

## ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора  
Почерняєва Віталія Миколайовича на дисертаційну роботу Круглика Олега  
Станіславовича на тему «Ефективна демодуляція та ідентифікація сигналів із  
фазовою маніпуляцією у каналах із несприятливими умовами радіоприймання»,  
представлену на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань  
17 Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 172 Телекомунікації та  
радіотехніка, складений на підставі вивчення дисертації та  
наукових праць дисертанта

### Актуальність теми дисертації

Дисертаційна робота Круглика О.С. присвячена вирішенню завдань підвищення ефективності приймання та оброблення сигналів у сучасних цифрових системах радіозв'язку. Зокрема, проведено дослідження та розробка нових методів ідентифікації та демодуляції радіосигналів із фазовою маніпуляцією у радіоканалах, характеристики якого наперед невідомі та швидко змінюються. Зауважимо, що в таких каналах традиційні методи приймання часто не забезпечують стійку символну та частотну синхронізацію, надійну фреймову синхронізацію, зокрема, при наявності початкового зміщення носійної частоти, надійне розпізнавання деяких протоколів передачі. Також традиційні методи приймання не є достатньо ефективними при наявності негаусівських завад та непристосовані до сучасних технологій передачі зі співпадаючими носійними (Carrier-in-Carrier). Отже, з огляду на вказані обставини тема дисертаційного дослідження Круглика О.С. є актуальною для модернізації існуючих та створення нових зразків цифрового радіозв'язку.

### Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Удосконалено метод різницевої кореляції за рахунок введення адаптивного порогу прийняття рішення та запропонованої схеми реалізації на платформі FPGA;
2. Удосконалено метод демодуляції сигналів, який поєднує схеми синхронізації з прямою (feedforward) та зворотною (feedback) петлями стеження, який забезпечує кращу, в порівнянні з класичними методами демодуляції, обробку сигналів із фазовою маніпуляцією в каналах зі швидкою зміною характеристик передавання для широкого діапазону відношень сигнал/шум;
3. Удосконалено метод демодуляції сигналів із фазовою маніпуляцією на основі теорії корпускулярної фільтрації, який складає нелінійне адаптивне оцінювання невідомих параметрів сигналу, які введені у запропоновану модель вектору стану, та який дозволяє підвищити точність оцінки параметрів сигналу та покращити завадостійкість його оброблення при наявності негаусівських завад у порівнянні з класичними схемами синхронізації, зокрема, заснованих на детекторах Гарднера та Костаса;



4. Удосконалено метод декодування поля PLHEADER фізичних рівнів стандартів DVB-S2\S2X, що дозволяє вирішити задачу «сліпого» розрізнення сигналів стандартів DVB-S2 і DVB-S2X;

5. Удосконалено метод ідентифікації сигналів типу Carrier-in-Carrier на основі розрахунку кумулянтів вищих порядків.

Наукові положення та висновки дисертаційної роботи в цілому є обґрунтованими та підтверджені шляхом порівняння результатів теоретичного аналізу та імітаційного моделювання. Автором застосовано критерій надійності розпізнавання на основі площі під кривою робочих характеристик приймача, який переконливо свідчить про ефективність запропонованих методів.

Достовірність наукових положень та висновків дисертаційної забезпечена коректністю постановки математичних задач з урахуванням відповідних обмежень та використанням сучасних математичних методів, відповідністю запропонованих математичних моделей фізичній суті процесів в досліджуваних об'єктах. Результати дисертації Круглика О.С. пройшли апробацію на наукових конференціях, семінарах та підтверджені актами впровадження результатів в дослідно-конструкторських роботах.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

### **Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності**

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Круглика О.С. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми Телекомунікації та радіотехніка.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям приймання та оброблення радіосигналів у каналах зі складними умовами передачі.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Круглика Олега Станіславовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідні джерела.

### **Мова та стиль викладення результатів**

Дисертаційна робота написана українською мовою.

Всі наукові результати мають належну послідовність викладення, загальноприйнятий стиль мовлення. Структура та науковий стиль викладення дисертації характеризується логічністю викладення матеріалу, що дозволило дисертанту послідовно розглянути всі зазначені питання.

Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 140 сторінок.



У вступі розкривається сутність досліджених питань демодуляції та ідентифікації сигналів із фазовою маніпуляцією в несприятливих умовах радіоприймання, показана її значимість в сучасних телекомунікаційних системах, а також дана загальна характеристика наукової роботи.

У першому розділі «Постановка задачі та загальний аналітичний огляд демодуляції сигналів із фазовою маніпуляцією» проведено опис постановки завдання синхронізації в системах цифрового зв'язку. Розкривається поняття несприятливих умов радіоприймання, які характеризуються швидкою зміною параметрів характеристики каналу передавання. Акцентується увага на залежності вибору схеми синхронізації відповідно до типу множинного доступу, який використовується у конкретній системі зв'язку. Проведено чисельне моделювання традиційних схем демодуляції з використанням найбільш популярних відомих методів оцінки невідомих параметрів сигналу із режимом мультиплексування з часовим розділенням для випадку каналу без зміни характеристик передавання і для випадку каналу зі зміною характеристик передавання протягом всього пакету даних. Розглянуто спосіб ефективного використання спектру, який заснований на технології Carrier-in-Carrier, суть якої полягає в одночасному використанні частотного ресурсу кількома терміналами зв'язку. Розглянуто основні питання, що виникають при розділенні та виявленні сигналів типу Carrier-in-Carrier. Результати проведеного чисельного моделювання показали необхідність розробки альтернативних методів синхронізації та ідентифікації.

У другому розділі «Ефективна демодуляція ФМ сигналів у каналах з несприятливими умовами радіоприймання» досліджено метод демодуляції сигналів та фреймову синхронізацію за допомогою диференціального корелятора. Зокрема проведено аналіз існуючих рішень та запропоновано метод демодуляції сигналів, який поєднує алгоритми прямого оцінювання параметрів сигналу (feedforward) з подальшою синхронізацією параметрів у схемах зі зворотним зв'язком (feedback). Виконується порівнювальне моделювання відомих традиційних методів демодуляції та даного методу на прикладі сигналів з фазовою маніпуляцією. Отримані результати підтверджують, що в умовах швидкої зміни параметрів сигналу алгоритм забезпечує мінімальне значення бітової похибки в залежності від SNR у порівнянні з традиційними методами.

Також у другому розділі досліджується метод побудови підсистем фреймової синхронізації. Метод, на відміну від традиційних, дозволяє забезпечити надійну фреймову синхронізацію вже на початковому етапі з'єднання, коли ще не забезпечена надійна синхронізація носійної частоти. Запропонований алгоритм адаптовано під реалізацію на платформі програмованих логічних інтегральних схем. Проведено порівняльне чисельне моделювання, яке на основі побудованих статистичних характеристик ймовірності пропуску та ймовірності хибної тривоги підтверджує переваги запропонованого методу над відовими.

У третьому розділі «Демодуляція сигналів на основі корпускулярної фільтрації» застосовано підхід до демодуляції сигналів за рахунок удосконалення моделі простору станів сигналу спостереження з урахуванням динаміки оновлення параметрів каналу. На основі моделі у просторі станів сформовано



алгоритм демодуляції сигналів з фазовою маніпуляцією. Ефективність запропонованого методу була перевірена для задачі демодуляції QPSK сигналу на фоні негаусівського шуму. Запропонований метод демодуляції на основі корпускулярної фільтрації порівнювався із демодулятором, що базується на традиційних контурах синхронізації Гарднера та Костаса. З побудованих характеристик бітової похибки від співвідношення сигнал/шум видно, що при кількості корпускул рівній 10000 запропонований метод забезпечує меншу бітову похибку у порівнянні із класичним демодулятором.

У четвертому розділі «Застосування запропонованих методів демодуляції в задачі детектування сигналів стандартів DVB-S2 і DVB-S2X» досліджено детектор, який дозволяє визначити параметри фрейму для систем широкосмугового сповіщення DVB-S2 та DVB-S2X. В запропонованому методі детектування та класифікації DVB-S2 і DVB-S2X сигналів ключовими елементами є корелятор, демодулятор та детектор. Детектор дає змогу визначити чи передається сигнал згідно стандарту DVB-S2, або стандарту DVB-S2X. Важливими складовими даного методу детектування є спосіб розрахунку бітів PLHEADER та декодування бітової послідовності поля PLSCODE. Приймання рішення, щодо результатів детектування визначається похибкою, яка розраховується при декодуванні. Розроблено відповідну модель в середовищі Matlab. В моделі розраховано залежність ймовірності пропускну здатності від відношення сигнал/шум. Отримані характеристики показують високу ефективність представленого способу детектування, а отже і декодування поля PLHEADER, для сигналів, які передаються за стандартами DVB-S2 і DVB-S2X, навіть при негативних значеннях сигнал/шум.

У п'ятому розділі «Ідентифікація сигналів типу carrier-in-carrier із використанням запропонованих способів синхронізації МФМ сигналів» пропонується метод виявлення суми двох QPSK сигналів на основі використання кумулянтів четвертого порядку. Хоча сучасні методи кодування з виправленням помилок дозволяють працювати зі швидкостями, близькими до теоретичної межі Шеннона, пропускну здатність каналу можна збільшити за допомогою сигналів типу Carrier-in-Carrier, у який кілька переданих сигналів займають той самий частотний діапазон. У випадках радіорозвідки та аналізу спектра, необхідно виявити наявність сигналу Carrier-in-Carrier і виконати «сліпе» розділення двох або більше сигналів. В даному розділі запропоновано метод виявлення сигналів Carrier-in-Carrier, який базується на виявленні перетворення сузір'я сигналів. Запропонований метод виявлення порівнюється з підходом, який заснований на стандартному відхиленні середнього радіуса точок сигнального сузір'я в одному квадранті комплексного сузір'я. Встановлено, що запропонований метод забезпечує правильне визначення суми сигналів QPSK для широкого класу ситуацій, які зустрічаються на практиці. Показано також перевагу запропонованого методу детектування сигналу Carrier-in-Carrier сигналів перед методом «радіусів».

У розділі «Висновки» наведено основні результати дисертації.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».



### **Оприлюднення результатів дисертаційної роботи**

Наукові результати дисертації висвітлені у 8 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 3 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 1 стаття у періодичному науковому виданні, проіндексованому у базі даних Scopus; 1 стаття в іноземному виданні.

Також результати дисертації були апробовані на 3 наукових фахових конференціях.

Відмітимо, що в статті «Ефективна демодуляція QPSK сигналів у каналах з несприятливими умовами радіоприймання», що опублікована в Віснику НТУУ КПІ, серія «Радіотехніка. Радіоапаратобудівництво», 2019, №78, с.13-18 на рис.7 незрозуміло, яке значення величини BER відповідає відношенню сигнал/шум 15 дБ, але в дисертаційній роботі рис.2.6 не відповідає рис.7 статті. На рис.6 цієї ж статті в функціональній схемі відображені не пристрої, а алгоритмічні дії. Нажаль, це знайшло відображення і в дисертаційній роботі (рис.2.4).

В опублікованих працях в наукових виданнях повністю викладено основні наукові положення дисертаційної роботи та отримані результати з дотриманням принципів академічної доброчесності, а рівень та кількість публікацій відповідають вимогам до дисертацій представлених на здобуття ступеня доктора філософії в Україні.

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи**

При загальній позитивній оцінці варто зазначити ряд зауважень:

1. Не чітко визначено поняття «ефективна демодуляція».
2. Не надано характеристики терміну «несприятливі умови радіоприймання»: чи враховується багатопроменевість, або міжсимвольна інтерференція, або умови характеризуються різними видами завмирань, або потрібно враховувати це загалом.
3. Не надано обмежень використання моделей, що приведено в розділі 4.
4. Не представлено порівняння результатів аналізу демодулятора, що наведені у розділі 2, із результатами аналізу демодулятора за методом корпускулярної фільтрації, які розглянуто у розділі 3.
5. Не визначено відношення сигнал/шум, яке використано: це співвідношення спектральної щільності потужності енергії на біт до шуму, співвідношення енергії на символ до спектральної щільності потужності шуму чи це відношення несучої до шуму модульованого сигналу.
6. Потребує пояснення перший доданок у формулі на стор.98.
7. Не зрозуміло, які дані приведені на рис.1.11: експериментальні або теоретичні, якщо теоретичні, то по якій формулі проведені обчислення.

Рисунки дисертаційної роботи рясніють англійськими назвами та скороченнями. Перелік умовних позначень має некоректності.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

## Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Круглика Олега Станіславовича на тему «Ефективна демодуляція та ідентифікація сигналів із фазовою маніпуляцією у каналах із несприятливими умовами радіоприймання» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Круглик Олег Станіславович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка.

### Офіційний опонент:

професор кафедри «Радіоелектронних систем та технологій» Факультету телекомунікацій та радіотехніки  
Державного університету інтелектуальних технологій і зв'язку,  
д.т.н., проф.



Віталій ПОЧЕРНЯЄВ

М.П.

« 07 » квітня 20 23 року

