

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

КЛОБУКОВА ЛЮДМИЛА ПЕТРІВНА

УДК 621.396.41:51-74

**МЕТОД КВАЗІОРТОГОНАЛЬНОГО ЧАСТОТНОГО РОЗДІЛЕННЯ КАНАЛІВ В
КОГНІТИВНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ**

Спеціальність 05.12.02 – «Телекомунікаційні системи та мережі»

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2023

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі засобів захисту інформації факультету кібербезпеки, комп'ютерної та програмної інженерії Національного авіаційного університету міністерства освіти і науки України

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Козловський Валерій Валерійович,
завідувач кафедри засобів захисту інформації
Національного авіаційного університету.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Віноградов Микола Анаталійович,
професор кафедри комп'ютерних інформаційних
технологій
Національного авіаційного університету,

кандидат технічних наук, доцент
Руденко Наталія Вікторівна,
завідувач кафедри мобільних та відеоінформаційних
технологій
Державного університету телекомунікацій.

Захист дисертації відбудеться «30» серпня 2023р. о 13.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.19 у Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, проспект Любомира Гузара, 1.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою 03058, м. Київ, проспект Любомира Гузара, 1.

Автореферат розісланий «28» липня 2023 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.062.19
доктор технічних наук, доцент



О.Л. Туровський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність і обґрунтування вибору теми дослідження. Сучасними тенденціями розвитку засобів телекомунікаційних систем є напрями, що стосуються розробки і впровадження цифрових систем, які ведуть боротьбу з внутрішньосистемними завадами. Це обумовлено простотою розгортання, обслуговування та технічної експлуатації таких систем, надзвичайною зручністю розширення (*extensibility*) та масштабування (*scalability*).

Однак очевидні переваги безпроводових систем діалектично приводять до певних недоліків. Найбільш серйозними недоліками безпроводових радіосистем у порівнянні з проводовими системами є низька завадозахищеність та обмежений радіо ресурс. Подолання цих недоліків можливо на шляхах створення нових сигнально-кодових конструкцій, що потребує залучення фундаментальних методів теорії радіотехнічних контурів та сигналів.

Використання перспективних сигнально-кодових конструкцій та вибір оптимальних режимів функціонування підтримує якість зв'язку на достатньому рівні при наявності впливу різних типів завад. Розробка технічних засобів і методів завадозахисної передачі дискретних повідомлень – це одні з першорядних напрямків реалізації Концепції створення державної інтегрованої інформаційної системи.

Наряду з цим, однією з основних проблем функціонування подібних систем передачі інформації є виникнення завад внутрішньосистемного типу. Вони з'являються при одночасній експлуатації радіостанцій різних абонентів однієї системи у вигляді взаємного заважаючого впливу сигналів через неідеальність їх взаємкореляційних характеристик і значно впливають на ефективність використання частотного ресурсу та якість зв'язку між користувачами в загальній смузі частот.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню задачі спільного використання багатьма користувачами когнітивного радіо спектральних "білих плям". Дане оптимізаційне рішення щодо підвищення ефективності використання частотного ресурсу може призвести до виникнення небажаного явища, яке має назву «частотні колізії», тобто одночасного зайняття двома вторинними користувачами однієї і тієї ж вільної смуги частот. Це може викликати у тому числі і появу внутрішньосистемних завад високого рівня.

Завдяки методу квазіортогонального частотного мультиплексування піднесучих, в порівнянні з ортогональним мультиплексуванням, збільшується ефективність використання частотного ресурсу системи зв'язку за рахунок паралельного використання різними абонентами однієї мережі різних варіантів розподілу піднесучих частот. Використання нелінійного розподілу піднесучих частот значно підвищує пропускну здатність каналу, при цьому якість передачі інформації незначно погіршується, що також потребує розробки відповідних методів оцінювання, також на підґрунті фундаментальної теорії сигналів.

Таким чином, актуальність теми досліджень визначається необхідністю розробки нових методів формування ансамблів сигналів з покращеними взаємкореляційними властивостями для систем множинного доступу на основі когнітивних радіомереж з метою збільшення їх обсягу при незмінному рівні завад множинного доступу. Тому задача дослідження та розробки нових методів з адаптацією до змін параметрів та стану мережі є **актуальною**.

Зв'язок з науковими програмами, планами і темами.

Дослідження в дисертаційній роботі безпосередньо пов'язані з наступними положеннями:

Концепція Національної програми інформатизації, схвалена Законом України «Про Концепцію Національної програми інформатизації» від 4 лютого 1998 р., № 75/98-ВР (із змінами, внесеними згідно із Законами N 3421-IV (3421-15) від 09.02.2006, N 3610-VI (3610-17) від 07.07.2011, 406-VII (406-18) від 04.07.2013).

Концепція розвитку телекомунікацій в Україні, схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 7 червня 2006 р., N 316-р (із змінами, внесеними згідно з Розпорядженням КМ N 1612-р (1612-2008-р) від 27.12.2008).

Рекомендації щодо «Реформ галузі інформаційно-комунікаційних технологій та розвитку інформаційного простору України».

Постанова про затвердження Правил надання та отримання телекомунікаційних сервісів від 11 квітня 2012 р. No 295 (із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ No 251 від 29.04.2015).

Державна науково-технічна програма «Створення перспективних телекомунікаційних систем та технологій».

Стратегія сталого розвитку "Україна–2020", схвалена Указом Президента України від 12 січня 2015 року No 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.

Отримані в дисертаційній роботі наукові результати були використані в науково-дослідній роботі яка виконувалась у Національній академії Національної гвардії України НДР № 0116U004048 «Поляна 3».

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка методу підвищення ефективності використання когнітивних радіомереж за рахунок застосування квазіортогонального доступу на піднесучих частотах.

Для досягнення поставленої мети вирішено загальну науково-прикладну задачу, яка полягає в розробці методів підвищення ефективності використання частотного ресурсу в когнітивних радіомережах. Для цього в дисертаційній роботі розв'язуються наступні **часткові задачі досліджень**:

1. Провести аналіз загальних характеристик когнітивних радіосистем.
2. Розробити метод квазіортогонального частотного розділення каналів.
3. Розробити метод визначення збігів позицій частотних піднесучих при QOFDM.
4. Розробити імітаційну модель процесу формування частотних планів для QOFDM.
5. Виконати дослідження взаємкореляційних властивостей сформованих частотних планів на основі QOFDM.

Об'єктом дослідження є процес формування ансамблів складних сигналів для когнітивних радіомереж.

Предметом дослідження є моделі та методи синтезу ансамблів складних сигналів на основі QOFDM.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі застосовувалися методи системного аналізу та синтезу, теорії математичної статистики та кореляційного аналізу, теорія радіотехнічних кіл та сигналів, моделювання та розрахунки на ЕОМ. У роботі використані теоретичні основи організації мереж з частотним розділенням каналів.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Удосконалено метод квазіортогонального доступу на піднесучих частотах, який базується на неортогональному використанні частотних смуг підканалів. Метод дозволяє значно знизити кількість появи частотних колізій та дозволяє збільшити абонентську ємність когнітивної радіосистеми за рахунок паралельної роботи субканалів в загальній смузі частот, кожен з яких має свою кількість абонентів.

2. Вперше розроблено метод визначення співпадаючих частотних позицій піднесучих для квазіортогонального доступу на піднесучих частотах (QOFDM). Використання методу дозволяє спростити процес формування частотних планів і зменшити рівень внутрішньосистемних завад в системах когнітивного радіо, що виникають при одночасному використанні багатьма користувачами одних і тих же частотних смуг.

3. Удосконалено метод отримання функції OFDM-сигналу з використанням методу Фейєра, підсумовуванням середніх арифметичних сум ряду. Метод дає можливість розрахувати часткові суми сигнальної функції, а також провести порівняльний аналіз різних сигнальних функцій за критеріями енергетичної та спектральної ефективності.

4. Вперше розроблено імітаційну модель процесу формування ансамблю частотних планів для QOFDM, яка, на відміну від існуючих, дозволяє визначити ширину підканалів в частотних планах ансамблів складних сигналів з урахуванням їх кількості. Це дозволяє синтезувати ансамблі складних сигналів з низькою взаємодією в частотній області.

Новизна отриманих результатів підтверджується відсутністю розроблених моделей та методів в існуючих технологіях забезпечення вимог QoS в телекомунікаційних системах. Отримані наукові результати в сукупності є розвитком стандарту IEEE 802.20 та спрямовані на підвищення ефективності використання частотного ресурсу вторинними користувачами в когнітивних радіомережах.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1) Практичне використання розробленого методу квазіортогонального частотного розділення каналів з використанням нелінійного розподілу піднесучих частот дає можливість істотно підвищити пропускну спроможність когнітивної радіосистеми в n разів, де n – це кількість частотних планів в ансамблі, за рахунок паралельного використання різними абонентами однієї мережі різних варіантів розподілу піднесучих частот.

2) Використання розробленого методу визначення співпадаючих частотних позицій в алгоритмі формування ансамблю частотних планів дозволяє спростити процес формування частотних планів і зменшити рівень внутрішньосистемних завад, що виникають при одночасному використанні багатьма користувачами одних і тих самих частотних смуг до величини порядку 5%.

3) За допомогою розрахунків доведено, що завдяки згладжуванню з використанням ядра Фейєра форма відновленого сигналу наближається до гаусівської, яка є найбільш прийнятною для оптимального розподілу енергії сигналу за часом та частотою. Доведено, що метод є корисним для відновлення сигналів по обмеженому числу членів ряду, та ядро Фейєра грає роль інструменту забезпечення спектральної ефективності сигналів.

4) Розроблені імітаційні моделі можна використовувати для оцінки рівня внутрішньосистемних перешкод між різними частотними планами утвореними на основі квазіортогонального доступу на піднесучих частотах при зміні ширини підканалів та кількості піднесучих. Показано ефективність збільшення ширини смуги частот до $\Delta F \geq 20$ МГц, при чому величина взаємкореляційного впливу між частотними планами знаходиться в межах допустимих 10% .

Розрахована залежність математичного очікування максимальних викидів бічних пелюсток ВКФ сигналів від зміни значень ширини підканалів в межах довірчого інтервалу 3σ дозволяє оцінити можливості підвищення об'єму ансамблів сигналів при низькій взаємодії в частотній області і впливає на процес вибору параметрів таких сигналів.

Отримані в роботі результати знайшли практичне впровадження та використання в галузі радіозв'язку.

Теоретичні результати і висновки доведені до конкретних алгоритмів і представлені в графічних інтерпретаціях, доступних для аналізу і дослідження. Результати теоретичних досліджень характеристик та властивостей складних сигналів, утворених на основі квазіортогонального доступу доведені до конкретних аналітичних виразів. Отримані результати досліджень можуть бути використані при формуванні частотних планів частотного розділення каналів для когнітивних радіомереж.

Достовірність отриманих результатів підтверджується відсутністю протиріч з основними положеннями теорії інформації, теорії оптимізації, теорії математичного програмування, а також збіжністю отриманих результатів із даними експериментальних досліджень та результатами математичного моделювання

Особистий внесок здобувача. Дисертаційне дослідження проведено дисертантом самостійно. Основні теоретичні положення та розробки, що характеризують наукову новизну дослідження, теоретичне і практичне значення його результатів, одержані дисертантом особисто.

В роботах, що були опубліковані у співавторстві, здобувачеві належить: [1] - проведено статистичний аналіз кореляційних властивостей комплексних сигналів, сформованих на основі квазіортогонального доступу на піднесучих частотах; [2] – запропоновано критерії вибору спектрально-ефективних сигналів у безпроводових інформаційних мережах; [3] - вирішена проблема проектування високоякісних монолітних НВЧ пристроїв; [4] - розроблено методи аналізу складених сигналів з довільним вибором частоти дискретизації рознесених піднесучих, отримані кількісні оцінки якості відновлення сигналів на приймальній стороні з використанням Евклідових відстаней; [5,14] - розроблено методи формування складених сигналів із довільним частотним рознесенням піднесучих; [6] – удосконалено методи безпроводового зв'язку для дистанційного керування БПЛА; [7] – розглянуто можливості адаптивного керування налаштуваннями систем когнітивного радіо; [8] – запропоновано метод оптимізації спектральної ефективності сигналів безпроводових інформаційнокомунікаційних мереж; [9] – здійснено аналіз асимптотичних характеристик систем багатоканального доступу з частотним мультиплексуванням; [10] – розглянуто питання аналізу похибок відновлення сигналів у цифрових системах зв'язку з ортогональною модуляцією піднесучих з еквідистантним розташуванням; [11,12] – проведено дослідження неоднорідних ліній як перспективного фільтруючого елемента для покращеного дизайну СВЧ пристроїв; [13,16] - розглянемо особливості побудови програмних засобів з відкритим програмним кодом, що відносяться до систем когнітивного радіо; [15,18] – здійснено аналіз процедур віртуалізації та контролю робочих станцій систем когнітивного радіозв'язку; [17] – досліджено динамічні характеристики VLANs у поєднанні з процесом аутентифікації 802.1X, для безпечного доступу до локальної мережі кінцевих пристроїв.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційних досліджень, практичні висновки та рекомендації, одержані в процесі досліджень, були апробовані на 7 наукових конференціях та отримали позитивну оцінку, а саме:

- XIV міжнародна науково-практична конференція «Комп'ютерні системи та мережні технології»;
- XVI міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» (ПРТК-2023);
- XXI Міжнародна науково – практична конференція «Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток»;
- XV Міжнародна науково – практична конференція «Наукова думка інформаційного століття»;
- XII Міжнародна науково – практична конференція «ABIA–2015»;
- XI Міжнародна науково – практична конференція «ABIA–2013»;
- IV Міжнародна науково – практична конференція «ABIA–2011».

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 18 наукових працях, серед яких 7 статей у фахових виданнях, 11 доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний об'єм дисертаційної роботи складає 133 сторінки з них: основна частина 96 сторінок, 49 рисунків, 3 таблиці. Список використаних джерел налічує 103 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність теми роботи, зв'язок роботи з науковими програмами, формулюються мета і задачі дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження. Наведено перелік результатів дисертаційного дослідження, які становлять наукову новизну, зазначено практичне значення отриманих результатів, перелік наукових статей та конференцій, на яких було проведено апробацію результатів, а також структуру та обсяг роботи.

У **першому розділі** проведено загальний аналіз характеристик когнітивних радіосистем, проведено оцінку впливу завад множинного доступу на працездатність когнітивних радіомереж та визначено варіанти зменшення рівня завад множинного доступу. Також проведено аналіз найбільш розповсюджених методів частотного розділення каналів (ортогонального, неортогонального та Fast-OFDM). Приймаючи до уваги те, що сучасні засоби телекомунікацій направлені на розробку і цифровізацію систем передачі інформації, виникнення внутрішньо системних завад стає основною проблемою. Внутрішньо системні завади можуть виникати, коли в одній системі одночасно працюють радіостанції різних абонентів в спільній смузі частот у вигляді взаємно заважаючого впливу сигналів. Це відбувається через неідеальність їх кореляційних характеристик і може значно впливати як на кількість користувачів, що обслуговуються, так і на якість зв'язку між ними. Тому перший розділ дисертації присвячено оцінці впливу завад множинного доступу на роботу когнітивного радіо та продумуванню варіантів зменшення таких завад.

Після проведеного аналізу зроблено висновок, що протистояння важким умовам в каналі без складних вирівнюючих фільтрів є основною перевагою методу OFDM. Використання методу OFDM зменшує потужність випромінювання на лінії «нагору», забезпечує динамічний розподіл частотних каналів, боротьбу з багатопроменевим поширенням, вирішує завдання передачі інформації в умовах відсутності прямої видимості. До того ж виникає можливість одночасної передачі інформації декількома АС.

Фахівцями в телекомунікаційній галузі вже давно активно проводиться дослідження з розробки методів частотного мультиплексування з більшою спектральною ефективністю в порівнянні з OFDM. Одним з таких методів є метод частотного мультиплексування даних Fast-OFDM. Даний метод базується на принципі OFDM, але відрізняється від останнього використанням частотного рознесення піднесучих, в 2 рази меншого, ніж в разі OFDM. При методі Fast-OFDM дійсна частина коефіцієнта кореляції двох комплексних піднесучих дорівнює нулю, якщо рознос за частотою між піднесучими кратний цілому числу $1/2T$.

За результатами аналізу сформульовано завдання дослідження.

У **другому розділі** детально розкрито суть розробленого методу квазіортогонального частотного розділення каналів, за допомогою якого вирішується задача спільного використання однієї і тієї ж смуги частот багатьма користувачами когнітивної радіосистеми. Використання даного методу збільшує кількість активних абонентів когнітивної радіосистеми шляхом реалізації схеми паралельного використання абонентами неоднакових варіантів розподілу піднесучих частот в одній мережі. Але в когнітивних радіомережах при динамічній зміні навантаження може виникати явище під назвою «частотні колізії». Суть даного явища полягає в тому, що різні абоненти одночасно можуть зайняти одну і ту ж смугу частот, що може вплинути на ріст рівня внутрішньо системних завад.

Було проілюстровано розроблений алгоритм формування ансамблю складних сигналів на основі QOFDM та представлено аналітичний вираз, який описує даний метод.

$$S_i(\Delta f_i) = \operatorname{Re} \left\{ e^{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \Delta f_i} \cdot \sum_{k=-\Delta F/2}^{\Delta F/2} C_k \cdot e^{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f(\Delta f_i - T_S)} \right\}, \quad (1)$$

де Δf_i – інтервал рознесення i -го частотного плану; $\text{Re}\{x\}$ – дійсна частина комплексного числа x ; f_0 – нульова піднесуча частота; ΔF – смуга частот; C_k – комплексне представлення символу QAM; T_s – період сигналу.

Алгоритм формування ансамблю складних QOFDM-сигналів представлено у дисертаційній роботі. Він складається з послідовності таких операцій:

1. Визначення вихідних даних: Δf – інтервал рознесення піднесучих частот; ΔF – смуга частот; n – кількість піднесучих частот в субканалі ΔF .

2. Формування всіх частотних планів в ансамблі з заданими параметрами. Інтервал рознесення піднесучих частот розраховується за виразом (2):

$$\Delta f_i = \frac{\Delta F}{n_i}, \text{ Гц.} \quad (2)$$

3. Попарне порівняння частотних планів в ансамблі для виявлення співпадінь в позиціях частотних піднесучих.

4. Визначення кількості позицій частотних піднесучих, що співпали в кожному частотному плані ансамблю.

5. Внесення частотного плану до ансамблю.

6. Ансамбль приймається для подальшого синтезу сигналів.

Відібрані частотні плани формують ансамбль, який приймається для подальшого синтезу сигналів.

Здійснено аналіз математичних інструментів формування дискретного сигналу, при застосуванні строгого перетворення Фур'є вихідної функції з табличним заданням. Через обмеження числа членів ряду розкладання виникають пульсації Гіббса. Вони мають наступну специфіку:

- огинаюча загасань пульсацій близька до огинаючої амплітудно-частотного спектру вихідного сигналу;

- значення частоти пульсацій приблизно така ж, як і частота першого відкинутого члену ряду;

- при збільшенні числа членів розкладання, значення амплітуди головної пелюстки пульсацій залишається незмінним. Практично в цьому можна переконатися проаналізувавши пульсації.

Для того, щоб теоретично обґрунтувати закономірності пульсацій Гіббса розглянемо похибки, які виникають при застосуванні строгого перетворення Фур'є вихідної функції з табличним заданням та обмеженнями, які безумовно будуть впливати з цього. Чинники, які будуть впливати на похибки результату перетворення:

- неточність вихідних значень, яка, звісно, відображається і в кінцевому результаті;

- застосування тих чи інших квадратурних формул при обчисленні інтегралу Фур'є, оскільки точний процес інтегрування в принципі неможливий;

- заміна нескінченних меж інтегрування на скінченні.

Особливо треба звернути увагу саме на останній чинник. Для дослідження ефекту Гіббса у "чистому" вигляді, взято, як тестову функцію $f_{st}(x)$ "ступінчасту" функцію:

$$f_{st}(x) = \begin{cases} 0, & x < 0; \\ 1, & x \geq 0. \end{cases} \quad (3)$$

Нехай $M_{\Delta}(x)$ – зворотне перетворення Фур'є функції $\mu(\omega)$:

$$f_{\Delta}(x) = M_{\Delta}(x) \otimes f(x). \quad (4)$$

Згортку (4) з функцією (3) виразимо таким чином:

$$f_{\Delta}(x) = \int_{-\infty}^x \frac{\sin \Delta y}{\pi y} dy = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\Delta x} \frac{\sin z}{z} dz = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \text{Si}(\Delta x), \quad (5)$$

де $Si(z)$ – інтегральний синус. Графік функції (5), розрахованої чисельним методом, зображено на рис. 1. Наочно проявляється коливальний характер функції $M_{\Delta}(x)$, тобто ефект Гіббса. При $z \gg 1$ має місце асимптотичне наближення $Si(z) \approx \frac{\pi}{2} - \frac{\cos z}{z}$, а тому

$$f_{\Delta}(x) \approx 1 - \frac{\cos \Delta x}{\pi x}.$$

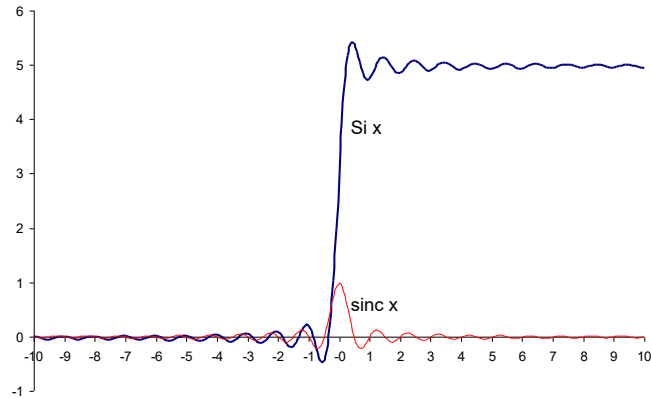


Рис. 1 Функція $\text{sinc } x = \sin x/x$ та функція інтегрального синуса $Si(x)$

Пульсації Гіббса можуть виникати не тільки поблизу розривів, але і в околицях інших особливостей (наприклад, як гострі піки). Ефект Гіббса, безумовно, є небажаним явищем. Його негативна особливість в тому, що він маскує справжній хід функції, створює хибні "деталі" і ускладнює процес подальшої математичної обробки. Тому намагання позбутися ефекту Гіббса, навіть ціною певної втрати точності, стає першочерговою задачею.

Є ще одна суттєва обставина. Якщо $f(x)$ – довільна, абсолютно інтегрована функція, то послідовність функцій $f_{\Delta}(x)$, що задаються інтегралом (2), при $\Delta \rightarrow \infty$ буде, взагалі кажучи, розбіжною (зауважимо, що для багатьох Δ функції f_{Δ} неінтегровані, і їх треба розраховувати чисельними методами). В формулі зворотного перетворення Фур'є $f(x) = \frac{1}{2\pi} \int e^{j\omega x} \varphi(\omega) d\omega$ більше немає сенсу.

Для побудови функції $f(x)$, виходячи з функції $\varphi(\omega)$, використаємо підсумовування інтеграла Фур'є за Фейєром, в інтегралі (2.6) у якості множника береться трикутна вагова функція:

$$\mu(\omega) = \begin{cases} 1 - |\omega|/\gamma, & |\omega| \leq \gamma; \\ 0, & |\omega| > \gamma. \end{cases} \quad (6)$$

Послідовність функцій $f_{\gamma}(x)$, визначених інтегралом (5), завжди сходиться за нормою L_2 , до функції $f(x)$. Функція $M_{\Delta}(x)$ тепер матиме такий вигляд:

$$M_{\Delta}(x) = \frac{2}{\pi \Delta x^2} \sin^2 \frac{\Delta}{2} x \quad (7)$$

Її називають ядром Фейєра. Множник (6) перетворює розбіжний інтеграл Фур'є на збіжний. На цій підставі його назвемо підсумовуючим множником, а функцію (7) – підсумовуючим ядром. "Підсумовуюча здатність" множника (6) поширюється і на більш широкі класи функцій. Для збереження гладкості функції $f(x)$, тобто боротьби з пульсаціями Гіббса, рекомендуємо наступний двопараметричний згладжуючий множник:

$$\mu(\omega) = \begin{cases} 1, & |\omega| \leq \delta; \\ \frac{1}{2} \left(1 + \cos \pi \frac{|\omega| - \delta}{\gamma - \delta} \right), & \delta < |\omega| \leq \gamma; \\ 0, & |\omega| > \gamma. \end{cases} \quad (8)$$

Взагалі, універсального рецепту для вибору згладжуючого множника (або ядра), існувати не може, тому дуже важливо знати, яка доля загальної енергії сигналу міститься у межах одного, двох, трьох і т.д. пелюсток спектральної діаграми. Тоді можна висувати й обґрунтовувати критерії вибору спектрально-ефективних сигналів, зокрема, безумовно, OFDM-сигналів. Використання методу Фейєра, по-перше, дає можливість знаходити частинні суми довільної сигнальної функції, а по-друге (і це значно важливіше), аргументовано провести порівняльний аналіз різних сигнальних функцій по критеріям спектральної та енергетичної ефективності.

Наведені результати використані для дослідження OFDM-сигналу. На рис. 2 зображені графіки розкладання OFDM-сигналу з п'ятьма піднесучими в ряд Фур'є, який обмежений п'ятьма членами. Умова ортогональності не дотримується: бічні пелюстки парціальних спектрів перетинаються у точках, де їх значення є довільними та не дорівнюють нулю.

При прямому підсумовуванні п'яти членів ряду ми отримали результуючий графік сигналу, який зображений на рис. 3.

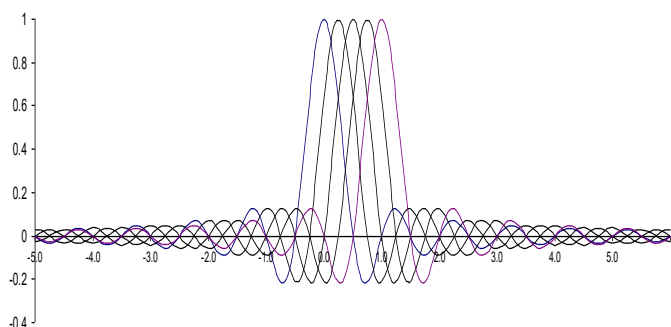


Рис.2 Графіки п'яти піднесучих OFDM-сигналу

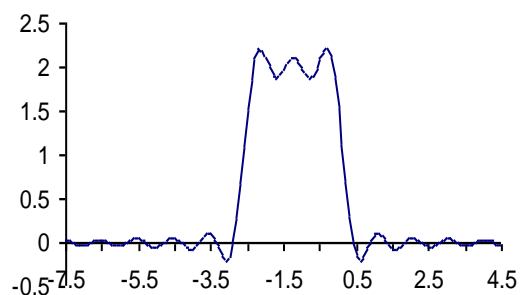
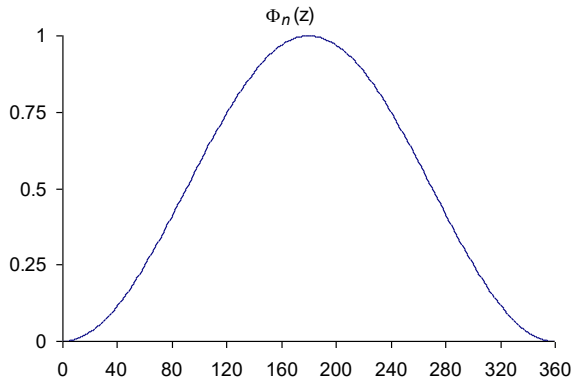
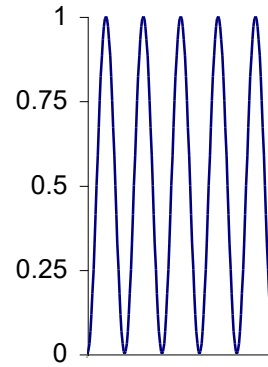


Рис.3 Графік сумарного сигналу

Для отримання порівняльних результатів підсумовування за методом середньоарифметичних досліджено ядро Фейєра. Розрахований графік ядра Фейєра для випадку $k=1$ (рис. 4). Видно, що отримана функція у певній мірі нагадує графік гаусівського або COS-квадратного імпульсу.

Параметри реального ядра Фейєра узгоджено з параметрами вибраного OFDM-сигналу. Графік відповідного ядра зображений на рис. 5.

З використанням інтегралу згортки досліджуваної функції з ядром розраховано графіки розкладання OFDM-сигналу з п'ятьма неортогональними піднесучими та графік сумарного сигналу зі згладжуванням по Фейєру. При використанні згладжуючого ядра Фейєра рівень бічних пелюсток піднесучих значно знижується. Відповідно, відновлений сумарний сигнал набуває в околиці плоскої частини імпульсу форми, більш близької до прямокутної. Фронт та зріз імпульсу втрачають коливальний характер, стають монотонними, при цьому, що уповні логічно, сумарний сигнал на низькому рівні бічних пелюсток розширюється. Ясно, що за критерієм оптимального частотно-часового розподілу енергії сигналу суперечностей між енергетичною та спектральною ефективністю не спостерігається.

Рис.4 Графік ядра Фейєра; $k = 1$ Рис.5 Графік ядра Фейєра; $k = 5$

Третій розділ присвячений розробці методу визначення частотних позицій, який реалізовано на основі попарного порівняння частотних планів ансамблю сигналів при квазіортогональному частотному розділенні каналів з мультиплексуванням. Даний метод дозволяє зменшити рівень внутрішньосистемних завад при формуванні частотних планів.

Однією із проблем при формуванні сигналу за пропонуваним методом квазіортогонального доступу на піднесучих (QOFDM) є задача визначення частотних позицій, які співпали при попарному порівнянні частотних планів. В результаті неоднакових варіантів розподілу піднесучих частот виникає задача визначення співпадіння позицій в різних частотних планах ансамблю. Для вирішення такої задачі було використано метод визначення співпадіння позицій частотних піднесучих. Коефіцієнт співпадіння визначається як інтеграл на проміжку смуги частот від F_{min} до F_{max} добутку i -го та j -го частотних планів з кроком між позиціями в j -ому частотному плані Δ .

$$B_{ij}(\Delta f) = \int_{F_{min}}^{F_{max}} S_i(\Delta f_i) \cdot S_j(\Delta f_j - \Delta) d\Delta f, \quad (9)$$

де Δ – крок інтегрування.

При виборі частоти дискретизації за теоремою відліків умова ортогональності дотримується, і похибка відновлення сигналу (нев'язка відновлення) стає мінімально можливою. Величина похибки залежить тільки від числа членів розкладання. На рис. 6 зображені графіки вихідного сигналу (штрихова лінія) та відновленого сигналу (суцільна лінія), а на рис. 7 – графік модулю нев'язки відновлення. Пульсації Гіббса, які виникають при обмеженні числа членів ряду розкладання, мають наступну специфіку:

- обвідна загасань пульсацій близька до обвідної амплітудно-частотного спектру вихідного сигналу;
- частота пульсацій близька до частоти першого відкинутого члену ряду;
- амплітуда головної пелюстки пульсацій не змінюється при збільшенні числа членів розкладання.

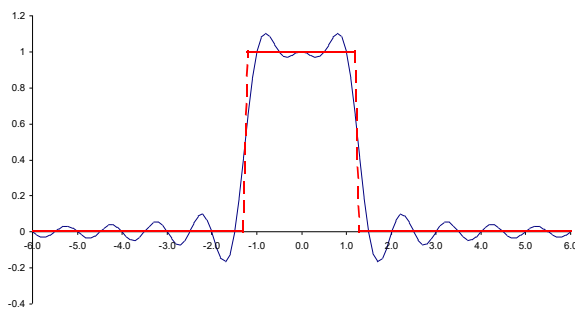


Рис. 6 Графіки вихідного сигналу (прямокутний імпульс) та відновленого

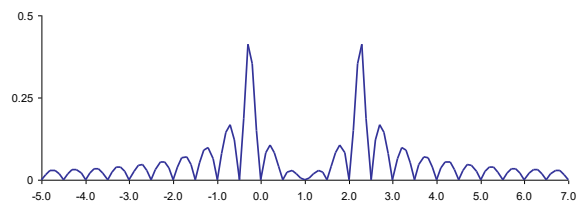


Рис. 7 Графік модулю нев'язки відновлення

сигналу після його опрацювання на приймальній стороні

Функція модулю нев'язки відновлення має такий вигляд:

$$\varphi_{div}(t) = |g_\varepsilon(t) - g(t)|, \quad g(k) = g(k\Delta t_{discr}), \quad 1 \leq k \leq 5, \quad (10)$$

де $g(t)$, $g_\varepsilon(t)$ – вихідний сигнал та відновлений сигнал відповідно; $g(k\Delta t_{discr})$, $1 \leq k \leq 5$ – набір з п'яти дискретних відліків неперервного сигналу.

Евклідова норма відстані між $g(t)$ та $g_\varepsilon(t)$ визначається за виразом

$$\delta_{g\varepsilon} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} [g_\varepsilon(t) - g(t)]^2 dt}, \quad (11)$$

а відносний квадрат норми відстані між $g(t)$ та $g_\varepsilon(t)$ – за виразом

$$\sigma_\varepsilon^2 = \delta_{g\varepsilon}^2 / \|g(t)\|^2, \quad -t_{max} \leq t \leq t_{max}, \quad |t_{max} < \infty|. \quad (12)$$

При збільшенні числа членів ряду розкладання слід очікувати, що відновлений сигнал буде більш точно повторювати вихідний сигнал. На рис. 8 зображені графіки вихідного сигналу (прямокутного імпульсу одиничної довжини) та відновленого сигналу при розкладанні в ряд з 21 членом. На рис. 9 зображений графік нев'язок відновлення сигналу.

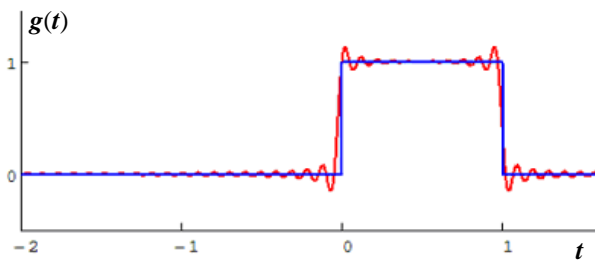


Рис. 8 Графіки вихідного та відновленого сигналів

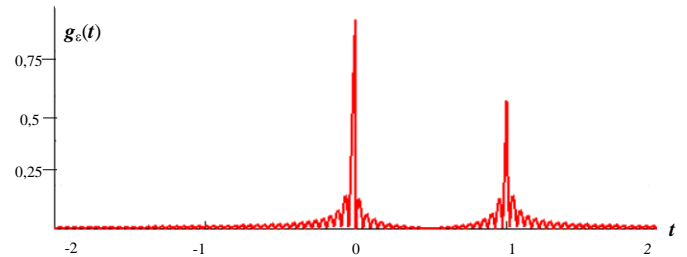


Рис. 9 Графік нев'язок відновлення

На завершення, було досліджено розкладання в ряд з п'яти членів, коли умови теореми відліків не дотримуються (рис. 10 – 12).

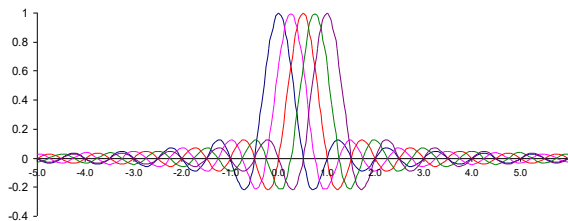


Рис. 10 Графік п'яти членів ряду розкладання. Частота дискретизації $f_d = 1/\tau_p$

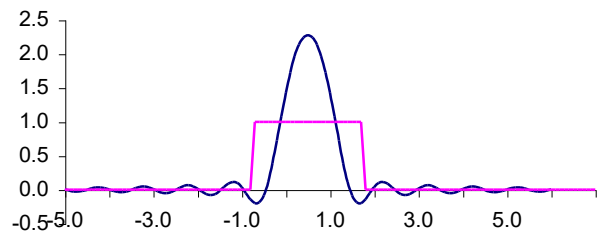


Рис. 11 Графіки вихідного та відновленого сигналів після його опрацювання на приймальній стороні. Частота дискретизації $f_d = 1/\tau_p$

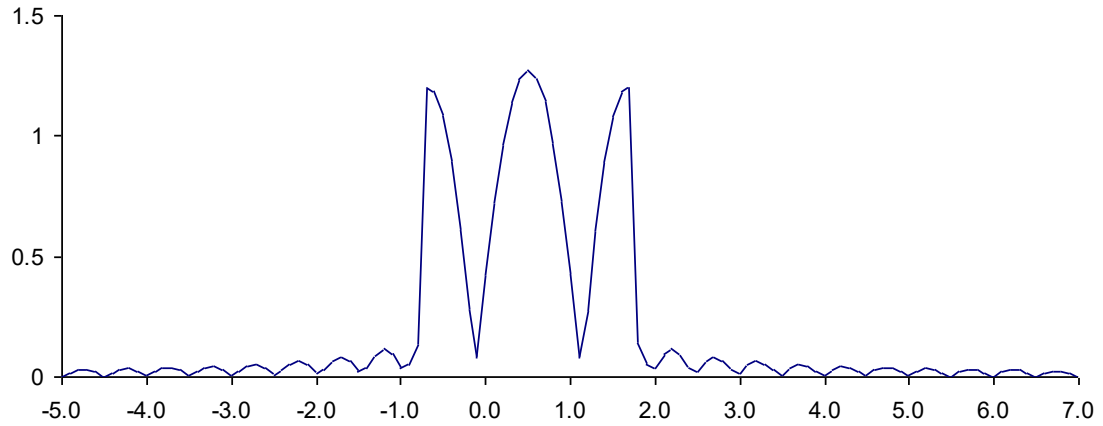


Рис. 12 Графік нев'язки відновлення сигналу

Результати досліджень свідчать про те, що при порушенні умов ортогоналізації системи базисних функцій Евклідова норма відстані між $g(t)$ та $g_\varepsilon(t)$ (вираз (12)) виходить за рамки припустимості, а збільшення числа членів розкладання в ряд вже не є таким ефективним рішенням.

Особливо сильно це помітно при наявності розривів (навіть першого роду) у сигнальних функціях, таких, як, наприклад, прямокутні імпульси. Крутизна перепадів втрачає чіткість, стає «розмитою», оскільки вона не може бути більше, ніж крутизна останньої утриманої гармоніки ряду

$$g(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g\left(\frac{n}{2f_{g \max}}\right) \frac{\sin\left[2\pi f_{g \max}\left(t - n/2\pi f_{g \max}\right)\right]}{2\pi f_{g \max}\left(t - n/2\pi f_{g \max}\right)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(n\Delta t)\varphi_n(t). \quad (13)$$

По обидві сторони "розмитих" перепадів з'являються викиди і пульсації з частотою, близькою до частоти першого відкинутого члену ряду.

Збільшення числа членів ряду розкладання може позитивно вплинути на результати, але гарантувати монотонне покращання ситуації з похибками відновлення не в принципі немає можливості. Ключовою вимогою є не стільки вибір якомога більшої частоти дискретизації, скільки дотримання цілочисельності співвідношень між частотою дискретизації та шириною основної та бічних пелюсток спектру сигналу.

Четвертий розділ містить аналіз ефективності розроблених методів.

Для опрацювання рекомендацій по впровадженню складних сигналів на основі QOFDM було проведено оцінку взаємкореляційних властивостей частотних планів, враховуючи різну кількість підканалів, загальну ширину спектру ансамблю частотних планів та ширину підканалів.

В результаті дослідження методів синтезу ансамблів складних сигналів для когнітивних радіомереж було визначено напрямки по збільшенню об'єму частотних планів складних сигналів на основі QOFDM.

На рис. 13 наведено залежність максимальних викидів бічних пелюсток функцій взаємної кореляції частотних планів при різному значенні ширини смуг підканалів та кількості піднесучих частот. Встановлено, що зі зміною ширини підканалів та кількості піднесучих в частотному плані n_i значення рівня взаємної кореляції між частотними планами збільшується, але не перевищує допустимого значення для двох порівнюваних процесів $B_{ij} = 5/n_i$.

Збільшуючи значення бази сигналу при незмінній швидкості передачі інформації, можна досягти необхідного значення рівнів максимальних викидів бічних пелюсток ВКФ порівнюваних частотних планів. Відповідно, вирішено задачу визначення таких смуг підканалу Δf і кількості самих підканалів n_i в кожному k -му наборі частот ансамблю, при

яких буде задовольнятися вимога мінімальної взаємодії в частотній області, при якій задовольнялася б вимога:

$$\text{Max } R_{ij}(\Delta f) \rightarrow 0 \quad (14)$$

де i, j – порядковий номер набору частот в ансамблі, $i \neq j \in 1, 2, \dots, N$; N – кількість пар взаємодіючих частотних планів.

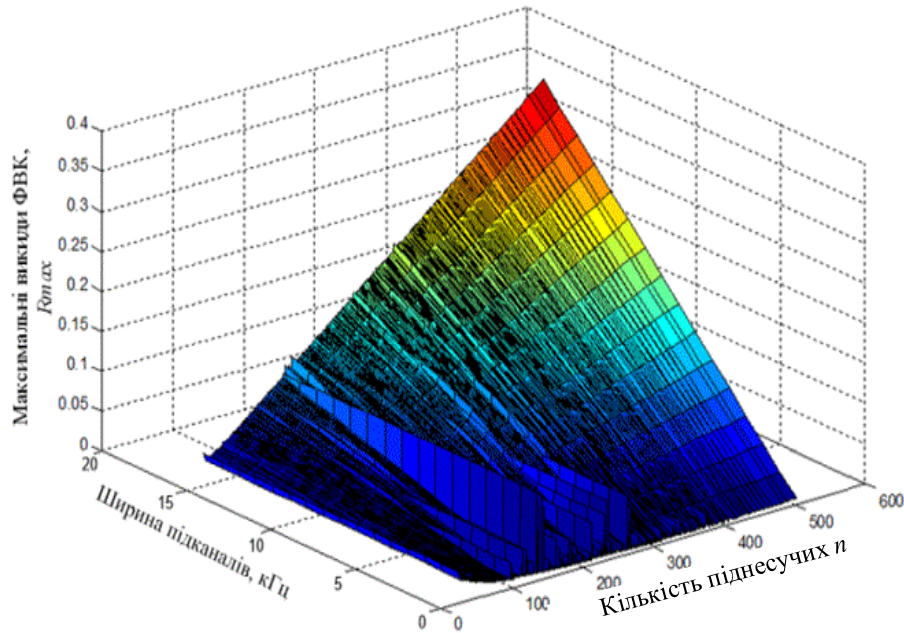


Рис. 13 Залежність максимальних викидів ФВК частотних планів від кількості піднесучих частот ($n = 512$) та ширини підканалів

Також розраховані залежності математичного очікування максимальних викидів бічних пелюсток ВКФ сигналів $m_{\max R}(N)$ при зміні кількості підканалів n та статистичні характеристики максимальних викидів бічних пелюсток ВКФ різних частотних планів QOFDM-сигналів в залежності від кількості підканалів в них та ширини підканалів.

Частотний ансамбль утворено з 37-ми QOFDM-частотних планів, синтезованих відповідно до алгоритму формування ансамблю сигналів, при різних кількостях підканалів та їх ширині спектру в кожному частотному плані, де кількість підканалів $n_i, n_j, n_i \neq n_j$ – від 23 до 512, а ширина смуги підканалу $\Delta f_i \in (100 \dots 15000)$ Гц. Розраховувалося значення коефіцієнта кореляції r_{ij} двох порівнюваних частотних планів. На основі отриманих результатів видалені ті частотні плани, що дають найгірші значення при розрахунку коефіцієнта кореляції, а саме $r_{ij} > 0,1$.

Розглянуто задачу дослідження спектральної ефективності стосовно OFDM-сигналів зі згладжуванням. У якості функцій згладжування використані функції, що впливають з методу Фейєра підсумовування середніх арифметичних. Як відомо, при застосування теореми Фейєра до підсумовування рядів Фур'є гарантується рівномірна (монотонна) збіжність частинних сум ряду до функції, яка розкладається.

Загальноприйняте визначення енергетичного критерію базується на ширині смуги частот, у якій міститься певна доля повної енергії сигналу, та оцінці протяжності залишків спектру поза даною смугою. Нарешті, основоположне значення має розподіл енергії сигналу по часу та частоті.

У дисертації виконано порівняльний аналіз згладжуючих вагових функцій, а також функцій на основі поліномів Ерміта, інваріантних стосовно повороту координатної площини (подібно класичній гаусовій функції $\exp(-\alpha^2 \rho^2/2)$). Встановлено, що для вагової функції на основі поліному Ерміта рівень бічних пелюсток частотно-часового

розподілу енергії також високий. Цей недолік притаманний і функціям виду (4.6). Тому в роботі запропоновано згладжуючу вагову функцію типу ядра Фейєра. В цьому випадку частотно-часовий розподіл енергії запропонованої сигнальної функції монотонно убуває і не має викидів. Завдяки такому характеру розподілу енергії підсумований ряд буде мати малий рівень пульсацій Гіббса. Тому вибір такої функції згладжування являється, на нашу думку, уповні задовільним. Спектральна ефективність сигналу в цілому покращується. Крім того, стає ясным, що за критерієм оптимального частотно-часового розподілу енергії сигналу суперечностей між енергетичною та спектральною ефективністю не спостерігається.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Сукупність отриманих у дисертаційній роботі результатів вирішує загальну науково-прикладну задачу, яка полягає в розробці методів підвищення ефективності використання частотного ресурсу в когнітивних радіомережах. На основі проведених досліджень і результатів вирішення частинних задач отримані нові наукові та практичні результати, які є істотним внеском у подальший розвиток теорії й практики підвищення ефективності використання частотного ресурсу в когнітивних радіомережах.

Основні наукові та практичні результати дисертаційного дослідження зводяться до наступних положень:

1. Проведено аналіз загальних характеристик когнітивних радіосистем. Також проведено аналіз найбільш відомих методів частотного розділення каналів, а саме: ортогонального (OFDM), неортогонального (N-OFDM) та Fast-OFDM (FOFDM). Проведено оцінку впливу множинного доступу на роботу когнітивних мереж та визначено шляхи зменшення цих завад. Для вирішення задачі реалізації спільного використання спектральних дір багатьма користувачами когнітивної радіомережі було запропоновано використати розроблений метод на основі квазіортогонального частотного мультиплексування каналів (QOFDM). Було розроблено імітаційну модель системи сигналів на основі методу QOFDM.

2. Отримав подальший розвиток метод квазіортогонального частотного розділення каналів, який відрізняється від відомих використанням індивідуального розподілу частотних піднесучих в різних частотних планах ансамблю в загальній смузі частот, який дозволяє підвищити пропускну спроможність когнітивної радіосистеми в n разів, де n – це кількість частотних планів в ансамблі, за рахунок паралельного використання різними абонентами однієї мережі різних варіантів розподілу піднесучих частот. Розв'язання цієї задачі дозволяє значно знизити кількість частотних колізій та дозволяє збільшити абонентську ємність когнітивної радіосистеми. Реалізація методу досить складна, але вона дозволяє збільшити пропускну здатність системи зв'язку за рахунок паралельного використання абонентами однієї мережі неоднакових варіантів розподілу піднесучих частот. Завдяки нелінійному розподілу піднесучих частот значно підвищується пропускну здатність каналу, при цьому може незначно погіршитись якість передачі інформації.

3. В роботі вирішено наукове завдання, яке полягає в розробці алгоритму формування ансамблів сигналів з квазіортогональним розділенням частот для різних значень ширини підканалів та отримано графічну інтерпретацію методу. Було розроблено імітаційну модель системи сигналів на основі технології QOFDM.

4. Вперше розроблено метод визначення збігів позицій піднесучих частот, який виконано на основі парного порівняння частотних планів ансамблю сигналів QOFDM, який дозволяє спростити процес формування частотних планів і зменшує величину внутрішньосистемних завад в процесі створення частотних планів.

5. Розглянуто питання зменшення похибки відновлення сигналів приймачем, що представляє не тільки теоретичний, а й практичний інтерес. Доведено, що ядро Фейєра може служити ефективним інструментом для згладжування форми сигналу, що особливо

важливо для випадку проектування безпроводових мереж, оскільки таке згладжування гарантує використання сигналів з максимальною спектральною ефективністю, і, як наслідок, найбільш повне використання доступного частотного ресурсу. Одночасно, завдяки використанню згладжуючих ядер Фейєра, у значній мірі усуваються суперечності між енергетичною та спектральною ефективністю сигналів.

6. Вперше розроблено імітаційну модель процесу формування частотних планів для квазіортогонального частотного розділення каналів, яка дозволяє визначити ширину підканалів в частотних планах ансамблів складних сигналів з урахуванням їх кількості. Це дозволяє синтезувати ансамблі складних сигналів з низькою взаємодією в частотній області.

7. Проведено статистичну оцінку взаємкореляційних властивостей сигналів із врахуванням в них різного значення кількості підканалів, їх ширини та загальної ширини спектру ансамблю частотних планів. Згідно отриманих результатів було визначено напрямки по збільшенню об'єму частотних планів складних сигналів на основі QOFDM.

Достовірність отриманих результатів підтверджується відсутністю суперечностей з основними положеннями теорії інформації, теорії оптимізації, теорії математичного програмування, а також збіжністю отриманих результатів із даними експериментальних досліджень та результатами математичного моделювання.

Таким чином мета дисертаційної роботи є досягнутою.

Отриманні в роботі результати знайшли практичне впровадження та використання. Вони можуть бути використані в спеціалізованих безпроводових системах та мережах з параметрами, що випадково змінюються, структурою і масштабом, що особливо важливе для мереж реального часу та критичного застосування.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у вітчизняних та закордонних наукових фахових виданнях:

1. Kozlovskiy V., Klobukova L., Lysechko V., Cherneva G. Analysis of recovery errors of QOFDM signals. *Механика Транспорт Комуникации - Научно списание*. Volume 21, issue 1, 2023.
2. Козловський В.В., Клобукова Л.П., Савченко А.С., Толстікова О.В. Критерії вибору спектрально-ефективних сигналів у безпроводових інформаційних мережах. *Science-Based Technologies*, 2022/10/1, Vol. 56, Issue 4, P.268-273.
3. Nimych O., Klobukova L., Nesterenko K., Yakoviv I. Review of mathematical support and software for design of shf devices. *Science-based technologies*, 2022/7/1, Vol. 55, Issue3, p.167-177 DOI: 10.18372/2310-5461.55.16909
4. Швець І.П., Торошанко А.І., Клобукова Л.П. Похибки відновлення сигналів у багатоканальних системах зв'язку з ортогональною модуляцією. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. №2 (75), 2022. С.77- 84. DOI: 10.31673/2412-4338.2022.027783.
5. Торошанко А. І., Клобукова Л.П. Асимптотичні характеристики багатоканальних систем доступу з ортогональною фільтрацією. *Зв'язок*, № 2 (156), 2022. С.40-45. DOI: 10.31673/2412-9070.2022.024045
6. Клобуков В., Клобукова Л., Добровольский С., Ван Бо, Гливенко М. Механика полета БПЛА. Седьмой всемирный конгресс "Авиация в XXI веке" Безопасность в авиационных и космических технологиях 19-21 сентября 2016 г.
7. Klobukov V.V., Klobukova L.P., Ryabokon V.A. Integration virtual desktop infrastructure in the learning process. *Aviation in the XXI–st century, Safety in Aviation and Space Technologies : XV, world congress, 25-27 september 2012*. V.1 P.1.11.45-1.11.47.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Савченко А.С., Толстікова О.В., Клобукова Л.П. Спектральна ефективність сигналів безпроводових інформаційнокомунікаційних мереж. *Збірник тез доповідей XIV міжнародної науково-практичної конференції «Комп'ютерні системи та мережні технології»*. 13-14 квітня 2023 року, Київ. 2023. С.137-143.
9. Klobukov V.V., Klobukova L.P. Some aspects of the analysis of asymptotic characteristics of multichannel access systems with orthogonal filtering. *Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2023) шістнадцята міжнародна науково-практична конференція, 23-24 травня 2023 р., Київ*. С.308-309.
10. Klobukov V.V., Klobukova L.P. Some issues of error analysis of initial continuous signals recovery in digital communication systems with orthogonal modulation of subcarriers with equidistant arrangement. *Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2023) шістнадцята міжнародна науково-практична конференція, 23-24 травня 2023 р., Київ*. С.306-307.
11. Kozlovskiy V.V., Nimych S.U., Klobukova L.P., Komar O.M. Exploring inhomogeneous lines as a promising filtering element for enhanced shf device design. *Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2023) шістнадцята міжнародна науково-практична конференція, 23-24 травня 2023 р., Київ*. С.245-247.
12. Kozlovsky V.V., Kozlovsky V.V., Klobukova L.P. Use of absorbent coatings based on composite materials. *Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток (14 - 16*

листопада 2022 р.) Колективна монографія за матеріалами XXI Міжнародної науково – практичної конференції. Київ, 2022.

13. Марченко Н.Б., Нечипорук В.В., Клобукова Л.П., Яковенко Л.В. Програмне забезпечення реєстрації та обробки сигналів акустичної емісії. Наукова думка інформаційного століття: XV Міжнар. Наук.-практ. Конф., 07-15 березня 2019 р. Перемишль, 2019. Т.10. С. 8-11.

14. Зиков О.С., Клобуков В.В., Клобукова Л.П., Рябоконт В.А. Базовий аналіз стандартів безпроводної передачі даних і перспективи їх розвитку. АВІА–2015: XII міжнар. Наук.-техн. Конф., 29 –29 квітня 2015 р. Київ, 2015. Т.1. С. 6.137-6.141.

15. Волхонський С.І., Єрмак С.О., Клобукова Л.П., Зиков О.С., Самофалов Д.В. Вимоги до інфраструктури системи електронного документообігу у вищих навчальних закладах. АВІА–2015: XII міжнар. Наук.-техн. Конф., 29 –29 квітня 2015 р. Київ, 2015. Т.1 С. 6.131-6.136.

16. Рябоконт В.А., Клобукова Л.П., Зиков О.С., Єрмак С.О. Деякі принципи побудови систем управління системами віртуалізації на базі програмного забезпечення з відкритим програмним кодом. АВІА–2013: XI міжнар. Наук.-техн. Конф., 21 –23 травня 2013 р. Київ, 2013. Т.1. С. 5.71-5.74.

17. Рябоконт В.А., Клобукова Л.П., Зиков О.С. Використання технологій VLAN та 802.1x для організації доступу і захисту мережі. АВІА–2011: IV міжнар. Наук.-техн. Конф., 14 –16 квітня 2011 р. Київ, 2011. С. 57.

18. Рябоконт В.А., Клобукова Л.П., Зиков О.С. Віртуалізація, спрощення та контроль робочих станцій: надання робочого середовища як сервісу. АВІА–2011: IV міжнар. Наук.-техн. Конф., 14 –16 квітня 2011 р. Київ, 2011. С. 40.

АНОТАЦІЯ

Клобукова Л. П. Метод квазіортогонального частотного розділення каналів в когнітивних радіомережах. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. Національний авіаційний університет.

У дисертаційній роботі вирішується актуальне науково-технічне завдання підвищення ефективності використання доступного частотного ресурсу в безпроводових мережах когнітивного радіо, шляхом формування частотних планів квазіортогонального частотного розділення каналів.

Проведено аналіз загальних характеристик когнітивних радіосистем. Також проведено аналіз найбільш відомих методів частотного розділення каналів, а саме: ортогонального (OFDM), неортогонального (N-OFDM) та Fast-OFDM (FOFDM). Проведено оцінку впливу множинного доступу на роботу когнітивних мереж та визначено шляхи зменшення цих завад.

Отримав подальший розвиток метод квазіортогонального частотного розділення каналів (QOFDM), який відрізняється від відомих використанням індивідуального розподілу частотних піднесучих в різних частотних планах ансамблю в загальній смузі частот, який дозволяє підвищити пропускну спроможність когнітивної радіосистеми в n разів, де n – це кількість частотних планів в ансамблі, за рахунок паралельного використання різними абонентами однієї мережі різних варіантів розподілу піднесучих частот. Розв'язання цієї задачі дозволяє значно знизити кількість частотних колізій та дозволяє збільшити абонентську ємність когнітивної радіосистеми. Реалізація методу досить складна, але вона дозволяє збільшити пропускну здатність системи зв'язку за рахунок паралельного використання абонентами однієї мережі неоднакових варіантів розподілу піднесучих частот. Завдяки нелінійному розподілу піднесучих частот значно підвищується пропускну здатність каналу, при цьому може незначно погіршитись якість передачі інформації.

В роботі удосконалено алгоритм формування ансамблів сигналів з квазіортогональним мультиплексуванням із врахуванням різного значення ширини підканалів у відповідних частотних планах та отримано графічну інтерпретацію методу.

Вперше розроблено метод визначення збігів позицій піднесучих частот, який реалізовано на основі попарного порівняння частотних планів ансамблю сигналів при квазіортогональному частотному розділенні каналів з мультиплексуванням (QOFDM).

Розглянуто питання зменшення похибки відновлення сигналів після прийому та опрацювання цифровими методами, що представляє не тільки теоретичний, а й практичний інтерес. Доведено, що ядро Фейєра може служити інструментом згладжування форми сигналу, що особливо важливо для випадку проектування безпроводових мереж, оскільки забезпечується потрібна спектральна ефективність сигналу, і, як наслідок, найбільш повне використання доступного частотного ресурсу.

Розроблено імітаційну модель процесу формування частотних планів для квазіортогонального частотного розділення каналів, яка дозволяє визначити ширину підканалів в частотних планах ансамблів складних сигналів з урахуванням їх кількості. Це дозволяє синтезувати ансамблі складних сигналів з низькою взаємодією в частотній області. Проведено статистичну оцінку взаємкореляційних властивостей сигналів із врахуванням в них різного значення кількості підканалів, їх ширини та загальної ширини спектру ансамблю частотних планів. Згідно отриманих результатів було визначено напрямки по збільшенню об'єму частотних планів складних сигналів на основі QOFDM.

Ключові слова: телекомунікаційні системи, когнітивні радіомережі, OFDM-сигнал, квазіортогональний доступ, метод Фейєра.

ANNOTATION

Klobukova L.P. Method of quasi-orthogonal frequency division of channels in cognitive radio networks. - On the rights of the manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of candidate of technical sciences on 05.12.02 - telecommunication systems and networks. National Aviation University.

The thesis solves the current scientific and technical task of increasing the efficiency of using the available frequency resource in wireless cognitive radio networks by forming frequency plans of quasi-orthogonal frequency separation of channels.

An analysis of the general characteristics of cognitive radio systems has been carried out. An analysis of the most well-known methods of frequency division of channels, namely: orthogonal (OFDM), non-orthogonal (N-OFDM) and Fast-OFDM (FOFDM), was also carried out. The impact of multiple accesses on the work of cognitive networks was assessed and ways to reduce these problems were determined.

The method of quasi-orthogonal frequency division of channels (QOFDM) received further development, which differs from the known ones by the use of individual distribution of frequency subcarriers in different frequency plans of the ensemble in the common frequency band, which allows to increase the bandwidth of the cognitive radio system by n times, where n is the number of frequency plans in ensembles, due to the parallel use by different subscribers of the same network of different options for the distribution of subcarrier frequencies. The solution of this problem allows to significantly reducing the number of frequency collisions and allows increasing the subscriber capacity of the cognitive radio system. The implementation of the method is quite complicated, but it allows increasing the bandwidth of the communication system due to the simultaneous use by subscribers of the same network of different variants of the distribution of subcarrier frequencies. Thanks to the non-linear distribution of subcarrier frequencies, the bandwidth of the channel is significantly increased, while the quality of information transmission may slightly deteriorate.

In the work, the algorithm for forming ensembles of signals with quasi-orthogonal multiplexing, taking into account different values of the width of subchannels in the corresponding frequency plans was improved, and a graphical interpretation of the method was obtained.

For the first time, a method for determining the coincidence of subcarrier frequency positions has been developed, which is implemented on the basis of a pairwise comparison of frequency plans of an ensemble of signals with quasi-orthogonal frequency division multiplexing (QOFDM).

The question of reducing the signal recovery error after reception and processing by digital methods is considered. It has been proven that the Feyer kernel can serve as a tool for smoothing the waveform, which is especially important in the case of designing wireless networks, as it provides the required spectral efficiency of the signal, and, as a result, the most complete use of the available frequency resource.

A simulation model of the process of forming frequency plans for quasi-orthogonal frequency separation of channels has been developed, which allows determining the width of subchannels in the frequency plans of ensembles of complex signals, taking into account their number. This allows synthesizing ensembles of complex signals with low interaction in the frequency domain. A statistical evaluation of the intercorrelation properties of the signals was carried out, taking into account the different values of the number of subchannels, their width, and the total spectrum width of the ensemble of frequency plans. According to the obtained results, directions for increasing the volume of frequency plans of complex signals based on QOFDM were determined.

Key words: telecommunication systems, cognitive radio networks, OFDM signal, quasi-orthogonal access, Feyer's method.