

Голові спеціалізованої вченої ради Д 26.861.01

Толубку Володимиру Борисовичу

Державний університет телекомунікацій

03110, м. Київ, вул. Солом'янська, 7

## **ВІДГУК**

**офіційного опонента доктора технічних наук, Самкова  
Олександра Всеволодовича на дисертаційну роботу  
Голубенка Олександра Івановича на тему: «Розробка та  
дослідження алгоритмів амплітудно-фазового коригування  
сигналів з ортогональним частотним і просторовим  
розділенням», представленій на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 –  
телекомунікаційні системи та мережі**

### **Актуальність теми дисертації**

Технологія OFDM стала стандартом для багатьох сучасних радіосистем в зв'язку з низкою переваг, до яких відносяться висока спектральна ефективність, низький рівень між символної інтерференції, висока якість в умовах частотно селективних завмирань, досить малі обчислювальні витрати на реалізацію алгоритмів модуляції і демодуляції.

В силу особливостей сигналів з ортогональним частотним розділенням оптимальна система буде як багатовимірною так і нелінійною, що ускладнює застосування аналітичних методів аналізу. На сьогоднішній день одним з найбільш прогресивних механізмів, що дає в досить повному обсязі досліджувати статистичні параметри системи, є імітаційне і математичне моделювання. На його основі зроблено оцінювання ефективності синтезованих алгоритмів і їх чутливості в умовах різних входніх впливів, що виходять за межі припущень, зроблених при синтезі.

Подальше збільшення пропускну здатності систем зв'язку без збільшення діапазону використовуваних частот і потужності може бути пов'язано з додатковим використанням просторової розмірності. В даний час велика увага



приділяється комбінації технологій просторового розділення і методу модуляції з ортогональним частотним розділенням. В цілому підхід до побудови системи коригування фази для сигналів з ортогональним частотним і просторовим розділенням (MIMO OFDM - multiple input, multiple output OFDM) сигналів залишається таким же, однак аналіз таких систем ускладнюється за рахунок появи додаткової розмірності. З точки зору оцінювання фазових флуктуацій в приймальному тракті технологія просторового розділення може дати додатковий виграш за рахунок збільшення обсягу статистики.

Тому, дисертаційна робота здобувача Голубенко О.І., яка присвячена розробці та дослідженню алгоритмів амплітудно-фазового коригування сигналів є своєчасною і актуальною.

### **Загальна характеристика дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків (акти впровадження).

У першому розділі проведено аналіз моделей сигналів OFDM та MIMO OFDM. Отримано математичні моделі сигналів на виході каналу з частотно-часовим розсіюванням в системах зв'язку з OFDM і MIMO-OFDM. Вплив фазового шуму розкладено на фазовий зсув, однаковий для всіх частотних каналів, і міжканальну інтерференцію, дія якої еквівалентна АБГШ.

У разі застосування просторово-часового або просторово-частотного кодування переданих сигналів на приймальній стороні проводиться множення на матричний фільтр відповідного типу для декодування. Це дозволяє усунути просторову інтерференцію і підвищити співвідношення сигнал шум на 3дБ і більше.

У другому розділі розроблено алгоритми амплітудно-фазового оцінювання і коригування параметрів сигналів OFDM і MIMO-OFDM з використанням інформаційних каналів для двох способів оцінювання: комплексної і спільної незалежної - амплітуди і фази. В основу покладено апарат багатовимірної цифрової фільтрації Калмана. Сформовано рівняння



моделі стану системи оцінювання параметрів каналу і рівняння фільтрації. Особливістю даної задачі є комплексний підхід до оцінювання факторів, що погіршують якість приймання: складна характеристика багатопроменевого мобільного каналу зв'язку з частотно-часовим розсіюванням, фазова нестабільність синтезаторів частот.

У третьому розділі проаналізовано чутливості отриманих алгоритмів в умовах різних вхідних впливів, що виходять за межі припущень, зроблених при синтезі фільтра Калмана. Для цієї мети в математичному пакеті Matlab® (в т.ч. в середовищі динамічного моделювання Simulink®) побудовано імітаційні моделі систем зв'язку на основі сигналів з OFDM і MIMO-OFDM з синтезованою системою комплексного оцінювання параметрів сигналу і їх коригування на приймальній стороні.

У четвертому розділі досліджено ефективність застосування запропонованих алгоритмів в системах передачі стандартів IEEE 802.16e/m і E UTRA release 9. Дано порівняльний аналіз застосування алгоритмів з урахуванням просторового мультиплексування і ортогонального просторово-часового кодування. Сформульовано підходи до оцінювання і коригування з використанням запропонованих стандартами передачі даних функціональних особливостей структури кадрів.

**У висновках** сформульовано основні результати дисертаційної роботи.

**У додатках** представлено акти впровадження дисертаційної роботи: в навчальний процес Державного університету телекомунікацій та в практичну діяльність ПрАТ «ФАРЛЕП-ІНВЕСТ».

### **Наукова новизна отриманих результатів дисертаційної роботи**

*Метою дисертаційної роботи є розв'язання комплексу науково-технічних питань, пов'язаних з підвищенням енергетичної ефективності цифрових систем передачі*

*Об'єктом дослідження є процес коригування сигналів в телекомунікаційних мережах.*



*Предметом дослідження є завадостійкість систем передачі на основі сигналів високої розмірності в умовах радіоканалів з частотно-часовим розсіюванням.*

В дисертаційній роботі отримані наступні нові наукові положення та результати, а саме:

- удосконалено математичні моделі сигналів на виході демодулятора цифрової системи передачі з ортогональним частотним і просторовим розділенням, відмінною особливістю яких є врахування високочастотних складових фазового шуму;
- розроблено імітаційні моделі систем передачі на основі сигналів з ортогональним частотним і просторовим розділенням, що відрізняються наявністю блоку коригування фази несучої частоти;
- удосконалено алгоритм комплексного оцінювання каналу з амплітудними завмираннями і фазовими флуктуаціями і коригування сигналів з ортогональним частотним розділенням, що відрізняється використанням авторегресивної моделі каналу і багатовимірного фільтра Калмана з врахуванням як властивостей середовища поширення, так і спотворень;
- вперше розроблено алгоритм роздільного оцінювання і коригування амплітудних завмирань і фазових флуктуацій слідкуючого типу для сигналів з ортогональним частотним розділенням, відмінною особливістю якого є використання в кільці зворотного зв'язку фільтрів, узгоджених з характеристиками середовища поширення і параметрами шумів приймально-передавального тракту.

Проведені наукові дослідження дають змогу розв'язати завдання пов'язані з підвищенням енергетичної ефективності цифрових систем передачі з використанням алгоритмів амплітудно-фазового коригування сигналів з ортогональним частотним і просторовим розділенням.



### **Методи досліджень, які використані в дисертаційній роботі**

У дисертаційній роботі нові наукові положення, результати та висновки отримані на загальних положеннях теорії дискретних систем, теорії ймовірності, прикладній теорії математичної статистики, статистичній теорії радіотехнічних систем. При розробці алгоритмів оцінювання параметрів каналу використовується теорія дискретної багатовимірної фільтрації Калмана.

### **Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами**

Обраний напрям досліджень відповідає тематиці науково-дослідних робіт Державного університету телекомунікацій. Результати дисертаційної роботи знайшли застосування в науково-дослідній роботі «Розробка рекомендацій щодо побудови ефективного цифрового каналу зв'язку з використанням  $n$ -вимірних багатопозиційних групових OFDM-сигналів кубічно-амплітудно-фазової модуляції» (держ. реєстр № 0118U003890).

Впровадження результатів досліджень підтверджується відповідними актами, наведеними в додатку дисертаційної роботи.

### **Практична цінність отриманих результатів**

Отримані в дисертації результати дають змогу сформулювати пропозиції щодо підвищення енергетичної ефективності систем приймання сигналів з OFDM і MIMO-OFDM в умовах багатопромених мобільних радіоканалів наземного і авіаційного зв'язку, в тому числі для БПЛА.

Отримано алгоритми оцінювання параметрів каналу і коригування амплітуди і фази сигналів з ортогональним частотним і просторовим розділенням на основі інформаційних частотних каналів, що дають можливість знизити ймовірність помилкового приймання інформації в існуючих і перспективних мережах зв'язку.

Розроблено імітаційні моделі систем передачі на основі сигналів з ортогональним частотним і просторовим розділенням з блоком коригування



фази несучої частоти. Моделі орієнтовані на отримання оцінок різних параметрів і характеристик сигналів в різних точках системи в умовах довільних адитивних і фазових впливів, що дають змогу знизити витрати на розробку систем зв'язку на етапі проектування.

Удосконалено алгоритм комплексного оцінювання каналу з амплітудними завмираннями і фазовими флуктуаціями і коригування сигналів з ортогональним частотним розділенням, що відрізняється використанням авторегресивної моделі каналу і багатовимірного фільтра Калмана з врахуванням як властивостей середовища поширення, так і спотворень, що дають змогу отримати вигоду по енергетичній ефективності по відношенню до системи оцінки пілотних несучих частот до 3-4 дБ.

Вперше розроблено алгоритм роздільного оцінювання і коригування амплітудних завмирань і фазових флуктуацій слідкуючого типу для сигналів з ортогональним частотним розділенням, відмінною особливістю якого є використання в кільці зворотного зв'язку фільтрів, узгоджених з характеристиками середовища поширення і параметрами шумів приймально-передавального тракту, який надає можливість отримати вигоду по енергетичній ефективності до 3 дБ.

Розроблено алгоритм комплексного оцінювання каналу з амплітудними завмираннями і фазовими флуктуаціями і коригуванням сигналів з ортогональним частотним і просторовим розділенням, з використанням авторегресивної моделі каналу і багатовимірного фільтра Калмана з врахуванням як властивостей середовища поширення, так і спотворень, що виникають в приймально-передавальному тракті системи зв'язку з просторово-часовим кодуванням, завдяки якому збільшиться ефективність. В разі OFDM сигналів підвищення ефективності може досягати до 2 дБ за рівнем адитивного шуму, в разі сигналів з MIMO-OFDM - до 3 дБ.

Розроблено алгоритм роздільного оцінювання і коригування амплітудних завмирань і фазових флуктуацій слідкуючого типу для сигналів з ортогональним частотним і просторовим розділенням, що відрізняється



використанням в кільці зворотнього зв'язку фільтрів, узгоджених з характеристиками середовища поширення і параметрами шумів приймально-передавального тракту системи зв'язку з просторово-часовим кодуванням. Завдяки якому обробка сигналів на інформаційних і пілотних несучих в приймачах систем авіаційної зв'язку, в тому числі для БПЛА підвищить енергетичну ефективність останніх на 1-5 дБ.

Вперше розроблені структурні схеми з використанням при коригуванні сигналів комбінації оцінок характеристики каналу, отриманих з інформаційних сигналів за допомогою нових алгоритмів і з пілотних сигналів за допомогою стандартних методів, що дозволяє покращити енергетичну ефективність на 3%.

Результати дисертаційної роботи знайшли застосування в науково-дослідній роботі на тему: «Розробка рекомендацій щодо побудови ефективного цифрового каналу зв'язку з використанням n-вимірних багатопозиційних групових OFDM-сигналів кубічно-амплітудно-фазової модуляції» (ДУТ, держ. реєстр № 0118U003890).

Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Державного університету телекомунікацій та в практичній діяльності ПрАТ «Фарлеп-Інвест».

Впровадження результатів досліджень підтверджується відповідними актами, наведеними в додатку до дисертаційної роботи.

#### **Повнота викладу наукових положень, висновків, рекомендацій в опублікованих працях**

Основні положення та зміст дисертації відображено в 14 наукових працях: 10 статей в науково-технічних журналах, збірниках наукових праць, 4 матеріали доповідей на науково-технічних конференціях.

#### **Відповідність дисертації встановленим вимогам ДАК України**

Дисертаційна робота Голубенко Олександра Івановича, яка виконана на тему: «Розробка та дослідження алгоритмів амплітудно-фазового коригування



сигналів з ортогональним частотним і просторовим розділенням» за оформленням відповідає вимогам ДАК України, що пред'являються до дисертаційних робіт. Дисертація написана сучасною науково-технічною мовою, послідовно та логічно. Автореферат дисертації достатньо повно розкриває її зміст. Стиль викладу матеріалів дисертаційної роботи забезпечує без утруднень доступність їх сприйняття.

### **Зауваження до дисертаційної роботи**

1. В дисертаційній роботі в першому розділі недостатньо представлені розрахунки при різних кількостях антен на передавальній та приймальній сторонах.

2. В роботі доцільно було б більш детально зупинитись на перевагах застосування алгоритмів амплітудно-фазового оцінювання і коригування параметрів сигналів OFDM і MIMO-OFDM з використанням інформаційних каналів для комплексного оцінювання амплітуди та фази.

3. В третьому розділі дисертаційної роботи не наведено відповідні статистичні дані аналізу запропонованих алгоритмів в умовах доплерівського розсіювання.

4. Не деталізовано опис найбільш ефективного впровадження, в приймальні пристрої алгоритму, оснований на багатовимірному цифровому фільтрі Калмана.

5. В дисертаційній роботі не представлені розрахунки підвищення пропускної здатності радіоліній зв'язку з повітряними суднами при застосуванні сигналів з модуляцією OFDM в поєднанні з технологіями цифрового діаграмоутворення.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку та цінність дисертаційної роботи, так як робота має завершеність, положення, висновки та рекомендації науково обґрунтовані.



## ВИСНОВКИ

1. Дисертаційна робота Голубенка Олександра Івановича, яка виконана на тему: «Розробка та дослідження алгоритмів амплітудно-фазового коригування сигналів з ортогональним частотним і просторовим розділенням» за змістом є закінченим науковим дослідженням, у якому отримані нові наукові результати, важливі на сучасному етапі для подальшого розвитку телекомунікаційних систем та мереж і цілком відповідає вимогам «Паспорту» спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

2. Автор дисертації є кваліфікованим фахівцем, що глибоко занурився в суть поставленого завдання, добре володіє сучасними методами досліджень та вміло використовує їх для вирішення комплексу поставлених науково-технічних задач.

3. Автореферат дисертації повністю відповідає змісту дисертації.

4. Дисертація відповідає вимогам, що зазначені у документі «Порядку присудження наукових ступенів» затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567 (зі змінами, внесеними згідно з постановами КМ № 656 від 19.08.2015 року, № 1159 від 30.12.2015 року, № 567 від 27.07.2016 року), та вимогам МОН України до кандидатських дисертацій і авторефератів, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – «Телекомунікаційні системи та мережі».

Офіційний опонент

доктор технічних наук,

старший науковий співробітник

заступник директора

Інституту електродинаміки НАН України



 О.В. Самков