

РЕЦЕНЗІЯ

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

Актуальність теми дисертації.

Розширення зон покриття широкосмугового доступу є актуальним завданням розвитку сучасних систем цифрового бездротового зв'язку. В наземних та супутникових системах використовують новітні технології передавання та оброблення сигналів, такі як: MIMO-системи, OFDMA, кооперативна ретрансляція. Однак впровадження нових технологій пов'язане з технічними проблемами, зокрема, з необхідністю розв'язання задачі синхронізації сигналів на вході приймача. Це стає особливо актуальним для систем радіомоніторингу, які є важливою частиною сучасної інфраструктури цифрового зв'язку. В таких системах приймання сигналу часто виконується у "третьій точці", де застосування класичних методів приймання та демодуляції є недостатньо ефективним. Це ускладнюється тим, що найважливіші характеристики сигналу (носійна частота, символна швидкість, тип модуляції, спосіб мультиплексування тощо) зазвичай невідомі. Так само часто невідомими є характеристики каналу передавання. Тому розробка ефективних та стійких до несприятливих умов приймання методів цифрової синхронізації є ключовим завданням на шляху створення нових систем цифрового радіозв'язку. Оскільки системи із використанням фазової маніпуляції сигналу є найбільш поширеними та практично важливими, дослідження та розробка методів демодуляції сигналів із фазовою маніпуляцією, викладені в дисертації Круглика О. С., мають велике значення.

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 запропоновано схему реалізації нового методу на платформі FPGA.
2. Запропоновано гібридний метод демодуляції сигналів, який поєднує схеми синхронізації типів feedforward та feedback. Метод 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 (SNR).
3. Розроблено метод демодуляції сигналів із фазовою маніпуляцією на основі теорії корпускулярної (багаточасткової) фільтрації. Основу методу складає нелінійне адаптивне оцінювання невідомих параметрів сигналу, які введені в запропоновану модель вектору стану. Метод дозволяє суттєво підвищити точність оцінки параметрів сигналу та, відповідно, покращити завадостійкість його оброблення у порівнянні з класичними схемами синхронізації, зокрема, заснованих на детекторах Гарднера та Костаса.
4. Запропоновано новий метод декодування поля PLHEADER фізичних рівнів стандартів DVB-S2\S2X, який дозволяє вирішити задачу «сліпого» розрізнення сигналів стандартів DVB-S2 і DVB-S2X.
5. Розроблено новий метод ідентифікації сигналів типу Carrier-in-Carrier на основі розрахунку кумулянтів вищих порядків.

Обґрунтованість отриманих наукових результатів дисертаційного дослідження підтверджується використанням автором методів, які є визнаним інструментом аналізу та обробки даних в сфері цифрової обробки сигналів, теорії оцінювання та випадкових процесів. Використані методи імітаційного моделювання дозволяють забезпечити ефективний аналіз параметрів окремих підсистем синхронізації. Використані у роботі критерії якості показують точність та надійність приймача при розпізнаванні та декодуванні сигналів. Розрахунок площі під ROC кривою (AUC) дозволило порівняти характеристики детекторів та зробити об'єктивний висновок про їх ефективність. Також статистичні методи розрахунку MDP, FAR, BER та інші метрики ефективності дозволили провести здобувачу порівняльні оцінки різних алгоритмів та систем зв'язку. Таким чином, використання цих методів гарантує об'єктивність та достовірність результати досліджень.

Наукові дослідження були виконані здобувачем на кафедрі радіоінженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського та у науково-виробничому підприємстві «Дельта СПЕ» в рамках НДР під керівництвом професора кафедри радіоінженерії

доктора фізико-математичних наук професора Калюжного Олександра Яковича.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання розробки та удосконалення нових методів обробки сигналів з фазовою маніпуляцією, що використовуються в різних стандартах зв'язку 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 відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською мовою.

Текст дисертації автора написано достатньо зрозуміло та лаконічно, без вживання складних термінів, які окремо не мають додаткових пояснень. В роботі використовується науково-технічний стиль мовлення з використанням фахової термінології. Дисертаційна робота містить достатньо інформації і описує головні проблеми та методи їх вирішення. Аналіз і вирішення проблем зв'язку, їх складнощів та нові технології, що можуть вирішувати ці проблеми характеризують наявність змістовності в дисертаційній роботі Круглика О. С.

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

У вступі описується актуальність, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, зокрема вказується на те, що результати дисертації були використані в системах класифікації, демодуляції і обробки сигналів в комерційних продуктах НВП «Дельта СПЕ». Коротко розкриваються мета, задачі і методи дослідження, наукова новизна одержаних результатів і їх

практичне значення. В кінці вступної частини надається інформація щодо наукових публікацій автора.

У першому розділі «Постановка задачі та загальний аналітичний огляд демодуляції сигналів із фазовою маніпуляцією» проводиться загальний аналітичний огляд і розкриваються основні напрямки дослідження. Розглядається синхронізація в системах цифрового зв'язку, зокрема несприятливі умови радіоприймання та вибір схеми синхронізації в залежності від умов та типу сигналу. Також проводиться чисельне моделювання традиційних схем демодуляції з використанням популярних методів оцінки невідомих параметрів сигналу. Описується технологія Carrier-in-Carrier для ефективного використання радіочастотного спектру, але зазначаються певні проблеми з розділенням та виявленням сигналів типу Carrier-in-Carrier. Проведений в даному розділі аналіз вказує на необхідність додаткових досліджень та розробці альтернативних методів синхронізації та ідентифікації в системах безпроводного зв'язку.

У другому розділі «Ефективна демодуляція psk сигналів у каналах з несприятливими умовами радіоприймання» представлений гібридний метод демодуляції сигналів, який використовує фреймову синхронізацію та диференціальний корелятор. У розділі проведено аналіз існуючих рішень та запропоновано гібридний метод демодуляції, що поєднує алгоритми прямого оцінювання параметрів сигналу з подальшою синхронізацією параметрів у схемах зі зворотнім зв'язком. Здійснюється порівняльне моделювання традиційних та гібридних методів демодуляції на прикладі сигналів з фазовою маніпуляцією, що підтверджує ефективність гібридного методу в умовах швидкої зміни параметрів сигналу. Крім того, розділ присвячений новому підходу до побудови підсистем фреймової синхронізації, який дозволяє забезпечити надійну синхронізацію вже на початковому етапі з'єднання. Метод базується на використанні різницевої кореляції та адаптивного порогу, і його ефективність підтверджена порівняльним чисельним моделюванням. Також пропонується алгоритм адаптовано для реалізації на програмованих логічних інтегральних схемах.

У третьому розділі «Демодуляція сигналів на основі корпускулярної фільтрації» описується новий підхід до демодуляції сигналів на основі методів багаточасткової фільтрації (particle filtering), який базується на моделі простору станів сигналу з запропонованим урахуванням динаміки оновлення параметрів каналу. Детально описується метод корпускулярної фільтрації, а також пропонується його адаптація для демодуляції сигналів із фазовою маніпуляцією. Було проведено порівняльний аналіз якості роботи запропонованого алгоритму із традиційними контурами синхронізації Гарднера та Костаса, що показало, що запропонований метод забезпечує меншу бітову

похибку при належному виборі кількості корпускул. Зазначається, що при застосуванні алгоритму без запропонованого оновлення параметрів може виникнути ефект заморожування оцінки параметрів сигналу. Також було описано ефективність запропонованого методу для демодуляції QPSK сигналу на фоні негаусівського шуму, що підтверджує переваги методу в порівнянні з традиційним демодулятором, який базується на контурах синхронізації Гарднера та Костаса.

У четвертому розділі «Застосування запропонованих методів демодуляції в задачі детектування сигналів стандартів DVB-S2 і DVB-S2X» представлено детектор, який дозволяє визначити ревізію стандарту DVB-S2/S2X та визначити параметри фрейму для систем широкосмугового сповіщення. Для детектування та класифікації сигналів використовуються корелятор, демодулятор та детектор, який декодує службову інформацію PLSCODE. Детектор дає змогу визначити, чи передається сигнал згідно стандарту DVB-S2, або стандарту DVB-S2X. Важливими складовими методу є спосіб розрахунку бітів PLHEADER та декодування бітової послідовності поля PLSCODE. Прийняття рішення про результати детектування залежить від похибки, яка розраховується при декодуванні. Чисельне моделювання даного алгоритму показало високу ефективність способу детектування та декодування поля PLHEADER для сигналів, які передаються за стандартами DVB-S2 і DVB-S2X, навіть при негативних значеннях SNR. Зокрема, побудовано ROC криву на основі якої визначено показник $AUC = 0.996$. Отримані експериментальні характеристики MDP, ROC і AUC підтверджують ефективність запропонованого методу детектування.

У п'ятому розділі «Ідентифікація сигналів типу carrier-in-carrier із використанням запропонованих способів синхронізації mpsk сигналів» пропонується метод виявлення суми двох QPSK сигналів на основі використання кумулянтів четвертого порядку. Запропонований метод виявлення сигналів Carrier-in-Carrier базується на виявленні перетворення форми сузір'я сигналів. Вказується, що сучасні методи кодування з виправленням помилок дозволяють працювати зі швидкостями, близькими до теоретичної межі Шеннона, але пропускну здатність каналу можна збільшити за допомогою технологій Carrier-in-Carrier (також відомої як DoubleTalk), у яких кілька переданих сигналів займають той самий частотний діапазон. В той же час завдання виявлення факту передачі суперпозиції сигналів на заданій частоті в літературі практично не розглядається, тому, особливо в системах радіомоніторингу, ідентифікація сигналів типу Carrier-in-Carrier є дуже актуальною темою для досліджень. В наведеному дослідженні також показано перевагу запропонованого методу детектування CnC сигналів перед іншим можливим методом детектування. Результати чисельного моделювання та

графіки робочої характеристики приймача (ROC) на основі яких отримане значення площі під кривою (AUC) і визначено порогове значення для правила прийняття рішень, свідчать про високу якість виявлення запропонованого методу кумулянтів ($AUC = 0,963$).

У висновках наведено головні висновки та результати дослідження, які були зроблені автором під час виконання дисертаційної роботи. Послідовно сформульовано відповіді на поставлені в початку дослідження питання і описана можливість застосування результатів дослідження на практиці.

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 України категорії “А”, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України, 1 стаття у періодичному науковому виданні проіндексованому у базі Scopus і 1 стаття в іноземному виданні, в якій додатково висвітлені наукові результати дисертаційної роботи.

Також результати дисертації були апробовані на 3 наукових фахових конференціях.

Статті здобувача опубліковані в наукових журналах, які є фаховими і відповідають тематиці написаної дисертації та індексуються у загальноновизнаних наукометричних, зокрема міжнародних, базах, що додатково свідчить про високий науковий рівень публікацій. В публікаціях Круглика О. С. наявна наукова новизна та оригінальність, які роблять запропоновані ідеї відкриття важливими для подальшого розвитку техніки радіомоніторингу. Зокрема, у публікаціях із співавторами Круглик О. С. зробив значний особистий внесок, який можна коротко оцінити наступними рішеннями:

- ідея використання адаптивного порогу та побудова експериментальних характеристик;
- розробка алгоритму гібридного демодулятора, моделювання алгоритму та розрахунок порівняльних характеристик;
- ідея застосування методу кумулянтів для ідентифікації сигналів типу Carrier-in-Carrier, побудова експериментальної моделі алгоритму
- проведення огляду існуючих рішень заснованих на методах корпускулярної фільтрації, оптимізація запропонованого алгоритму в програмному середовищі Матлаб та побудова експериментальних характеристик;

- аналіз специфікацій стандартів DVB-S2 і DVB-S2X, впровадження способу детектування поля PLSCODE і побудова експериментальних характеристик.

Також в публікаціях використовуються зрозумілі методи та статистичні обчислення, які підтверджують отримані результати. Правильно оформлено цитування та є відповідні посилання на роботи окремих авторів, що свідчить про дотримання академічної доброчесності здобувача наукового ступеня.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. В роботі не наведено детальних результатів щодо необхідної кількості обчислень для можливості реалізації на практиці запропонованих методів в реальних системах радіомоніторингу.
2. В першому розділі наведено аналітичний огляд літератури і аналіз існуючих рішень, але представлений опис відомих понять і методів видається дещо надлишковим за своїм обсягом.
3. Для більш глибоко вивчення досліджуваних питань в дисертації бажано було б експериментально дослідити вплив різноманітних умов поширення електромагнітних хвиль в атмосфері Землі на якість та ефективність роботи запропонованих алгоритмів в системах радіомоніторингу, який важко в повній мірі оцінити суто теоретичним шляхом.

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 електроніки та телекомунікацій. 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.

Рецензент:

в.о. зав. каф. радіоінженерії
Національного технічного
університету України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», к.т.н., доц.

/  /

Сергій МАРТИНЮК

Підпис рецензента,
к.т.н., доцента Мартинюка С. Є.
засвідчую.

Декан
радіотехнічного факультету
Національного технічного
університету України «Київський
політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

/  /

Руслан АНТИПЕНКО



«06» квітня 2023 року