КОГНІТИВНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків-2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі транспортного зв'язку Українського державного університету залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:**

кандидат технічних наук, доцент  
**Лисечко Володимир Петрович**,  
Український державний університет  
залізничного транспорту,  
доцент кафедри транспортного зв'язку

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Климаш Михайло Миколайович**,  
Національний університет «Львівська  
політехніка», завідувач кафедри  
телекомунікацій;

доктор технічних наук, професор  
**Серков Олександр Анатолійович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
професор кафедри систем інформації.

Захист відбудеться «16» квітня 2021 року о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.01 в Українському державному університеті залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

Автореферат розісланий «11» березня 2021 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Карина ТРУБЧАНІНОВА

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Для збільшення ефективності використання транспортного потенціалу України, зокрема як транзитної держави, необхідним є розвиток інформаційної системи забезпечення управління рухомими об'єктами з урахуванням сучасних вимог у сфері зв'язку, навігації та спостереження. Удосконалення державної інтегрованої інформаційної системи забезпечить одержання органами управління, державної влади та іншими користувачами просторово-часової достовірної інформації про місцезнаходження рухомих об'єктів і їхні характеристики, раціональне використання систем і засобів зв'язку, навігації і спостереження шляхом їхньої інформаційної інтеграції, сприятиме впровадженню сучасних інформаційних, телекомунікаційних і радіотехнологій. Це підвищить рівень комунікації та зворотного зв'язку між органами управління транспортом, транспортними підприємствами та користувачами транспортних послуг, ефективність управління транспортом і якість транспортно-логістичних послуг, сприятиме мінімізації економічних втрат при перевезенні вантажів, скороченню простоїв транспортних засобів і рентабельності вантажних перевезень.

Збільшення попиту на додаткову пропускну здатність з боку різних служб радіозв'язку в умовах обмеженості радіочастотного ресурсу призводить до ускладнення середовища управління використанням спектра. Для вирішення цих завдань необхідно застосовувати інноваційні методи, що дозволять забезпечити ефективне використання служб, розподілених у смузі частот, у тому числі спільне використання обмежених радіочастотних ресурсів. Застосування підходів на основі динамічного доступу до спектра може сприяти ефективному використанню спектра. Однак для його реалізації необхідно вирішити ряд нових складних завдань, основним з яких є впровадженням нових сигнально-кодових конструкцій. При вирішенні цих завдань доцільно використовувати інноваційні функціональні можливості радіосистем на основі когнітивних технологій. У системах радіозв'язку на основі множинного доступу абонентські сигнали перекриваються за частотою і зсунуті один відносно одного в часі випадково, внаслідок чого виникають завади множинного доступу (ЗМД). Такі завади мають значний вплив на якість зв'язку та кількість абонентів, що обслуговуються одночасно, і закладені в самих принципах побудови когнітивних телекомунікаційних систем. Розвитку даного напрямку присвячені роботи J. Mitola III, H. Arslan, G. Q. Maguire Jr., S. Haykin, P. Setoodeh.

Питанням удосконалення сигнально-кодових конструкцій займаються як вітчизняні, так і закордонні вчені. Зокрема використання імпульсних складних сигналів у радіолокації запропонував Е. Хатман. На розвиток теорії складних сигналів суттєво вплинули роботи Р. Бенджаміна, Ч. Кука та М. Бернфельда. Р. Хартлі ввів поняття логарифмічної міри інформації. Д. В. Агеев поклав початок досліджень кодового ущільнення та розділення. Внесок до розвитку теорії і техніки генерування та обробки складних сигналів внесли: Л. Є. Варакін, В. П. Іпатов, І. М. Пишкін, Т. О. Оганов, О. О. Харкевич, В. М. Харченко, В. П. Лисечко. У роботах приділяється увага завданням боротьби з завадами множинного доступу,

які виникають при одночасній роботі радіосистем у загальній смузі частот і впливають на кількість одночасно обслуговуваних абонентів і якість зв'язку між ними, але завдання збільшення об'єму ансамблів сигналів розглянуто недостатньо, тому розроблення нових методів формування ансамблів складних сигналів є актуальним.

Таким чином, існує необхідність розроблення нових методів формування ансамблів складних сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємкореляційними властивостями для когнітивних телекомунікаційних систем на основі множинного доступу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.** Дослідження в дисертаційній роботі безпосередньо пов'язані з наступними положеннями: НДР Українського державного університету залізничного транспорту «Дослідження загальнодержавних вимог до розподілу частот України, новітніх цифрових систем технологічного радіозв'язку та розробка плану використання радіочастотного ресурсу мереж технологічного радіозв'язку АТ «Українська залізниця»» (ДР№ 0121U100191), у якій автор брав безпосередню участь як виконавець, НДР Національної академії Національної Гвардії України, шифр «Поляна 3» (ДР№ 0116U004048), у якій автор брав безпосередню участь як виконавець, концепцією розвитку телекомунікацій в Україні, схваленою розпорядженням Кабінету Міністрів України від 7 червня 2006 р., № 316-р (із змінами, внесеними згідно з Розпорядженням КМ № 1612-р (1612-2008-р) від 27.12.2008 р.), постановою про затвердження Правил надання та отримання телекомунікаційних сервісів від 11 квітня 2012 р. № 295 (із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 14 від 15.01.2020 р.), Стратегією сталого розвитку «Україна–2020», схваленою Указом Президента України від 12 січня 2015 р. № 5/2015.226, тема дисертаційної роботи пов'язана з пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки, наведеними в «Переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на 2011-2015 роки», затвердженому Постановою Кабінету міністрів України № 942 від 7 вересня 2011 р.

**Мета роботи і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розроблення методів формування ансамблів складних сигналів для когнітивних телекомунікаційних систем, які дозволяють збільшити об'єм ансамблів при забезпеченні низького рівня завад множинного доступу.

Для досягнення вищезазначеної мети необхідно вирішити такі **часткові завдання досліджень:**

1. Провести аналіз шляхів збільшення об'єму ансамблів складних сигналів для когнітивних телекомунікаційних систем.
2. Розробити метод перестановок частотних елементів сигналів шляхом повного перебору.
3. Удосконалити метод формування ансамблів складних сигналів у часовій області із врахуванням взаємкореляційних властивостей.
4. Розвинути метод формування ансамблів складних сигналів на основі використання послідовностей з покращеними взаємкореляційними властивостями в частотній області.

5. Розробити програмну реалізацію методів формування ансамблів складних сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємкореляційними властивостями в часовій і частотній областях.

6. Дослідити кореляційні та ансамблеві властивості отриманих сигналів.

**Об'єктом досліджень** є процес формування ансамблів складних сигналів для когнітивних телекомунікаційних систем.

**Предметом досліджень** є методи формування ансамблів складних сигналів, отриманих шляхом перетворення послідовностей з покращеними взаємкореляційними властивостями.

**Методи дослідження.** При вирішенні часткових наукових завдань дисертаційної роботи використовувались методи теорії ймовірностей і випадкових процесів, статистичної теорії зв'язку, при розробленні методу формування ансамблів складних сигналів, отриманих шляхом перестановки часових інтервалів послідовностей на основі центрованого ряду, методу перестановок частотних елементів сигналів шляхом повного перебору та методу формування ансамблів складних сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємкореляційними властивостями, які отримані шляхом смугової фільтрації з перестановками, – методи теорії математичного програмування, теорії оптимізації та числові методи обробки емпіричних даних.

Для підтвердження достовірності отриманих теоретичних результатів застосовувались методи імітаційного моделювання. Аналіз результатів експериментальних досліджень проводився з використанням методів математичної статистики, програмні продукти побудовані на основі середовища Matlab.

Вибір методів досліджень забезпечив достовірність отриманих результатів і висновків, що підтверджується збіжністю результатів, отриманих за допомогою розроблених програмних продуктів з теоретичними і практичними результатами, відображеними в публікаціях, і обумовлений відповідністю протиріч положенням теорії обробки сигналів.

**Наукова новизна отриманих результатів** обумовлена новим підходом до вирішення важливого науково-прикладного завдання, що полягає в розробленні методів формування ансамблів складних сигналів для когнітивних телекомунікаційних систем, які дозволяють збільшити об'єм ансамблів при забезпеченні низького рівня завад множинного доступу.

1. **Вперше розроблено** метод перестановок частотних елементів сигналів шляхом повного перебору, який дозволяє збільшити об'єм ансамблів складних сигналів за рахунок аналізу всіх можливих комбінацій частотних елементів з подальшим вибором оптимального варіанта перестановок.

2. **Удосконалено** метод формування ансамблів складних сигналів, отриманих шляхом перестановки часових інтервалів послідовностей, який відрізняється від відомих формуванням центрованого ряду на основі середнього значення максимальних викидів бічних пелюсток ФВК, застосування якого дозволяє знизити рівень завад множинного доступу і збільшити об'єм ансамбля.

3. **Отримав подальший розвиток** метод формування ансамблів складних сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємкореляційними

властивостями, отриманими шляхом смугової фільтрації з перестановками, реалізований на основі виділення зі спектра послідовностей рівних смуг з наступним перенесенням до спільної області частот і подальшим застосуванням перестановок, що дозволяє збільшити об'єм ансамблів складних сигналів при заданому рівні завад множинного доступу.

**Практичне значення отриманих результатів** досліджень полягає:

1) у розробленні програмної реалізації методу формування ансамблів складних сигналів, які отримані шляхом перестановки часових інтервалів послідовностей на основі центрованого ряду, який дозволяє покращити взаємкореляційні властивості сформованих ансамблів складних сигналів у порівнянні з відомими ансамблями на основі послідовностей з низьким рівнем енергетичної взаємодії і зменшити рівні максимальних викидів бічних пелюсток функції взаємної кореляції на 7-12 %.

2) у розробленні програмної реалізації методу перестановок частотних елементів сигналів шляхом повного перебору, який дозволяє збільшити об'єм ансамблів складних сигналів в  $m$  раз, де  $m$  – число перестановок частотних елементів.

3) у розробленні програмної реалізації методу формування ансамблів складних сигналів на основі використання послідовностей з покращеними взаємкореляційними властивостями, отриманими шляхом смугової фільтрації з перестановками, який дозволяє збільшити об'єм ансамблів складних сигналів порівняно з відомими ансамблями на 16-26 %.

Отримані в роботі результати знайшли практичне впровадження та використання: в НДР Українського державного університету залізничного транспорту «Дослідження загальнодержавних вимог до розподілу частот України, новітніх цифрових систем технологічного радіозв'язку та розробка плану використання радіочастотного ресурсу мереж технологічного радіозв'язку АТ «Українська залізниця»» (ДР№ 0121U100191);

НДР Національної академії Національної Гвардії України, шифр «Поляна 3» (ДР№ 0116U004048).

**Достовірність отриманих результатів** підтверджується відсутністю протиріч з основними положеннями теорії інформації, теорії математичного програмування, теорії оптимізації та збіжністю з результатами імітаційного моделювання та аналітичними дослідженнями.

**Особистий внесок здобувача.** У наукових працях, які були опубліковані у співавторстві, здобувачу належать такі результати: у роботі [1] – метод перестановки інтервалів з урахуванням взаємкореляційних властивостей сегментів, у роботі [2] проведено дослідження властивостей ансамблів складних сигналів, отриманих шляхом перестановок часових інтервалів на основі центрованого ряду, у роботі [3] – метод формування ансамблів складних сигналів шляхом частотної фільтрації псевдовипадкових послідовностей з низькою взаємодією в часовій області, у роботі [4] проведено дослідження ансамблевих властивостей складних сигналів, отриманих за рахунок частотної фільтрації псевдовипадкових послідовностей з низькою взаємодією в часовій області, у роботі

[5] – метод формування ансамблів складних сигналів збільшеного об'єму на основі використання частотних смуг.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати, одержані в процесі досліджень, доповідалися, обговорювалися та ухвалені на таких конференціях: VII Міжнародній науково-технічній конференції (Полтава, 20-21 квітня 2017 р.); 33-й Міжнародній науково-практичній конференції (Харків, 30 жовтня 2020 р.); X Міжнародній науково-практичній конференції (Запоріжжя, 07 –09 жовтня 2020 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції (Львів, 20 листопада 2020 р.); VI Всеукраїнській науково-практичній конференції (Полтава, 06 листопада 2020 р.)

У повному обсязі результати дисертаційної роботи заслухано та схвалено на розширеному засіданні кафедри транспортного зв'язку Українського державного університету залізничного транспорту.

**Публікації.** Результати наукових досліджень відображено в 11 друкованих працях, зокрема в шести статтях у наукових фахових виданнях України (з них п'ять – у наукових фахових виданнях України, одна – у журналі, внесеному до міжнародної наукометричної бази даних WEB OF SCIENCE), п'ять публікацій в матеріалах міжнародних наукових конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації складає 156 сторінок, у тому числі 116 сторінок основного тексту, 31 рисунок, 9 таблиць, список використаних джерел із 114 найменувань на 9 сторінках і 5 додатків на 31 сторінці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено актуальність теми дисертаційної роботи, зв'язок з науковими програмами, обґрунтовуються мета і завдання дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження. Наведено перелік результатів дисертаційного дослідження, які визначають наукову новизну, сформульовано практичну значущість отриманих наукових результатів; відомості про реалізацію, апробацію, публікацію наукових і практичних результатів дисертації та особистий внесок автора дисертаційної роботи в наукових статтях, які виконано у співавторстві.

У **першому розділі** вирішено перше завдання дисертаційних досліджень, а саме проведено аналіз шляхів збільшення об'єму ансамблів складних сигналів для когнітивних телекомунікаційних систем, який показує, що в результаті одночасної роботи абонентів у загальній смузі частот виникають ЗМД. Для забезпечення завадостійкості необхідно підбирати параметри сигналів таким чином, щоб мінімізувати рівні взаємних завад, які визначаються допустимим рівнем максимальних значень функції взаємної кореляції (ФВК):

$$R_{\max} = \frac{\alpha}{\sqrt{B}}, \quad (1)$$

де  $\alpha = 1 \div 5$  – поправочний коефіцієнт;  
 $B$  – база сигналу.

При проектуванні систем з великою кількістю абонентів одним з головних питань буде вибір сигналів. З метою забезпечення великої кількості абонентів пропонується використання широкосмугових сигналів.

До відомих класів сигналів, які формуються на основі послідовностей відеоімпульсів, належать: М-послідовності, послідовності Голда, Касамі, нелінійні послідовності, багатофазні сигнали та інші. Такі послідовності мають гарні взаємкореляційні властивості, але в реальних умовах сигнали окремих абонентів перекриваються за частотою і зсунуті випадково один відносно одного у часі, тому умова ортогональності для них переважно не виконується. Отже між такими сигналами виникають завади множинного доступу. Рівень таких завад визначається кількістю абонентів, а також рівнем максимальних викидів бічних пелюсток ФВК сигналів для даної системи. На вході приймача кожного абонента діє сума сигналів  $\sum_{i=1}^{l_a} S_i(t)$ , один з яких буде корисним сигналом, а  $(l_a-1) = l_m$  – заважаючим при  $l_a \gg 1$ ,  $l_m = l_a$ . У результаті дії сукупності сигналів на виході пристрою виділення корисного сигналу виникають ЗМД. Як наслідок, при оцінюванні параметрів системи необхідно проводити оцінку як з урахуванням власних завад приймача, так і ЗМД, які значною мірою переважають вплив власних завад.

Критерієм завадостійкості є відношення сигнал/ЗМД при розподіленні за нормальним законом:

$$h_{ЗМД}^2 = \frac{\sqrt{B}}{\alpha_{\max} \beta_{cp} (l_a - 1)}, \quad (2)$$

де  $h_{ЗМД}^2$  – відношення сигнал/ЗМД на вході вирішуючого пристрою приймача;

$\beta_{cp} = \frac{1}{P_c (l_a - 1)} \sum_{l=1}^{l_a-1} P_{nj}$  – середнє значення перевищення завадою сигналу.

де  $P_c$  – потужність корисного сигналу;

$P_{nj}$  – потужність сигналу, що заважає;

$\alpha_{\max}$  – максимальне значення поплавкового коефіцієнта, що характеризує взаємкореляційні властивості сигналів.

Аналіз методів ЗМД доступу показує, що застосування частотного і часового розділення сигналів обмежене частотно-часовим ресурсом при обслуговуванні великої кількості одночасно працюючих абонентів, а розроблення нових технічних рішень на базі вузькоспрямованих антен призводить до ускладнення реалізації, що не завжди виправдано для повнодоступних мереж.

Таким чином, відповідно, до мети дисертаційної роботи на основі проведеного аналізу було сформовано завдання дисертаційного дослідження, яке полягає в розробленні методів формування ансамблів складних сигналів для когнітивних телекомунікаційних систем, які дозволяють збільшити об'єм ансамблів при забезпеченні низького рівня завад множинного доступу.

**Другий розділ** присвячено вирішенню третього завдання дисертаційних досліджень, а саме розробленню методу формування ансамблів складних



сигналів, отриманих шляхом перестановки часових інтервалів послідовностей на основі центрованого ряду, суть якого полягає у процесі розбиття тривалості псевдовипадкових послідовностей коротких відеоімпульсів на рівні часові інтервали. Здійснюють розрахунок значень максимальних викидів бічних пелюсток ФВК і визначають їхнє загальне середнє значення у відповідності до виразу:

$$R_{ij}(\tau) = \int_{-T}^T s_i(t) s_j(t - \tau) dt, \quad (3)$$

де  $s_i(t), s_j(t)$  –  $i$ -та і  $j$ -та кодові послідовності відеоімпульсів, при цьому  $i \neq j$ ;  
 $T$  – період, на якому визначені функції  $s_i(t)$  і  $s_j(t)$ .

На основі отриманих значень складають ряд значень, у якому першу позицію займає часовий інтервал, з середнім значенням величини максимальних викидів бічних пелюсток ФВК. Визначення наступних часових інтервалів відбувається на основі аналізу центрованого ряду і розстановка значень проводиться відповідно до обраного загального середнього значення. Таким чином формують новий усереднений ряд послідовностей на основі центрованого ряду часових інтервалів. Завдяки такому підходу покращується рівень взаємної кореляції послідовностей в утвореному ансамблі відносно вихідних послідовностей і задовольняє умову мінімальної подоби.

$$R_{ij}(\tau) \leq \frac{1}{\sqrt{n_i n_j}}, \quad (4)$$

де  $n_i \geq n_j$  – кількість імпульсів у послідовностях.

Робота запропонованого методу перевірялася на основі програмного продукту, реалізованого в середовищі Matlab. Отримано часові діаграми вихідної послідовності і послідовності, отриманої шляхом перестановки часових інтервалів на основі центрованого ряду (рис. 1), і криву значень максимальних викидів бічних пелюсток ФВК залежно від кількості імпульсів у послідовностях (рис. 2).

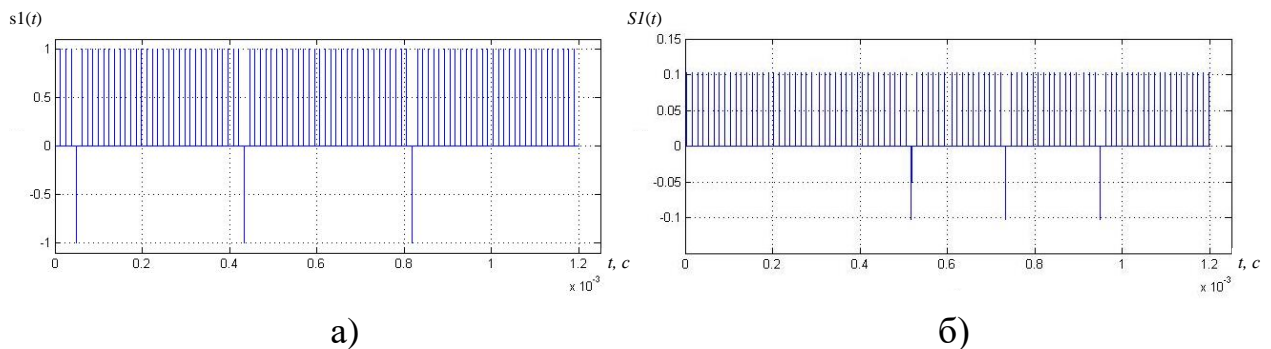


Рис. 1. Часові діаграми: а) – вихідної послідовності; б) – послідовності, отриманої шляхом перестановки часових інтервалів на основі центрованого ряду

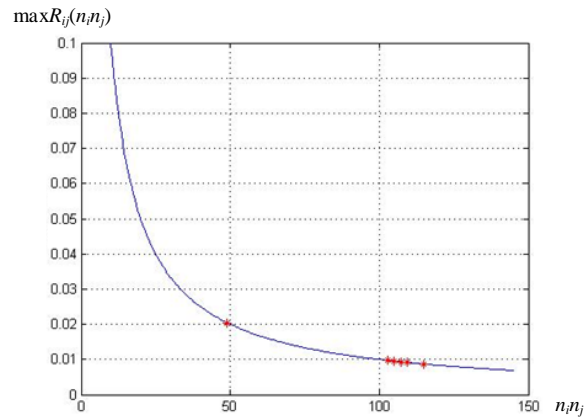


Рис. 2. Крива значень максимальних викидів бічних пелюсток ФВК залежно від кількості імпульсів у послідовностях

Рівень максимальних викидів бічних пелюсток ФВК досліджуваних ансамблів задовольняє умову мінімальної подоби. Застосування наведеного методу формування ансамблів сигналів, отриманих шляхом перестановки часових інтервалів з урахуванням взаємокореляційних властивостей сегментів на основі центрованого ряду дозволяє сформуванню нових ансамблів складних сигналів більшого об'єму з кращими взаємокореляційними властивостями відносно вихідних послідовностей.

**Третій розділ** присвячено вирішенню другого та четвертого завдань дисертаційних досліджень, а саме розробленню методу перестановок частотних елементів сигналів шляхом повного перебору та подальшого розвитку методу формування ансамблів складних сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємокореляційними властивостями, отриманими шляхом смугової фільтрації з перестановками.

Суть методу перестановок частотних елементів сигналів шляхом повного перебору полягає в порівнянні значень максимальних викидів бічних пелюсток ФВК сигналів, утворених при частотній фільтрації різних вихідних послідовностей в різних смугах частот. Значення коефіцієнта зіставлення максимальних викидів бічних пелюсток ФВК сигналів визначається інтегралом в діапазоні від  $F_n$  до  $F_b$  добутку  $i$ -го та  $j$ -го сигналів:

$$R_{ij\max}(\Delta f) = \int_{F_n}^{F_b} s_i(\Delta f) \cdot s_j(\Delta f - \Delta) d\Delta f, \quad (5)$$

де  $\Delta f$ -смуга фільтрації;  
 $\Delta$ -крок інтегрування.

При цьому отримані значення мають відповідати умові мінімальної подоби.

$$R_{ij\max} \leq \frac{2 \dots 5}{\sqrt{B}}. \quad (6)$$

Перестановка сигналів відбувається шляхом повного перебору. Для прикладу задамося набором з чотирьох частотних елементів  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  та  $R_4$ , отриманими при застосуванні смугової фільтрації у різних проміжках спектру до послідовностей з покращеними взаємокореляційними характеристиками. У

результаті отримаємо всі можливі комбінації перестановок:  $R_{12}$ ,  $R_{13}$ ,  $R_{14}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{24}$  та  $R_{34}$ . Такий спосіб перестановок можна описати як:

$$\sum R_{ij} = \frac{R_{ij}^2 - R_{ij}}{2}. \quad (7)$$

Формування центрованого ряду відбувається на основі розрахунку середнього значення максимальних викидів бічних пелюсток ФВК сигналів. При цьому, якщо у процесі розрахунків виявляється сигнал, взаємодія з яким порушує відповідність умови (6), то його виключають із масиву значень. На основі використання значень центрованого ряду складають ансамблі сигналів з покращеними взаємокореляційними властивостями та оптимальним порядком перестановок елементів сигналів. Часову діаграму сигналу, отриманого за допомогою перестановок частотних елементів вихідної послідовності шляхом повного перебору, подано на рис. 3, функцію автокореляції (ФАК) і нормовану ФВК сигналу – на рис. 4, а та б відповідно.

При порівнянні значень ФВК сигналів, отриманих за допомогою перестановок частотних елементів вихідної послідовності шляхом повного перебору з результатами на основі розрахунків у розділі 2, спостерігається незначне погіршення взаємокореляційних властивостей сигналів, оскільки величина значень максимальних викидів бічних пелюсток ФВК сигналів залежить від кількості смуг фільтрації.

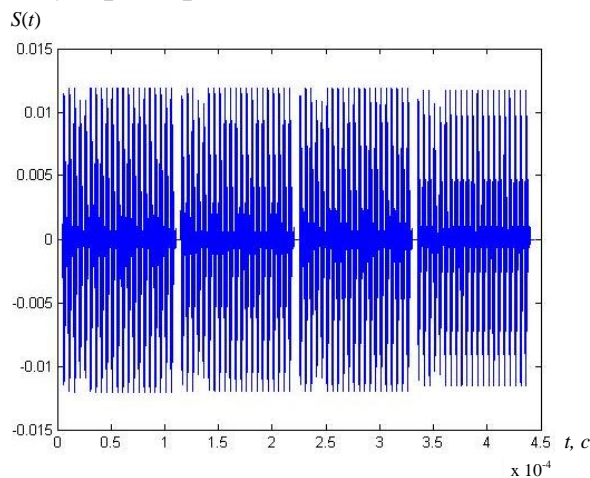


Рис. 3. Часова діаграма сигналу, отриманого за допомогою перестановок частотних елементів вихідної послідовності шляхом повного перебору

Значення максимальних викидів бічних пелюсток ФВК сигналів при виділенні чотирьох частотних елементів не перевищує  $3/\sqrt{B}$ , що відповідає вимозі щодо рівня взаємної кореляції сигналів одного ансамблю. Утворені сигнали мають низький рівень кореляції за рахунок перестановки частотних елементів шляхом повного перебору з різних вихідних послідовностей і зміни ширини смуг фільтрації, за рахунок чого можна формувати на їхній основі ансамблі сигналів зі збільшеними об'ємами порівняно з ансамблями відомих сигналів.

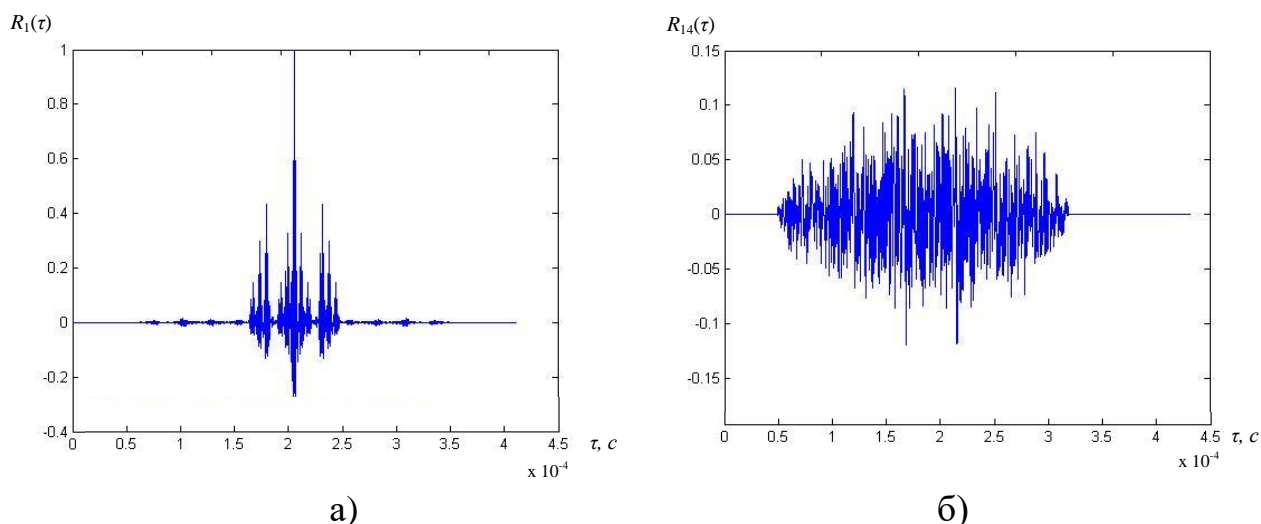


Рис. 4. ФАК сигналу на основі перестановок частотних елементів вихідної послідовності шляхом повного перебору (а); нормована ФВК сигналу на основі перестановок частотних елементів вихідної послідовності шляхом повного перебору (б)

Отримав подальшого розвитку метод формування ансамблів складних сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємкореляційними властивостями, отриманими шляхом смугової фільтрації з перестановками. Суть методу полягає у застосуванні смугової фільтрації до псевдовипадкових послідовностей з низькою взаємодією в часовій області. Під час аналізу частотний діапазон таких послідовностей розбивається на рівні смуги. Визначення оптимальної смуги фільтрації сигналів відбувається на основі аналізу залежності максимальних значень ФВК  $R_{ij}$  від кількості елементів у задіяних послідовностях  $\sqrt{n_i n_j}$  і ширини смуги фільтрації  $\Delta F$ .

Оцінювання кількості смуг фільтрації відбувається за рахунок коефіцієнта використання частотного спектра  $k_s$ , який визначається як:

$$k_s = \frac{\Delta F}{\Delta f}, \quad (8)$$

де  $\Delta F$  – ширина основної пелюстки спектра псевдовипадкової послідовності з низькою взаємодією в часовій області;

$\Delta f$  – ширина смуги фільтрації псевдовипадкових послідовностей.

Виділення ділянок спектра із загальної смуги частот відбувається за допомогою фільтра Чебишева першого роду. Аналіз сигналів, отриманих за допомогою виділення смуг частот, показує їх відмінність за формою один від одного при виконанні умови мінімальної подоби сигналів. Далі сигнали, обмежені за частотою, переносяться в спільну область частот.

Виконання частотного перенесення можна подати як аналітичний вираз:

$$F^{-1}\{X(\omega - \omega_0)\} = s(t)e^{-j\omega_0 t} \quad (9)$$

де  $s(t)$ -сигнал, отриманий у результаті частотної фільтрації;

$X$  – частотний спектр сигналу;

$\omega_0 t$  – фазовий зсув.

Для отриманих сигналів проводять обчислення значень викидів бічних пелюсток ФВК у відповідності до виразу:

$$R_{ij}(\tau) = \int_{-T}^T s_i(t) s_j(t - \tau) dt. \quad (10)$$

Внаслідок різної кількості імпульсів у послідовностях, і оскільки енергії неперервних сигналів будуть відрізнятися для оцінювання ФВК слід проводити нормування величини енергії сигналів за виразом:

$$s_{i_{норм}}(t) = \frac{s_i(t)}{\sqrt{E_i}}. \quad (11)$$

Розрахунок ФВК виконують для всіх можливих пар сигналів. З отриманих елементів складають сигнали, першу позицію ряду займає елемент, у якому ФВК має середнє значення, наступні елементи визначають на основі аналізу значень ФВК з застосуванням оптимального порядку перестановок, у результаті яких обирають варіант з кращими значеннями взаємкореляційних властивостей утворених сигналів.

Для демонстрації працездатності запропонованого методу обрана вихідна вибірка, яка складається з 50 послідовностей з кількістю імпульсів у межах від 23 до 512. Тривалість послідовностей –  $T \approx 1.2$  мс, тривалість імпульсів –  $\tau_i = 10$  нс. Смугу фільтрації було обрано на проміжку від 5 до 200 кГц з кроком 2 кГц. Вид сигналів, отриманих за рахунок смугової фільтрації в різних частотних діапазонах з подальшим перенесенням до спільної області частот представлено на рис. 5 а та б.

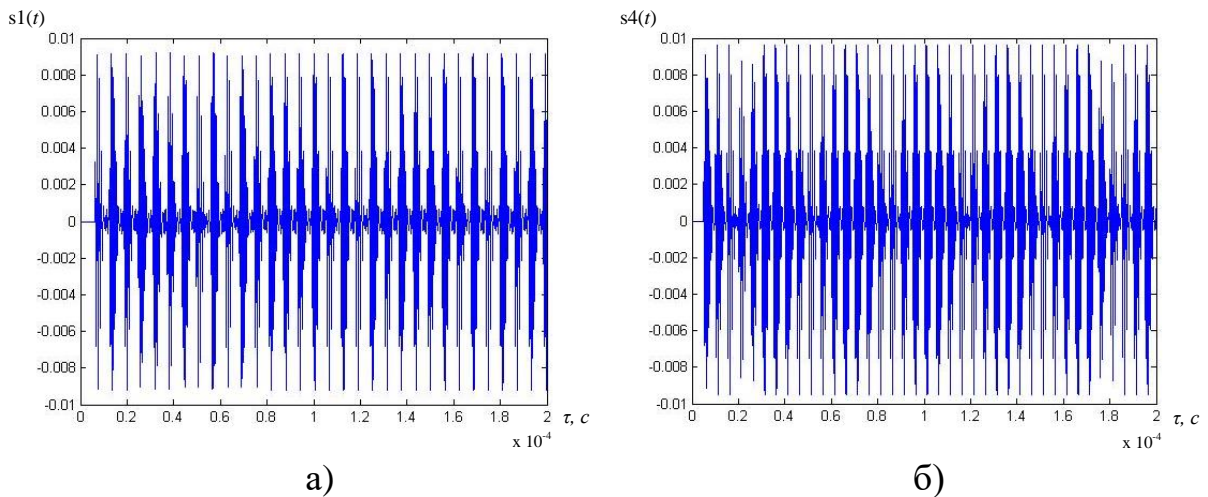


Рис. 5. Часові діаграми: а) – сигналу, отриманого за рахунок смугової фільтрації в діапазоні  $f_1$  з подальшим перенесенням до спільної області частот; б) – сигналу, отриманого за рахунок смугової фільтрації в діапазоні  $f_2$  з подальшим перенесенням до спільної області частот

На основі аналізу отриманих сигналів можна зробити висновок, що тривалість імпульсів збільшується пропорційно зменшенню смуги частот сигналу, що призводить до погіршення взаємкореляційних властивостей сегментів сигналів. ФВК таких сигналів представлена на рис. 6.

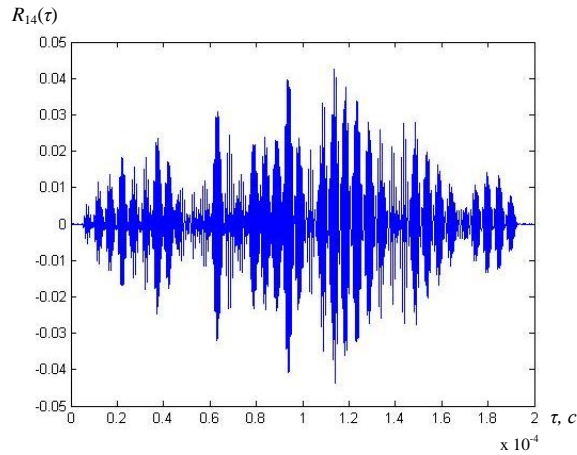


Рис. 6. ФВК сигналів, отриманих за рахунок смугової фільтрації в частотних діапазонах  $f_1$  та  $f_2$  з подальшим перенесенням до спільної області частот

Для даного випадку значення максимальних викидів бічних пелюсток ФВК сигналів при ширині смуги фільтрації 0,2 % основної пелюстки спектра послідовності з покращеними взаємкореляційними властивостями не перевищує значення  $R_{\max} \leq 3/\sqrt{B}$ , що повною мірою задовольняє вимогу мінімальної подоби. Сигнали, отримані за рахунок застосування методу перестановок елементів з різних послідовностей і в різних смугах частот, відрізняються мінімальним значенням кореляції, що дає можливість формувати на їхній основі ансамблі сигналів з великими об'ємами, які перевищують об'єми ансамблів вже відомих методів. На рис. 7 а та б представлено статистичні характеристики досліджуваних сигналів.

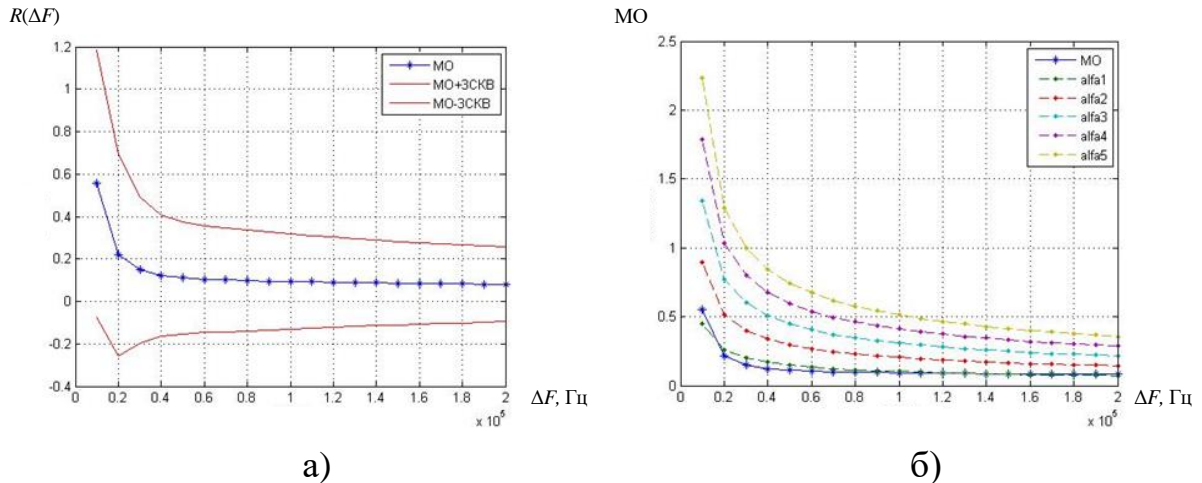


Рис. 7. Статистичні характеристики: а) – залежності математичного очікування значень максимальних викидів бічних пелюсток ФВК з урахуванням середньоквадратичного відхилення від смуги частот; б) – математичного очікування значень максимальних викидів бічних пелюсток ФВК, при різних значеннях  $\alpha$ , в залежності від смуги частот

У загальному випадку математичного очікування значень максимальних викидів бічних пелюсток ФВК не перевищує  $3/\sqrt{B}$  при смузі фільтрації до 0,2 % загальної смуги частот вихідних послідовностей. Отже, при заданих

обмеженнях, оптимальним значенням смуги фільтрації буде величина, що дорівнює 0,2 % загальної смуги частот вихідних послідовностей.

Кількість ансамблів сигналів, які можна отримати, буде визначатися значенням факторіала кількості смуг розбиття, а саме  $(m!-1)$ . Як наслідок, сумарна кількість утворених послідовностей буде визначатися виразом:

$$L_{\phi} = L_{нв} + L_{нв} (a1!-1) + L_{нв} (a1!-1)(a2!-1) + \\ + L_{нв} (a1!-1)(a2!-1)(a3!-1) + L_{нв} \prod_1^m (m!-1) \quad (12)$$

де  $L_{нв}$  – кількість послідовностей у вихідному ансамблі, на основі якого формують решту дочірніх ансамблів;

$m$  – максимальна кількість смуг, на які розбиваються послідовності;

$a1, a2, a3$  – смуги фільтрації.

Об'єм ансамбля сигналів, на основі послідовностей з низькою взаємодією в часовій області, отриманих шляхом смугової фільтрації з перестановками, за інших однакових умов, значно перевищує об'єм ансамбля сигналів на основі нелінійних послідовностей.

Для оцінювання ефективності застосування перестановок частотних елементів сигналів було проведено моделювання ансамблів сигналів, у результаті якого отримано граничні значення кількості утворених сигналів і побудовано їхні залежності від ступеня перетворення – кількості часових інтервалів розбиття (смуг частот).

Ансамблі сигналів, на основі послідовностей з низькою взаємодією в часовій області, отриманих шляхом смугової фільтрації з перестановками, мають об'єм, що на порядки перевищує об'єм ансамблів сигналів на основі вихідних нелінійних послідовностей і сигналів на основі послідовностей з перестановками в часовій області. Залежності об'ємів ансамблів сигналів від кількості імпульсів і кількості перестановок часових інтервалів представлені на рис. 8 та 9 відповідно.

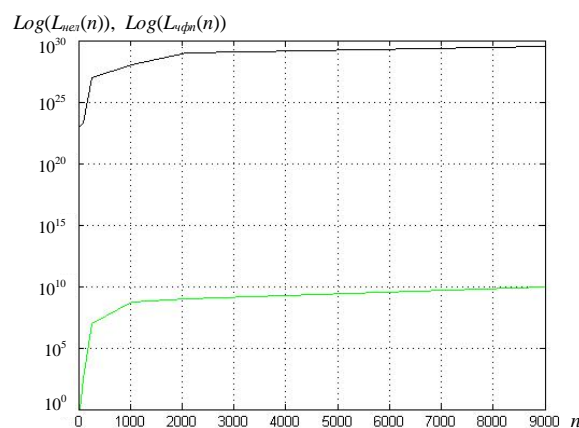


Рис. 8. Крива залежності об'єму ансамбля сигналів на основі нелінійних послідовностей та ансамбля сигналів на основі послідовностей з низькою взаємодією в часовій області, отриманих шляхом смугової фільтрації з перестановками, від кількості імпульсів

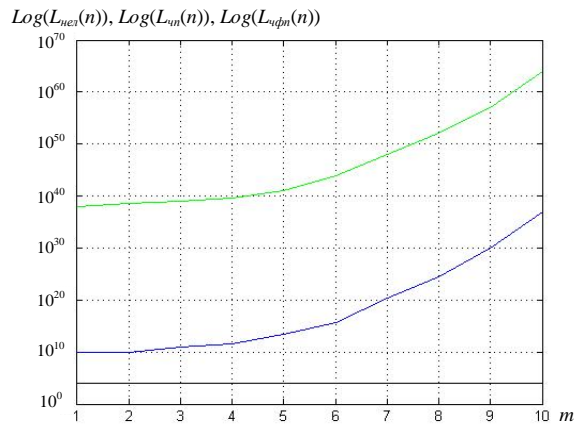


Рис. 9. Крива залежності об'єму ансамбля сигналів на основі вихідних нелінійних послідовностей, послідовностей з перестановками у часовій області та послідовностей, які отримані шляхом смугової фільтрації з перестановками від кількості перестановок часових інтервалів (смуги фільтрації)

Таким чином застосування смугової фільтрації в різних областях спектра з наступним перенесенням сигналів до загальної смуги і застосуванням перестановок отриманих частотних елементів можна значно збільшити об'єм ансамблів складних сигналів за рахунок допустимого зниження взаємкореляційних властивостей.

У **четвертому розділі** проведено оцінювання ефективності застосування синтезованих ансамблів складних сигналів для когнітивних телекомунікаційних систем. Розроблено програмну реалізацію методів формування ансамблів складних сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємкореляційними властивостями в часовій і частотній областях і досліджено кореляційні та ансамблеві властивості отриманих сигналів, таким чином вирішено п'яте та шосте завдання дисертаційної роботи.

Програмна реалізація методів формування ансамблів складних сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємкореляційними властивостями в часовій та частотній областях потребує розроблення методу вибору оптимальних параметрів сигналів, а саме ширини смуги фільтрації, граничних значень максимальних викидів бічних пелюсток ФВК сигналів і вибору типу кодової послідовності.

Для вибору параметрів сигналів необхідно: визначити смугу обмеження спектрів при заданих значеннях максимальних викидів бічних пелюсток ФВК залежно від кількості елементів в задіяних послідовностях, оптимальну кількість смуг фільтрації спектрів послідовностей і частот зсуву для перенесення отриманих частотних елементів до спільної області частот, оптимальний порядок перестановок частотних елементів з урахуванням вимог до значень максимальних викидів бічних пелюсток ФВК, після чого можна сформувані ансамблі сигналів на основі розрахованих параметрів. Оптимальна ширина смуги фільтрації визначається на основі аналізу залежності значень максимальних викидів бічних пелюсток ФВК від кількості елементів в задіяних



послідовностях і ширини смуги обмеження спектрів  $R_{\max}(\sqrt{n_i n_j}, \Delta F)$  із застосуванням обмежень  $R_{\max \text{ пор}}(\sqrt{n_i n_j}, \Delta F)$ , яка представлена на рис. 10.

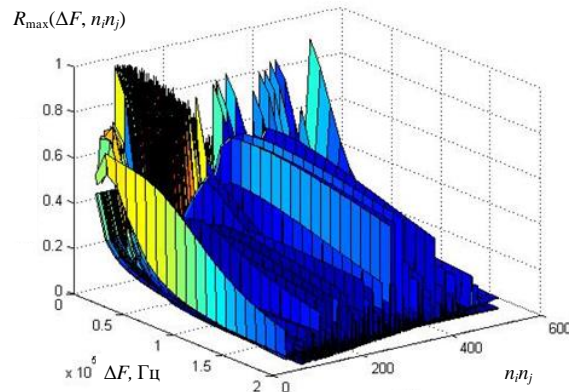


Рис. 10. Визначення оптимальної смуги фільтрації спектрів послідовностей з покращеними взаємкореляційними властивостями

Для виконання вимоги обмеження  $R_{\max \text{ пор}}(\sqrt{n_i n_j}, \Delta F) = 0,2$  оптимальну ширину смуги фільтрації потрібно обирати рівною  $\Delta F = 0,2$  % загальної смуги обмеження спектрів послідовностей при заданих значеннях  $\sqrt{n_i n_j}$ .

Задача вибору типу кодової послідовності для когнітивних телекомунікаційних систем на основі множинного доступу можна виразити як:

$$R_{\max} = \max\{R_{\max \text{ФВК}}, R_{\max \text{ФАК}}\} = \min \quad (13)$$

де  $R_{\max \text{ФВК}}$  – максимальний рівень викидів бічних пелюсток ФВК;

$R_{\max \text{ФАК}}$  – максимальний рівень викидів бічних пелюсток ФАК.

У результаті програмної реалізації розроблених алгоритмів виконано порівняння взаємкореляційних властивостей відомих сигналів і сигналів, розроблених на основі послідовностей з покращеними взаємкореляційними властивостями, яке наведено на рис. 11 а та б.

У результаті проведеного імітаційного моделювання отримано рівні максимальних викидів бічних пелюсток ФВК сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємкореляційними властивостями, отриманими шляхом смугової фільтрації з перестановками, які сумірні з значеннями відомих сигналів.

При розрахунку об'єму сигналів, які досліджувались, отримано такі результати: розроблені сигнали на основі послідовностей з покращеними взаємкореляційними властивостями, отриманими шляхом смугової фільтрації з перестановками, доцільно застосовувати при довільній кількості абонентів. При цьому смугу фільтрації потрібно обирати в діапазоні від 0,1 до 2 % загальної ширини основної пелюстки спектра послідовності для практичного застосування в когнітивних телекомунікаційних системах.

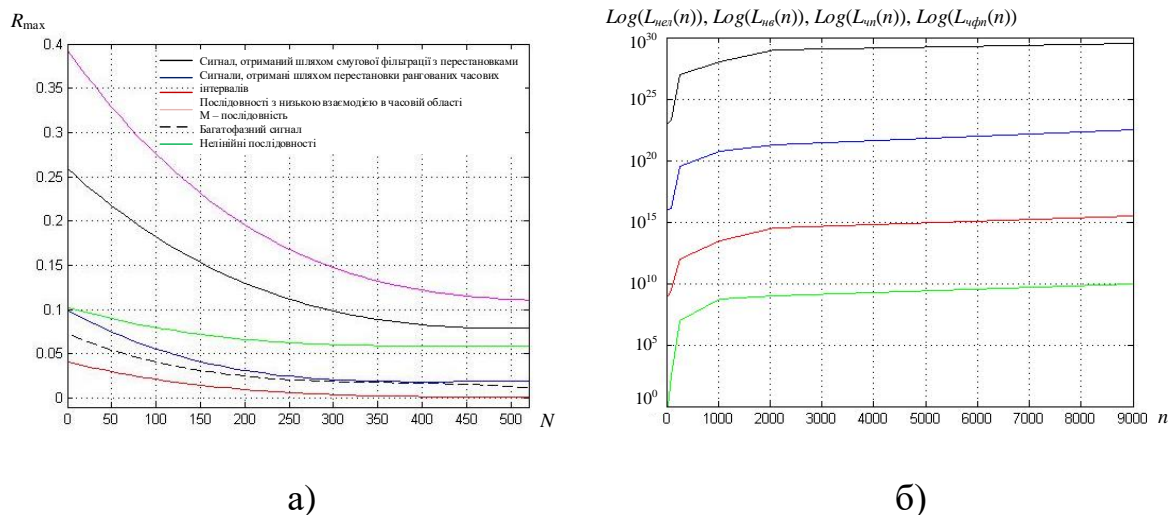


Рис. 11. Порівняльна характеристика: а) – значень максимальних викидів бічних пелюсток ФВК сигналів на основі різних послідовностей; б) – залежності об'єму ансамблів сигналів при зміні кількості імпульсів у послідовностях

У додатках подано програмні продукти, засновані на алгоритмах реалізації розроблених методів за допомогою середовища Matlab, а також документи, що підтверджують практичне значення і впровадження результатів дисертаційної роботи.

## ВИСНОВКИ

Сукупність отриманих у дисертаційній роботі результатів вирішує актуальне науково-прикладне завдання, яке полягає в розробленні методів формування ансамблів складних сигналів для когнітивних телекомунікаційних систем, які дозволяють збільшити об'єм ансамблів при забезпеченні низького рівня ЗМД.

У дисертаційній роботі отримані такі наукові та практичні результати:

1. Проведений аналіз шляхів збільшення об'єму ансамблів складних сигналів для когнітивних телекомунікаційних систем показує, що відомі кодові послідовності і сигнали на їхній основі мають задовільні взаємкореляційні властивості в точці, але при їхньому випадковому тимчасовому зсуві один відносно одного рівень максимальних викидів бічних пелюсток взаємкореляційних функцій зростає більш ніж у 2 ... 5 разів, що призводить до збільшення рівня ЗМД. Виявлено, що взаємкореляційні властивості сигналів однієї системи є основним фактором, який впливає на величину ЗМД в когнітивних телекомунікаційних системах. Відомі методи боротьби з ЗМД не забезпечують зниження їхнього рівня до прийняттого значення при випадковому тимчасовому зсуві. Доведено, що оптимальним є використання ансамблів складних сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємкореляційними властивостями. Обґрунтовано доцільність розроблення методів збільшення об'єму ансамблів складних сигналів на основі послідовностей з низькою взаємодією в часовій і частотній областях.

2. Вперше розроблено метод перестановок частотних елементів сигналів шляхом повного перебору, який дозволяє збільшити об'єм ансамблів складних сигналів в  $m$  раз, де  $m$  – число перестановок частотних елементів. Сигнали, утворені за таким методом, мають низький рівень взаємної кореляції за рахунок перестановки частотних елементів шляхом повного перебору з різних вихідних послідовностей у різних смугах частот і зміни ширини смуг фільтрації.

3. Удосконалено метод формування ансамблів складних сигналів у часовій області, який відрізняється від уже відомих розбиттям послідовностей на часові інтервали з подальшими перестановками на основі центрованого ряду. Сформовані за таким методом сигнали мають низький рівень ЗМД, який визначається значеннями максимальних викидів бічних пелюсток ФВК. Проведені дослідження взаємокореляційних властивостей сигналів, отриманих шляхом перестановки часових інтервалів послідовностей на основі центрованого ряду, показують, що вони задовольняють умову мінімальної подоби і мають кращі, ніж відомі сигнали, взаємокореляційні властивості.

4. Отримав подальшого розвитку метод формування ансамблів складних сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємокореляційними властивостями в частотній області, який відрізняється від уже відомих застосуванням смугової фільтрації до псевдовипадкових послідовностей з низькою взаємодією в часовій області з наступним перенесенням до спільної області частот з подальшими перестановками і дозволяє формувати ансамблі складних сигналів з необхідними рівнями максимальних викидів бічних пелюсток ФВК. Оптимальне значення смуги фільтрації дорівнює 0,2 % від загальної смуги частот вихідних послідовностей. Виявлено, що ансамблі складних сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємокореляційними властивостями, отриманими шляхом смугової фільтрації з перестановками мають гірші взаємокореляційні властивості, ніж сигнали, отримані шляхом перестановки часових інтервалів послідовностей на основі центрованого ряду, через те, що тривалість імпульсів збільшується пропорційно зменшенню смуги частот сигналу, але їхнє значення задовольняє умову мінімальної подоби, і такі сигнали можуть застосовуватися в когнітивних телекомунікаційних системах. Оцінювання ансамблевих властивостей сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємокореляційними властивостями, отриманими шляхом смугової фільтрації з перестановками показує можливість формування ансамблів сигналів значно більшого об'єму по відношенню до ансамблів вихідних послідовностей.

5. На основі запропонованих методів формування ансамблів складних сигналів у часовій і частотній областях розроблено відповідні алгоритми, що лежать в основі реалізованих програмних продуктів на основі середовища моделювання Matlab.

6. Запропоновано спосіб вибору параметрів сигналів, який дозволяє підібрати оптимальні значення для вихідних послідовностей, на основі яких формують ансамблі сигналів збільшеного об'єму з заданими рівнями максимальних викидів бічних пелюсток ФВК з метою застосування в когнітивних телекомунікаційних системах, які використовують технологію

множинного доступу і схильні до впливу ЗМД. Проведено порівняльну характеристику взаємкореляційних властивостей сигналів, у результаті якої виявлено, що сформовані ансамблі сигналів за методом перестановки часових інтервалів послідовностей на основі центрованого ряду мають кращі взаємкореляційні властивості, ніж ансамблі на основі відомих сигналів. При цьому рівень максимальних викидів бічних пелюсток ФВК розроблених сигналів на 7-12 % менше показників відомих сигналів. Проведено порівняльну характеристику ансамблевих властивостей сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємкореляційними властивостями, отриманими шляхом смугової фільтрації з перестановками з відомими сигналами. Отримані результати показують, що сформовані ансамблі сигналів мають більший об'єм (на 16-26 %) порівняно з ансамблями на основі відомих сигналів. Розроблені сигнали доцільно застосовувати при довільній кількості абонентів. При цьому смугу фільтрації слід обирати в діапазоні від 0,1 до 2 % від загальної ширини основної пелюстки спектра послідовностей для практичного застосування в когнітивних телекомунікаційних системах.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

**Статті в наукових фахових виданнях, що входять до переліку, затвердженого ДАК МОН України:**

1. Індик С. В. Аналіз адаптивних алгоритмів стану дискретного каналу за результатами аналізу якості приймання блока даних. Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. Харків: УкрДАЗТ, Вип. 98. 2008. С. 32-37.

2. Indyk S., Lysechko V. The study of ensemble properties of complex signals obtained by time interval permutation. *Advanced Information Systems*. 2020. Vol. 4, № 3. P. 85-88. DOI: 10.20998/2522-9052.2020.3.11.

3. Indyk S., Lysechko V. Method of permutation of intervals, taking into account correlation properties of segments. *Control, navigation and communication system*. 2020. Issue 3 (61). P. 128-130. DOI:10.26906/SUNZ.2020.3.

4. Indyk S. V., Lysechko V. P., Zhuchenko O. S., Kitov V. S. The formation method of complex signals ensembles by frequency filtration of pseudo-random sequences with low interaction in the time domain. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2020. Issue 4 (55). P. 7-15. DOI 10.15588/1607-3274-2020-4-1. **[WEB OF SCIENCE]**

5. Індик С. В., Лисечко В. П. Дослідження ансамблевих властивостей складних сигналів, отриманих за рахунок частотної фільтрації псевдовипадкових послідовностей з низькою взаємодією у часовій області. Збірник наукових праць. Харків: ХУПС ім. І. Кожедуба. 2020. Вип. 4 (66). С. 46-50. DOI: 10.30748/zhups.2020.66.06

6. Indyk S. V., Lysechko V. P. The formation method of complex signals ensembles with increased volume based on the use of frequency bands. *Control, navigation and communication system*. 2020. Issue 4 (62). P. 119-121.

### Статті у збірниках за матеріалами конференцій:

1. Індик С. В., Лисечко В. П. Вплив частотної фільтрації на взаємодію характеристик ансамблів складних сигналів. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: тези доповідей VII Міжнар. наук.-техніч. конф. (Полтава, 20 - 21 квітня 2017 р.)* Полтава: ПНТУ. 2017. С. 6.

2. Індик С. В., Лисечко В. П. Дослідження кореляційних характеристик ансамблів складних сигналів отриманих за рахунок перестановок частотних ділянок псевдовипадкових послідовностей. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: тези доповідей 33-ї Міжнар. наук.-практ. конф. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті (Харків, 30 жовтня 2020 р.)*. Харків: УкрДУЗТ, 2020. Вип. 3. С. 24-25.

3. Індик С. В., Лисечко В. П. Статистичний аналіз властивостей ансамблів складних сигналів отриманих за рахунок перестановок ранжованих часових інтервалів. *Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: тези доповідей X Міжнар. наук.-практ. конф., (Запоріжжя, 07–09 жовтня 2020 р.)*. Запоріжжя: НУЗП. 2020. С. 29-30.

4. Індик С. В., Лисечко В. П. Метод формування ансамблів складних сигналів за рахунок аналізу частотної вибірки смуг спектру псевдовипадкових послідовностей з малою енергетичною взаємодією. *Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах сучасності: тези доповідей Всеукр. наук.-практ. конф., (Львів, 20 листопада 2020 р.)*. Львів: НАСВ. 2020. С. 154-155.

5. Індик С. В., Лисечко В. П. Аналіз статистичних характеристик ансамблів складних сигналів з покращеними взаємодіючими властивостями. *Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика: тези доповідей VI Всеукр. наук.-практ. конф., (Полтава, 06 листопада 2020 р.)*. Полтава: НУПШ. 2020. С. 193-166.

### АНОТАЦІЯ

**Індик С. В. Методи формування ансамблів складних сигналів для когнітивних телекомунікаційних систем. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. – Український державний університет залізничного транспорту МОН України, Харків, 2021.

Дисертаційне дослідження присвячене розробленню методів формування ансамблів складних сигналів для когнітивних телекомунікаційних систем, які дозволяють збільшити об'єм ансамблів при забезпеченні низького рівня завад множинного доступу.

Вперше розроблено метод перестановок частотних елементів сигналів шляхом повного перебору, який дозволяє збільшити об'єм ансамблів складних сигналів за рахунок повного перебору сигналів, отриманих на основі виділення частотних елементів з подальшим вибором оптимального варіанта перестановок.

Удосконалено метод формування ансамблів складних сигналів, отриманих шляхом перестановки часових інтервалів послідовностей на основі центрованого

ряду, який відрізняється від відомих формуванням центрованого ряду на основі середнього значення максимальних викидів бічних пелюсток ФВК, застосування якого дозволяє знизити рівень завад множинного доступу і збільшити об'єм ансамбля.

Отримав подальшого розвитку метод формування ансамблів складних сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємкореляційними властивостями, отриманими шляхом смугової фільтрації з перестановками, реалізований на основі виділенні зі спектра послідовностей рівних смуг з наступним перенесенням до спільної області частот і подальшим застосуванням перестановок, що дозволяє значно збільшити об'єм ансамблів складних сигналів, при цьому взаємкореляційні властивості сигналів задовольняють умову мінімальної подоби, і такі сигнали можуть застосовуватися в когнітивних телекомунікаційних системах.

*Ключові слова:* когнітивна телекомунікаційна система, складний сигнал, завада множинного доступу, максимальні викиди бічних пелюсток функції взаємної кореляції, об'єм ансамбля.

## ABSTRACT

Indyk S. V. The formation methods of complex signal ensembles for cognitive telecommunication systems. – Qualifying scientific paper on the rights of the manuscript.

The dissertation submitted in fulfilment of the candidate of technical sciences degree on specialty 05.12.02 «Telecommunication systems and networks». – Ukrainian State University of Railway Transport of Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation research is devoted to the development of the formation methods of complex signal ensembles for cognitive telecommunication systems, which allow increasing the volume of ensembles while providing a low level of multiple access interference.

For the first time, a method of permutation of frequency elements of signals by complete search was developed, which allows increasing the volume of complex signals ensembles by  $m$  times, where  $m$  is the number of permutations of frequency elements. The essence of the method is to compare the values of the maximum emissions of the side lobes of the CCF of signals, formed by frequency filtering of different output sequences in different frequency bands. If in the process of calculations, a signal is detected, the interaction with which violates the compliance of the condition of minimum similarity, it is excluded from the array of values. Permutation occurs by complete search. Next, a centered series of values is formed based on the calculation of the average value of the maximum emissions of the side lobes of the CCF of signals. The signals generated by this method have a low level of cross-correlation due to the permutation of frequency elements by complete search from different output sequences in different frequency bands and changes in the width of the filter bands.

Improved method of forming of complex signals ensembles obtained by permutation of time intervals of sequences based on a centered series, which differs from the known in formation of a centered series based on the average value of maximum emissions of side lobes of CCF, which reduces the level of multiple access interference and increase the ensemble volume. The signals generated by this method have a low level of MAI, which is determined by the values of the maximum emissions of the side lobes of the CCF. Studies of the intercorrelation properties of signals obtained by permutation of time intervals of sequences based on a centered series show that they satisfy the condition of minimum similarity and have better, in relation to known signals, intercorrelation properties.

The formation method of complex signals ensembles, based on sequences with improved intercorrelation properties, which are obtained by bandpass filtering with permutations, implemented on the basis of selection from the spectrum of sequences of equal bands with subsequent transfer in the common frequency domain of the wireless high-speed data transmission standard and the subsequent application of permutations, which allows you to form ensembles of complex signals with the required levels of maximum emissions of the side lobes of CCF. The optimal value of the filter band is equal to 0.2 % of the total frequency band of the output sequences, while the correlation properties of the signals satisfy the condition of minimum similarity and such signals can be used in cognitive telecommunications systems.

The comparative characteristic of intercorrelation properties of signals is studied, as a result of which it is revealed that the formed signal ensembles, by the method of permutation of time intervals of sequences on the basis of the centered series, have better intercorrelation properties than ensembles on the basis of known signals. The level of maximum emissions of the side lobes of the CCF of the developed signals is 7-12 % less than the known signals. The comparative characteristic of ensemble properties of signals, on the basis of sequences with the improved intercorrelation properties which are received by a bandpass filtering with permutations with known signals is studied. The obtained results show that the formed ensembles of signals have a larger volume (by 16-26 %) in comparison with ensembles based on known signals. Developed signals should be used with any number of subscribers. The filter band should be selected in the range from 0.1 to 2 % of the total width of the main lobe of the sequence spectrum for practical use in cognitive telecommunications systems.

**Keywords:** cognitive telecommunication system, complex signal, multiple access interference, the maximum emission of the side lobes of CCF, ensemble volume.

ІНДИК СЕРГІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.391

**МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ АНСАМБЛІВ СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ  
КОГНІТИВНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Підписано до друку 26.01.2021 р.  
Формат паперу 60x84 1/16. Друк цифровий.  
Папір офсетний. Обсяг 1 ум. друк. арк. Наклад 100 прим.  
Зам. № 20 від 9.03.2021 р. Ціна договірна.

---

Надруковано у копії-центрі «PandaPrint»  
(ФО-П Панарін В.С., ЄДРПОУ 3332303034)  
61050, м. Харків, м. Фейербаха, 11-б