

## ВІДГУК

офіційного опонента професора кафедри комп'ютерних інформаційних технологій,  
доктора технічних наук, професора Віноградова Миколи Анатолійовича  
на дисертацію 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 дисертації**

В даний час безпроводні технології передачі даних є однією з галузей телекомунікаційної промисловості, що мають перспективи найширшого розвитку і застосування. Зокрема, вони включають мобільний зв'язок, супутникове телебачення, радіодоступ в інтернет, дистанційне керування об'єктами, для яких безпосередньо здійснюється передача інформації по радіоканалу. З кожним роком кількість систем, що використовують радіоресурс, неухильно росте. На даний момент ефективність використання радіоспектру в більшості діапазонів є невисокою, а освоєння нових частотних діапазонів в силу з різних факторів відбувається досить повільно. Тому все частіше вдаються до процедур реформування та економного використання існуючих частотних діапазонів шляхом застосування технологій когнітивного радіо (КР), концепція якого визначена стандартом IEEE 802.22. Е. Ці технології дають можливість підвищити ефективність використання радіоспектру за допомогою виділення вторинним користувачам частотних каналів, що є вільними в конкретні інтервали часу, тобто, тимчасово не використовуються первинними користувачами. Це загалом не заважає роботі первинних користувачів, за якими закріплені ці частотні канали. Ефективність роботи когнітивних радіомереж значною мірою залежить від якості роботи алгоритмів виявлення незайнятих частотних каналів та алгоритмів паралельного використання різними абонентами однієї мережі різних варіантів розподілу піднесучих частот.

Приведені міркування можуть служити основою для вибору і обґрунтування перспективних напрямів досліджень науково-теоретичного і науково-прикладного характеру в області підвищення ефективності використання когнітивних радіомереж. Це, по-перше, розробка математичних моделей ансамблів складних сигналів технології мультиплексування з частотним поділом каналів та методів формування частотних планів з оптимальним використанням доступного частотного ресурсу. По-друге, це дослідження взаємкореляційних властивостей сформованих частотних планів за критеріями енергетичної та спектральної ефективності для забезпечення вимог QoS в телекомунікаційних системах сучасного безпроводового зв'язку.

Специфікою забезпечення якості обслуговування у мережах з частотним розподілом каналів є поява завад множинного доступу, що у значній мірі можуть перевищувати внутрішні шуми. По суті, маємо задачу удосконалення методів частотного мультиплексування каналів з забезпеченням мінімізації рівня частотних колізій та внутрішньосистемних завад.

Таким чином, тема дисертації Л.П. Клобукової, що присвячена підвищенню ефективності використання когнітивних радіомереж за рахунок розробки методів формування ансамблів складних сигналів технології квазіортогонального частотного доступу є актуальною науковою задачею.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень.**

Результати дисертації наведено у вигляді математичних моделей, алгоритмів, структурних схем. Показано стан і перспективи розвитку методів раціонального використання радіочастотного діапазону. Для підтвердження теоретичних результатів наведені математичні вирази функцій формування QOFDM сигналів, здійснено розрахунок параметрів спектрального розподілу піднесучих в ансамблі частотних планів. Приклади створених частотних планів для наочності представлено в графічному вигляді.

Дано аргументовані порівняльні оцінки запропонованих автором нових рішень відносно результатів інших авторів, одержаних раніше.

### **Достовірність наукових положень.**

Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, отриманих у дисертації, на наш погляд, обумовлена такими міркуваннями:

- математичний апарат, що використаний у дисертаційних дослідженнях, застосований на достатньому для інженерних задач рівні точності та коректності;
- для нових наукових результатів, які отримані в дисертації, дані теоретичних розрахунків збігаються з результатами математичного моделювання;
- математичні моделі та одержані наукові результати співпадають з інтуїтивними уявленнями про реальні фізичні процеси, які протікають в системах, що досліджувалися.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У дисертаційній роботі отримані наступні нові наукові і практичні 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.**

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%.

Теоретичні результати і висновки доведені до конкретних алгоритмів і обчислювальних програм. Результати теоретичних досліджень доведені до конкретних аналітичних виразів. По цих виразах побудовані відповідні графіки, які зручно використовувати при аналізі спектральної та енергетичної ефективності отриманих ансамблів QOFDM-сигналів

**Повнота викладення результатів дисертації в опублікованих працях.** Основні результати дисертації викладені у 18 публікаціях, серед яких: 7 статей у періодичних фахових наукових виданнях та 11 тез доповідей всеукраїнських та міжнародних конференціях.

**Мова і стиль дисертації та автореферату** цілком задовільні і відповідають вимогам стандартів оформлення науково-дослідних робіт. Зміст автореферату відповідає змісту дисертації та об'єктивно відображає основні результати роботи. Використання чужих наукових результатів без посилань на авторів у дисертації не виявлено.

**Обсяг і структура дисертації** відповідають вимогам та рекомендаціям ДАК. 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** обґрунтовано актуальність і доцільність обраної теми, запропоновано методикку наукового дослідження, сформульовано мету і задачі роботи, зазначено практичну цінність, наукову новизну, показано зв'язок роботи з науковими темами, планами, програмами, наведено відомості про апробацію результатів і їх впровадження.

**У першому розділі** виконано 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). 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 абонентськими станціями. За результатами аналізу сформульовано завдання дослідження.

**Другий розділ** присвячений розробці 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. Було проілюстровано розроблений алгоритм формування ансамблю складних сигналів на основі QOFDM. Здійснено розрахунок параметрів спектрального розподілу піднесучих в ансамблі з чотирьох частотних планів, показано зв'язок матриці коефіцієнтів взаємної кореляції зі спектральною ефективністю OFDM-сигналу з різними кількостями піднесучих.

Здійснено аналіз математичних інструментів формування дискретного сигналу, його параметрів амплітудно-частотного спектру та методів відновлення на приймальній стороні. Виокремлено проблему появи пульсацій Гіббса і їх негативний вплив при

відновленні форми переданого сигналу при застосуванні строгого перетворення Фур'є вихідної функції з табличним задаванням. Запропоновано для побудови вихідної функції сигналу, використовувати підсумовування інтеграла Фур'є за Фейером, де у якості згладжуючого множника береться трикутна вагова функція, що називається ядром Фейєра.

**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.

Здійснено дослідження похибок відновлення сигналів після прийому та опрацювання цифровими методами. Неабиякий інтерес також представляє порівняння факторів впливу частоти дискретизації та числа членів ряду розкладання на значення модуля нев'язки відновлення сигналу. Це порівняння було здійснено графоаналітичним методом. Показано вирішальний вплив дотримання цілочисельності співвідношень між частотою дискретизації та шириною основної та бічних пелюсток спектру сигналу для зменшення похибок відновлення сигналу в порівнянні з простим вибором більшої частоти дискретизації.

**У четвертому розділі** здійснена розробка математичної моделі процесу формування ансамблю частотних планів на основі QOFDM та проведено статистичну оцінку взаємкореляційних властивостей із врахуванням кількості підканалів, їх ширини та загальної ширини спектру. Проведено розрахунок статистичних характеристик максимальних викидів бічних пелюсток ВКФ різних частотних планів при різних значеннях кількості підканалів в них та ширини підканалів.

Проведено імітаційне моделювання для оцінки можливого ступеня впливу внутрішньосистемних перешкод сигналів при зміні величини смуг підканалів між різними частотними планами. Показано, що зі зміною ширини підканалів та кількості піднесучих в частотному плані, рівень взаємної кореляції між частотними планами збільшується, але не перевищує допустимого значення для двох порівнюваних процесів.

Всі міркування перевірені шляхом розрахунків та комп'ютерного моделювання.

### **Загальна характеристика роботи**

Перед тим, як давати загальну оцінку дисертаційній роботі, зупинимося на деяких недоліках.

1. Автор у своїй роботі слушно використала метод Фейєра для підсумовування частинних сум ряду Фур'є сигналів на основі OFDM. Однак, на нашу думку, для таких сигналів було б достатньо використати більш простий метод Дірихле (тобто інтеграл та ядро Дірихле).
2. При використанні когнітивної мережі з динамічною адаптацією параметри середовища функціонування не конкретизовані.
3. Адаптивна функція радіодоступу, заснована на OFDM та QOFDM, по суті, представляє собою нелінійний функціонал параметрів масштабу мережі. Відповідно, задача пошуку оптимального рішення матиме надполіноміальну складність. Ця проблема у роботі обговорюється вельми коротко.
4. Параметри частотних планів, розглянуті у і дисертації, було б доцільно супроводити асимптотичними характеристиками ефективності.
5. У дисертації зустрічаються (правда, у незначній кількості) описки та стилістичні похибки.

**Треба відмітити**, що наведені зауваження та недоліки не є принциповими і не впливають на кінцеві результати дисертаційної роботи. Більшість з них обумовлена складністю задачі, що розглядається, необхідністю розробки нових підходів та проведення великого обсягу міждисциплінарних досліджень для розгляду широкого кола питань, не всі з яких досить тісно пов'язані одне з одним.

Дисертація представляє собою одноособово написану кваліфікаційну наукову працю, яка містить нові наукові результати, має внутрішню єдність та логіку, свідчить про особистий внесок автора у науку. Автор роботи глибоко вник в суть задачі, що вирішується, виявив добру обізнаність з предметом дослідження, коректно та за потрібним призначенням застосував математичний апарат. Одержані наукові результати, особливо результати розробки моделей та наведені приклади практичних розрахунків, логічні і взаємоузгоджені та підтверджують цінність дисертаційної роботи.

### Висновки

За результатами розглядання дисертаційної роботи можна зробити такі висновки.

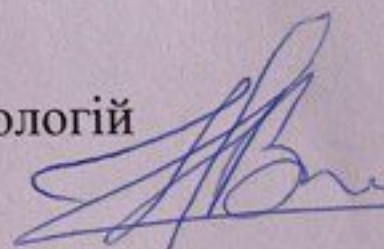
1. Дисертаційна робота в цілому є самостійно виконаним завершеним науковим дослідженням на актуальну тему. Вона містить нове рішення задачі розробки методів підвищення ефективності використання частотного ресурсу в когнітивних радіомережах.

2. Дисертація відповідає спеціальності 05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі. Основні наукові положення дисертації досить повно та об'єктивно викладені в авторефераті та публікаціях.

За своїм змістом та науковим рівнем дисертаційна робота задовольняє вимогам до кандидатських дисертацій а також п.п. 9 та 11 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р., а її автор – Клобукова Людмила Петрівна заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі.

Вважаю, що отримані результати можуть використовуватися в проектуванні та організації мереж з частотним розділенням каналів, а також при підготовці фахівців для відповідних галузей.

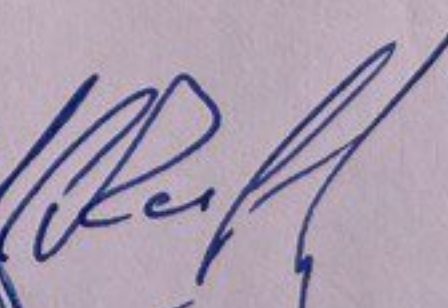
Офіційний опонент,  
доктор технічних наук, професор  
професор кафедри комп'ютерних інформаційних технологій  
Національного авіаційного університету

 М.А. Віноградов

Підпис Віноградова М.А. затверджую:

*Вчений секретар*



  
М. Григорук