

## ВІДГУК

офіційного опонента, завідувачки кафедри мобільних та відеоінформаційних технологій, кандидата технічних наук, доцента Руденко Наталії Вікторівни, на дисертаційну роботу Клобукової Людмили Петрівни «Метод квазіортогонального частотного розділення каналів в когнітивних радіомережах», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

### Актуальність теми дослідження.

Істотне збільшення кількості безпроводових взаємопов'язаних пристроїв у рамках концепції Інтернету речей, формування всепроникних мереж, перспективи впровадження мереж покоління 5G призводять до появи додаткових вимог щодо використання доступного радіочастотного спектру цивільного призначення, тим більше, що у великих індустріальних країнах більшу частину часу не використовується понад 30% радіочастотного спектру. Тому перспективним методом підвищення ефективності використання РЧС є застосування систем когнітивного радіо, що було відзначено ще на Всесвітній конференції з радіозв'язку у 2019 р. Технології когнітивних радіосистем потенційно здатні зменшити дефіцит пропускної спроможності РЧС та підвищити ефективність використання РЧС без виділення та конверсії нових частотних діапазонів. Крім того, знання про стан спектру може бути застосовано для прийняття рішення про запуск розширених алгоритмів приймача, а також адаптивного придушення перешкод. Найбільш перспективною технологією для вирішення цієї проблеми є мультиплексування (ущільнення) з частотним поділом каналів. Суть цієї технології полягає в тому, щоб розділяти наявну смугу частот на безліч підканалів (піднесучих), формування яких досягається за рахунок застосування алгоритмів перетворення Фур'є. Системи зв'язку, засновані на застосуванні такого типу технологій, ефективні при функціонуванні в умовах багатопроменевого поширення з частотно-селективними завмираннями. Стандарт, що описує дані системи, передбачає рівномірний розподіл потужності, а також однаковий індекс модуляції на кожній інформаційній піднесучій для одного абонента. Однак такий підхід не є оптимальним з погляду швидкості передачі даних за умови обмеженої випромінюваної потужності.

Тема дисертаційної роботи Л.П. Клобукової присвячена саме розробці моделей та методів синтезу ансамблів складних сигналів на основі технологій частотного розподілу каналів з максимальною спектральною ефективністю. Безумовно, актуальність теми дисертації не викликає сумнівів.

## Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.

При проведенні досліджень застосовувалися відомі підходи та методи математичного аналізу й синтезу складних технічних систем. У дисертаційній роботі застосовувалися методи системного аналізу та синтезу, теорії математичної статистики та кореляційного аналізу, теорія радіотехнічних кіл та сигналів, моделювання та комп'ютерні розрахунки. У роботі використані теоретичні основи організації мереж з частотним розділенням каналів. Коректне використання методів досліджень та математичного апарату підтверджується результатами аналітичних доведень через математичні перетворення та комп'ютерне моделювання.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертаційне дослідження автора є самостійним, оригінальним, завершеним науковим дослідженням, у якому вирішено актуальне наукове завдання. Дисертація включає такі матеріали: зміст, список скорочень, вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та додатки. Загальний об'єм дисертаційної роботи складає 133 сторінки з них: основна частина 96 сторінок, 49 рисунків, 3 таблиці. Список використаних джерел налічує 103 найменування.

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 дисертаційної роботи викладено особливості і характеристики радіосистем з когнітивними властивостями, що забезпечує налаштування параметрів приймально-передавальних пристроїв мережі таким чином, щоб не відбувалося накладання передачі даних на «ліцензійні» частоти. Завдяки своїй основній властивості когнітивні радіоелектронні засоби мають можливість тимчасово займати вільні проміжки (діри) в смузі частот або в радіоканалі для здійснення прийому та передачі інформації, при цьому уникаючи появи завад у даному діапазоні для інших засобів. Здійснено оцінку факторів появи і впливу завад множинного доступу, що чинять негативний ефект на якість роботи когнітивної мережі. Здійснено порівняння технологій мультиплексування з частотним розділенням каналів. Розглянуто ортогональне, неортогональне і швидке ортогональне частотне мультиплексування.

За результатами проведеного аналізу сформульовано завдання дослідження.

У другому розділі досліджується запропонований метод квазіортогонального частотного розділення каналів, ключовою особливістю якого є застосування індивідуального розподілу частотних піднесучих в різних

частотних планах ансамблю в загальній смузі частот, яке дозволяє вирішити питання збільшення абонентської ємності радіосистеми. Запропоновано алгоритм формування ансамблю складних QOFDM-сигналів, що включає процедуру формування частотних планів за заданими параметрами. На основі розрахунку параметрів спектрального розподілу піднесучих в сформованому ансамблі частотних планів отримано залежність значення коефіцієнтів взаємної кореляції від кількості піднесучих частот для кожного частотного плану. На основі розрахунку зроблено висновки щодо спектральної ефективності OFDM-сигналу з різними кількостями піднесучих.

Запропоновано розв'язок задачі отримання суми загального ряду Фур'є, яким описується OFDM-сигнал. Ряд Фур'є неперервної функції не завжди буде збігатися і це означає, що функцію OFDM-сигналу неможливо отримати безпосередньо від підсумовування ряду Фур'є для всіх випадків. Ця задача розв'язується методом Фейєра, підсумовуванням середніх арифметичних членів ряду. Таким чином, метод Фейєра, може, допомогти розрахувати часткові суми сигнальної функції, а, також провести порівняльний аналіз різних сигнальних функцій за критеріями енергетичної та спектральної ефективності.

У третьому розділі представлено розроблений метод визначення збігів позицій частотних піднесучих, завдяки якому на етапі формування частотних планів мережі отримуємо зменшення рівня внутрішньосистемних завад. Метод включає процедуру попарного порівняння частотних планів ансамблю сигналів при виконанні QOFDM. Для того, щоб оцінити ефективність використання ресурсу частот при умові впровадження квазіортогонального доступу на піднесучих частотах здійснена оцінка ступеня впливу внутрішньосистемних перешкод для різних значень ширини смуг підканалів між різними частотними планами та проведений аналіз похибок відновлення QOFDM-сигналів.

У четвертому розділі виконано завдання побудови імітаційних моделей процесу формування ансамблю частотних планів сигналів. Процедура оцінки можливостей використання частотного ресурсу з застосуванням методу квазіортогонального доступу на піднесучих частотах ґрунтується на дослідженні можливого ступеня впливу внутрішньосистемних перешкод сигналів при зміні ширини смуг підканалів між різними частотними планами.

Для розрахунку взаємокореляційних властивостей частотних планів було побудовано модель радіоканалу, проведено статистичний аналіз його основних параметрів, досліджено кореляційні властивості складних сигналів на основі QOFDM. 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.

### **Наукова новизна одержаних результатів:**

У процесі досліджень і моделювання в дисертаційній роботі отримані наступні нижче перераховані наукові результати:

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.

**Практичне значення** отриманих результатів полягає в тому, що:

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%;

Методи теоретичних досліджень доведені до конкретних математичних виразів і обчислювальних програм. Результати теоретичних досліджень характеристик мережі доведені до конкретних аналітичних виразів. По цих виразах побудовані відповідні графіки. Теоретичні і практичні положення дисертаційної роботи знайшли впровадження та використання в системах радіозв'язку.

Проміжні та кінцеві результати дисертаційної роботи апробовані та отримали позитивну оцінку на семи науково-технічних конференціях та опубліковані в наукових фахових виданнях, що затверджені ДАК України у якості видань, в яких публікуються результати робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Структура, об'єм та оформлення дисертаційної роботи відповідають вимогам ДАК. За результатами аналізу списку використаних джерел можна зробити висновок про проведений дисертантом ретельний аналіз вітчизняних та зарубіжних джерел за обраною тематикою досліджень.

**Зауваження.** Проте, слід зазначити і низку недоліків в дисертаційній роботі та в авторефераті.

1. У роботі було б доцільно чітко встановити відмінність складних сигналів на основі QOFDM від OFDM-сигналів

2. Запропоноване дослідження проводилося на основі стандарту IEEE 802.22, варто було б ширше описати аргументацію його вибору і особливості впровадження.

3. Не висвітлено питання як здійснюється моніторинг радіочастотного спектру для формування частотного плану.

4. Залежно від різних умов, стандарт дозволяє використовувати різні схеми модуляції: QPSK, 16-QAM або 64-QAM, однак в роботі не вказано здійснювати вибір тієї чи іншої схеми модуляції.

5. В дисертаційній роботі подекуди зустрічаються стилістичні та граматичні неточності, наприклад відсутній опис до функції (3.11) в третьому розділі роботи.

Зазначені зауваження не впливають на високу оцінку дисертаційного дослідження в цілому. Дисертаційне дослідження містить науково обґрунтовані теоретичні та практичні результати, характеризується єдністю змісту та логічністю викладу інформації, свідчить про вагомий особистий внесок автора цієї роботи.

**Висновок**

1. Вважаю, що дисертаційна робота Клобукової Людмили Петрівни «Метод квазіортогонального частотного розділення каналів в когнітивних радіомережах» відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» від 24 липня 2013 р., постанова КМУ № 567, пункти 9, 11 – 13, та відповідає спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

2. Автореферат повністю відповідає змісту дисертації.

3. Автор – Клобукова Людмила Петрівна заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Офіційний опонент,  
кандидат технічних наук, доцент  
завідувачка кафедри мобільних та  
відеоінформаційних технологій  
Державного університету  
інформаційно-комунікаційних технологій

Наталія РУДЕНКО

Підпис Руденко Н.В. засвідчую:  
доктор технічних наук, професор  
Проректорка з навчально-виховної  
та наукової роботи  
Державного університету  
інформаційно-комунікаційних технологій



Любов БЕРКМАН