

Голові спеціалізованої вченої ради Д 26.861.01  
Толубку Володимиру Борисовичу  
Державний університет телекомунікацій  
03110, м. Київ, вул. Солом'янська, 7

## **ВІДГУК**

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

### **Актуальність теми дисертації**

Вивчення досвіду провідних країн свідчить, що надання належної уваги створенню та вдосконаленню інформаційно-телекомунікаційних систем та технологій, забезпечує перехід до нового етапу розвитку суспільства – інформаційного.

Безпроводові цифрові комунікації, бурхливо стартувавши, продовжують розвиватися надзвичайно швидко. Цьому сприяє неухильний прогрес в мікроелектроніці, що дозволяє випускати більш складніші і при цьому все більш дешевші засоби безпроводового зв'язку. Низька вартість, швидкість розгортання, широкі функціональні можливості передачі даних, телефонії, відеопотоків роблять безпроводові мережі одним з основних напрямків розвитку телекомунікаційної індустрії.

У технологіях Wi-Fi, LTE і WiMAX передача інформації здійснюється за допомогою сигналів високої розмірності, що формуються за допомогою технологій ортогонального частотного мультиплексування (OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing) і багатоантенних систем (MIMO - Multiple Input, Multiple Output).

Перспективним застосуванням OFDM технології є авіаційний зв'язок. В роботі використано багатоприменеве поширення і можливість застосування технології OFDM в авіаційному зв'язку, в тому числі стосовно БПЛА. Особливо важливо забезпечити енергетичну ефективність систем передачі інформації в авіаційних комплексах в умовах жорсткого обмеження просторово-частотних параметрів бортової радіоелектронної апаратури. Підвищення якості зв'язку, її енергетичної ефективності вимагає врахування зміни характеристик каналів поширення та

приймально-передавальних трактів і коригування сигналів. Однак такі завдання або не вирішуються, або мають не системні, локальні рішення.

Виходячи з зазначеного, актуальним питанням дослідження є розробка та дослідження алгоритмів амплітудно-фазового коригування сигналів з ортогональним частотним і просторовим розділенням, що є перспективним, важливим й економічно обґрунтованим напрямом розвитку науки та техніки на сучасному етапі.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації**

Автор добре розуміє специфіку наукового завдання та коректно формулює його постановку.

При проведенні досліджень використовувались методи математичного аналізу та синтезу складних технічних систем, класичні методи теорії зв'язку та методи теорії інформації, теорії ймовірності, методи теорії інваріантності та оптимального управління, методи імітаційного моделювання.

### **Достовірність одержаних результатів**

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, результатів, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі, досягаються ретельним багатостороннім системним аналізом реально існуючих процесів у сфері телекомунікацій взагалі та в об'єкті дослідження зокрема. Коректне використання методів досліджень та математичного апарату підтверджується результатами аналітичних доведень через математичні перетворення, результати імітаційного моделювання, а також практичними результатами, які відображено в актах впровадження.

### **Наукова новизна та важливість результатів**

У результаті проведених досліджень розроблено алгоритми амплітудно-фазового коригування сигналів з ортогональним частотним і просторовим розділенням. При цьому отримано наступні наукові результати:

1. 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.

2. Розроблено імітаційні моделі систем передачі на основі сигналів з ортогональним частотним і просторовим розділенням, що відрізняються наявністю блоку коригування фази несучої.

3. Набув подальшого розвитку алгоритм комплексного оцінювання каналу з амплітудними замираннями і фазовими флуктуаціями та коригуванням сигналів з ортогональним частотним розділенням, що відрізняється використанням авторегресивної моделі каналу й багатовимірного фільтра Калмана з врахуванням як властивостей середовища поширення, так і спотворень.



4. Вперше розроблено алгоритм роздільного оцінювання і коригування амплітудних завмирань та 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 й параметрами шумів приймально-передавального тракту.

Таким чином, проведені наукові дослідження і одержані результати забезпечили вирішення актуального наукового завдання з підвищення енергетичної ефективності цифрових систем передачі з використанням алгоритмів амплітудно-фазового коригування сигналів.

Наукова новизна положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації, підтверджується відсутністю аналогічних підходів у відкритих джерелах.

*Метою дисертаційної роботи* є підвищення енергетичної ефективності цифрових систем передачі на основі сигналів з ортогональним частотним і просторовим розділенням за рахунок застосування нових, в тому числі оптимальних, алгоритмів оцінювання і коригування амплітуди та фази сигналів на виході каналів з частотно-часовим розсіюванням в умовах комбінованих завад.

Об'єкт дослідження – процес коригування сигналів в телекомунікаційних мережах.

Предмет дослідження – завадостійкість систем передачі на основі сигналів високої розмірності в умовах радіоканалів з частотно-часовим розсіюванням.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішені наступні наукові завдання:

- отримано алгоритми оцінювання параметрів каналу і коригування амплітуди та фази сигналів з ортогональним частотним й просторовим розділенням на основі інформаційних частотних каналів, що дозволяють 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. Моделі орієнтовані на отримання оцінок різних параметрів і характеристик сигналів в різних точках системи в умовах довільних адитивних та фазових впливів, що дозволяє знизити витрати на розробку систем зв'язку на етапі проектування;
- удосконалено алгоритм комплексного оцінювання каналу з амплітудними завмираннями і фазовими флуктуаціями та коригування сигналів з ортогональним частотним розділенням, які відрізняються використанням авторегресивної моделі каналу й багатовимірного фільтра Калмана з врахуванням як властивостей середовища поширення, так і спотворень, що дозволить отримати вигоду по енергетичній ефективності по відношенню до системи оцінки пілотних несучих до 3-4 дБ;
- вперше розроблено алгоритм роздільного оцінювання і коригування амплітудних завмирань та 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 й параметрами шумів приймально-передавального тракту, який дозволить отримати вигоду по енергетичній ефективності до 3 дБ;
- розроблено алгоритм комплексного оцінювання каналу з амплітудними завмираннями і фазовими флуктуаціями та коригування сигналів з ортогональним



частотним й просторовим розділенням, з використанням авторегресивної моделі каналу та 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 та фазових флуктуацій слідкуючого типу для сигналів з ортогональним частотним й просторовим розділенням, що відрізняється використанням в кільці зворотного 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%.

**Практична значимість та важливість для галузі** полягає у тому, що обраний напрям досліджень відповідає тематиці науково-дослідної роботи «Розробка рекомендацій щодо побудови ефективного цифрового каналу зв'язку з використанням  $n$ -вимірних багатопозиційних групових OFDM-сигналів кубічно-амплітудно-фазової модуляції» (Державний університет телекомунікацій, м. Київ, ДР № 0118U003890).

**Оцінка змісту дисертації, її завершеність у цілому, відповідність оформлення дисертації** вимогам, затвердженим МОН України. Дисертаційна робота складається з чотирьох розділів, в яких логічно на високому науково-технічному рівні викладено рішення поставленої задачі дослідження.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет, методи дослідження, визначено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, представлено загальну характеристику роботи, апробацію, особистий внесок автора, а також публікації за темою дисертації.

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 *другому* розділі представлено отримані залежності ймовірності помилкового приймання ( $p_{\text{пом}}$ ) від співвідношення сигнал-шум при когерентному прийманні. Визначено  $p_{\text{пом}}$  для шести інформаційних OFDM-символів, що передаються після одного навчального. Результати підкреслюють високу ефективність алгоритму.



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 багатопробеневого мобільного каналу зв'язку з частотно-часовим розсіюванням, фазова нестабільність синтезаторів частот.

Рішення завдання синтезу оптимального фільтра для комплексного оцінювання параметрів каналу представлено рівнянням фільтрації.

Крім оптимального запропоновано алгоритм роздільного коригування амплітудних і фазових флуктуацій несучої OFDM-сигналу слідкуючого типу, що використовує інформаційні канали.

На основі апарату багатовимірної фільтрації Калмана синтезовано алгоритм оцінювання і коригування амплітуди і фази сигналів з OFDM, що використовує інформаційні частотні канали. Синтезований алгоритм дозволив підвищити енергетичну ефективність системи передачі в порівнянні зі стандартним алгоритмом оцінювання параметрів каналу за пілотним частотним каналам від 3-4 дБ до 10-15 дБ в залежності від характеру і рівня завад в каналі.

У *третьому* розділі проведено кількісне оцінювання впливу фазового шуму, побудовано імітаційну модель системи зв'язку на основі OFDM. З використанням імітаційної моделі побудовані залежності ймовірності появи помилок  $p_{\text{пом}}$  від потужності фазових флуктуацій в діапазоні частот  $(0.01R, R \cdot N_c)$  для різного відношення сигнал/шум (ВСШ) в каналі зв'язку для системи зв'язку на основі стандарту IEEE 802.11a

Описано методику дослідження статистичних характеристик як сигналів усередині системи, так і якості роботи системи зв'язку в цілому. В якості основного критерію роботи вибрано відносну кількість помилок на кожний біт інформації, що передається.

Методика дослідження складається з двох етапів. Перший етап - це отримання часової реалізації процесу на виході системи. Другий етап включає в себе обробку даної реалізації з метою отримання необхідних статистичних характеристик.

Проаналізовано вплив на систему зв'язку з OFDM і MIMO-OFDM білого адитивного шуму і фазового шуму з поліноміальною СЦП в умовах доплерівського розсіювання.

У *четвертому* розділі запропоновано проводити детектування за допомогою пілотних частотних підканалів. При цьому необхідно інкапсулювати оцінку сигналів на цих частотах, отриману шляхом аналізу пілотних частотних підканалів в схеми компенсації, які здійснюють оцінку інформаційних сигналів.

Для коротких пакетів більш перспективне використання схеми представленої на рис. 6 у зв'язку з тим, що на тривалості пакета отримана під час передачі першого навчального OFDM-символу оцінювання ЧХ каналу дозволяє вибрати найбільш ефективний набір початкових значень для фільтра Калмана.

У випадку з запропонованим алгоритмом пілотні канали можуть бути використані для отримання проміжних початкових оцінювань інформаційних сигналів  $s_k(n)$  і, відповідно, підвищення точності оцінки параметрів каналу системою коригування.



Цей підхід також доцільний і в разі роботи з технологією просторового мультиплексування (SDM), що дозволить виконувати більш чітке розділення каналів на приймальній стороні.

*Висновки* дисертаційної роботи підкреслюють наукову новизну і практичну цінність розробок.

**Оцінка мови та стилю викладання** дисертації і автореферату. Мова та стиль дисертації та автореферату свідчать про вміння автора аргументовано формулювати думки. Всі розділи роботи мають внутрішню єдність та завершеність. Змістовне наповнення підрозділів роботи відповідає змісту визначених розділів.

Отримані підсумкові результати дисертації повністю співпадають із метою і науковими задачами, сформульованими у вступі. В цілому дисертаційна робота сприймається як закінчена наукова праця, що містить нові наукові результати.

### **Підтвердження повноти викладу результатів дисертації в наукових фахових виданнях**

Наукова новизна безсумнівна та достатня для дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Основні результати дисертаційних досліджень опубліковано у 14 наукових працях. Всього опубліковано у фахових науково-технічних журналах 10 статей. Опубліковано 4 тези доповідей на наукових конференціях різного рівня.

### **Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації**

Зміст автореферату відповідає основним положенням дисертації і дає повне уявлення про отримані автором основні результати дослідження, їх новизну та практичну значимість.

Разом з тим, у дисертації існує ряд **недоліків**, що вимагають певних зауважень:

1. У першому розділі дисертаційної роботи доцільно було б визначити основні переваги та недоліки існуючих мереж побудованих з використанням OFDM та MIMO-OFDM.
2. У другому розділі дисертаційної роботи бажано було б провести більш детальний аналіз застосування алгоритмів амплітудно-фазового оцінювання й коригування параметрів сигналів з використанням інформаційних каналів для двох способів оцінювання: комплексного та спільної незалежної - амплітуди і фази.
3. При порівнянні алгоритмів амплітудно-фазового оцінювання і коригування параметрів сигналів не достатньо аргументовано, який є переважніший.
4. У третьому розділі дисертаційної роботи не повною мірою розкрито сутність щодо вибору параметрів для роботи системи оцінювання характеристики каналу і коригування амплітуди та фази.

5. В роботі автор запропонував схеми обробки сигналів на інформаційних та пілотних несучих в приймачах систем авіаційного зв'язку, в тому числі і для БПЛА, проте немає чіткого пояснення переваги застосування.

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

### ВИСНОВОК

Вивчення дисертаційної роботи, автореферату та опублікованих здобувачем наукових праць дозволяє стверджувати, що дисертаційна робота відповідає вимогам, які 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 - Голубенко Олександр Іванович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

Офіційний опонент кандидат технічних наук,  
доцент, начальник факультету  
Военно-дипломатичної академії  
імені Євгенія Березняка

О.І.ЧУМАК

Підпис Чумака О.І. засвідчую

Тимчасово виконуючий обов'язки начальника Военно-дипломатичної академії  
імені Євгенія Березняка



О.М.МІШКОВ