

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.

В дисертаційній роботі Круглика О. С. розглядаються новітні технології радіозв'язку, при цьому основна увага приділяється розробці більш ефективних та стійких методів цифрової синхронізації в сучасних модемах та системах радіомоніторингу на основі фазової маніпуляції сигналу. Використання технологій передавання та оброблення сигналів, таких як багатоантенні МІМО-системи, технології передачі OFDMA, Carrier-in-Carrier та кооперативна ретрансляція, призвело до збільшення незаповнених зон покриття широкосмугового доступу, включаючи віддалені місцевості. Окрім того такі нововведення значно підвищують вимоги щодо якості синхронізації. Це проблеми, які необхідно вирішувати. З огляду на те, що сигнал приймається у досить несприятливих умовах, де умови радіоприймання є незадовільними для класичних методів приймання та демодуляції, розробка більш ефективних та більш стійких методів цифрової синхронізації стає ключовим завданням, що відповідає вимогам сучасного ринку телекомунікацій. Таким чином, дослідження, які проводяться у рамках дисертаційної роботи Круглика О.С., мають важливість та практичне значення для подальшого розвитку телекомунікаційних систем і їх ефективного використання.

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.

Достовірність і обґрунтованість наукових результатів забезпечується застосуванням методів, що були використані для досягнення результатів, а також детальним описом експериментів та моделювання. Наприклад, в дисертації застосовано методи цифрової обробки сигналів з використанням імітаційного моделювання і методів динамічного програмування. Зокрема, для розрахунку порогів прийняття рішення та детекторів різницевого корелятора, розрізнення та декодування сигналів DVB-S2\S2X та ідентифікації сигналів типу Carrier-in-Carrier були використані критерій Неймана-Пірсона та оцінка робочої характеристики приймача (ROC). Для підтвердження ефективності запропонованих в роботі методів демодуляції представлені кількісні характеристики залежності BER від SNR і виконано їх порівняння з результатами робіт інших авторів. Детально розглянуто теоретичні аспекти дослідження і описано практичні переваги та можливі сфери використання запропонованих методів. Також результати отримані в науковій роботі Круглика О. С. підтверджені актами впровадження і використання в реальних системах товариства «Дельта СПЕ» та пройшли апробацію на наукових конференціях.

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 дослідження і розробки більш ефективних та стійких до несприятливих умов приймання методів цифрової синхронізації і детектування сигналів з фазовою маніпуляцією для забезпечення більш надійного та стійкого радіозв'язку, зокрема, в супутникових та наземних системах цифрового безпроводного 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.

Наукова робота Круглика О. С. є логічною та чітко структурованою з послідовним викладенням ідей і отриманих наукових результатів. Також автор використовує адекватні загальноприйняті та зрозумілі терміни, які добре дозволяють розуміти тематику написаної роботи. В дисертаційній роботі продемонстровано високу здатність автора до аналізу та синтезу інформації. Викладено доступний рівень аргументації та підтверджень, методологічну чіткість та наявність нових наукових і практично значущих результатів.

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

У вступі проведено загальний опис дисертації, а саме: актуальність, мету і методи дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі «Постановка задачі та загальний аналітичний огляд демодуляції сигналів із фазовою маніпуляцією» проводиться загальний огляд і дослідження відомих способів синхронізації в системах цифрового зв'язку.

Розглядається поняття несприятливих умов радіоприймання, які характеризуються швидкою зміною параметрів характеристики каналу передавання. Також зазначається, що вибір схеми синхронізації залежить від типу множинного доступу, який використовується в конкретній системі зв'язку. Описується проведення чисельного моделювання традиційних схем демодуляції з використанням популярних методів оцінки невідомих параметрів сигналу для випадку каналу зі швидкою зміною та без зміни характеристик передавання. Також описується ефективний спосіб використання радіочастотного спектру за допомогою технології Carrier-in-Carrier. Цей метод дозволяє одночасно використовувати декілька терміналів зв'язку на одній частоті. Однак, виникають певні проблеми з розділенням та виявленням сигналів типу Carrier-in-Carrier. У даній роботі досліджуються ці проблеми та пропонуються способи ідентифікації таких сигналів. Загальний висновок з проведеного аналізу літератури і чисельного моделювання показує необхідність в додаткових дослідженнях та розробці альтернативних методів синхронізації та ідентифікації в системах цифрового зв'язку.

У другому розділі «Ефективна демодуляція psk сигналів у каналах з несприятливими умовами радіоприймання» розглядаються гібридний метод демодуляції сигналів та фреймова (пакетна) синхронізація за допомогою диференціального корелятора. Пропонується гібридний метод демодуляції сигналів, який поєднує алгоритми прямого оцінювання параметрів сигналу (feedforward) з подальшою синхронізацією параметрів у схемах зі зворотним зв'язком (feedback). Вказується, що таке поєднання різних схем синхронізації дає вирішальний виграш по якості у випадку швидкої зміни параметрів характеристики каналу передавання. Виконується порівнювальне моделювання відомих традиційних методів демодуляції та гібридного методу на прикладі сигналів з фазовою маніпуляцією і наводяться відповідні порівняльні якісні характеристики залежності бітової похибки від співвідношення сигнал/шум. Показані приклади застосування і переваги запропонованого алгоритму, зокрема розглянутий підхід синхронізації також можна використовувати для сигналів з різними видами фазової маніпуляції. Додатковою перевагою запропонованого методу є також можливість уніфікації підсистеми демодуляції як для безперервного, так і пакетного режимів передачі, зокрема при демодуляції TDMA сигналів. Також у цьому ж розділі розглядається новий підхід до побудови підсистем фреймової синхронізації, який базується на використанні різницевої кореляції та адаптивного порогу. Метод, на відміну від традиційних, дозволяє забезпечити надійну фреймову синхронізацію вже на початковому етапі з'єднання, коли ще не забезпечена надійна синхронізація носійної. Також запропонований алгоритм P2 адаптовано у роботі під реалізацію на платформі програмованих логічних інтегральних схем (FPGA) (алгоритм P3)

та розроблено схему алгоритму P3 для практичної реалізації на FPGA. Для порівняння ефективності, на основі критеріїв ймовірності пропуску (MDP) та ймовірності хибної тривоги (FAR) в залежності від SNR, виконано чисельне моделювання запропонованого алгоритму (P2, P3) і традиційного алгоритму алгоритму P1, який пропонується в рекомендації до стандарту DVB-S2.

У третьому розділі «Демодуляція сигналів на основі корпускулярної фільтрації» вводиться новий підхід до демодуляції сигналів на основі методів багаточасткової фільтрації (particle filtering) за рахунок використання запропонованої моделі простору станів сигналу спостереження з урахуванням динаміки оновлення параметрів каналу. Проводиться загальний опис методу корпускулярної фільтрації і пропонується його адаптація для демодуляції сигналів із фазовою маніпуляцією. Виконується порівняльний аналіз якості роботи запропонованого алгоритму, що базується на запропонованому способі динамічної оцінки параметрів системи станів із демодулятором, що базується на традиційних контурах синхронізації Гарднера та Костаса. Отримані результати показують, що при належному виборі кількості корпускул запропонований метод забезпечує меншу бітову похибку у порівнянні із класичним демодулятором. Крім того зазначається, що при застосуванні алгоритму без запропонованого оновлення параметрів виникає ефект заморожування оцінки параметрів сигналу, при якому оцінене значення дещо відрізняється від фактичного значення.

У четвертому розділі «Застосування запропонованих методів демодуляції в задачі детектування сигналів стандартів DVB-S2 і DVB-S2X» представляється детектор, який дозволяє визначити до якої ревізії належить переданий сигнал та 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, який визначає ревізію стандарту DVB-S2/S2X та декодує службову інформацію PLSCODE. Детектор дає змогу визначити чи передається сигнал згідно стандарту DVB-S2, або стандарту DVB-S2X. Вказується, що важливими складовими даного методу детектування є спосіб розрахунку бітів PLHEADER (заголовків) та декодування бітової послідовності поля PLSCODE. Прийняття рішення, щодо результатів детектування визначається похибкою, яка розраховується при декодуванні. Виконано чисельне моделювання даного алгоритму і розраховані залежності ймовірності пропуску від відношення сигнал-шум, крім того, в якості показника роздільної здатності запропонованого способу, побудовано ROC криву на основі якої визначено показник $AUC = 0.996$. Отримані експериментальні характеристики MDP, ROC і AUC 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 SNR.

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. Вказується, що запропонований метод виявлення сигналів Carrier-in-Carrier базується на виявленні перетворення форми сузір'я сигналів. Наводяться результати чисельного моделювання і графіки робочої характеристики приймача (ROC) на основі якої отримане значення площі під кривою (AUC) і визначено порогове значення для правила прийняття рішень. Отримане значення AUC для методу кумулянтів становить 0,963, що свідчить про високу якість виявлення запропонованого методу. Показано також перевагу запропонованого методу детектування CnS сигналів перед іншим можливим методом детектування.

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 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.

У тому числі:

- 1) Круглик, О. С. and Павленко, М. П. (2015) “Frame-based synchronization adaptive method for systems based on DVB-S2 standard on FPGA”, *Visnyk NTUU KPI Seriia - Radiotekhnika Radioaparatabuduvannia*, (62), pp. 77-86. (Фахове, категорія “А”) Особистий внесок автора – ідея використання адаптивного порогу та побудова експериментальних характеристик.
- 2) Круглик, О. С., Калюжний, О. and Семенов, В. Ю. (2019) “Efficient QPSK signal demodulation in channels with unfavorable conditions of radio reception”, *Visnyk NTUU KPI Seriia - Radiotekhnika Radioaparatabuduvannia*, (78), pp. 13-18. (Фахове, категорія “А”)

Особистий внесок автора – розробка алгоритму гібридного демодулятора, моделювання алгоритму та розрахунків порівняльних характеристик.

- 3) «Method for the detection of mixed QPSK signals based on the calculation of fourth-order cumulants». Vasyl Semenov, Pavel Omelchenko and Oleh Kruhlyk. *Signal & Image Processing: An International Journal (SIPIJ)*: 10(3), pp. 11-20. June 2019. (Іноземне, додатково)

Особистий внесок автора – ідея застосування методу кумулянтів для ідентифікації сигналів типу Carrier-in-Carrier, побудова експериментальної моделі алгоритму.

- 4) «Efficient method of M-PSK demodulation based on particle filtering». Vasyl' Semenov, O. Kruhlyk. *Math. Model. Comput.* Vol.6, No.1, pp.137-143 (2019). (Scopus)

Особистий внесок автора – проведення огляду існуючих рішень заснованих на методах корпускулярної фільтрації, оптимізація запропонованого алгоритму в програмному середовищі Матлаб та побудова експериментальних характеристик.

- 5) Круглик, О. С. і Семенов, В. Ю. (2021) «Метод розпізнавання сигналів стандартів DVB-S2 та DVB-S2X на основі ефективного декодування поля PLHEADER», Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування, (87), с. 39-45. (Фахове, категорія "А")

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

- 6) Круглик, О. С. Ефективна демодуляція та ідентифікація сигналів із фазовою маніпуляцією в завданнях радіомоніторингу / Круглик О. С., Семенов В. Ю. // Радіoeлектроніка у ХХІ столітті : матеріали ІІ Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів та аспірантів, 14-16 травня 2019 р., Київ, Україна / КПІ ім. Ігоря Сікорського, РТФ. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – с. 53-54. (Тези конференції)

Особистий внесок автора – розробка алгоритму гібридного демодулятора, моделювання алгоритму та розрахунків порівняльних характеристик.

- 7) «Method for the detection of carrier-in-carrier signals based on fourth-order cumulants». Vasyl Semenov, Pavel Omelchenko and Oleh Kruhlyk. 7th International Conference on Computational Science and Engineering (CSE 2019). April 27-28, 2019, Copenhagen, Denmark. (Тези конференції)

Особистий внесок автора – ідея застосування методу кумулянтів для ідентифікації сигналів типу Carrier-in-Carrier, побудова експериментальної моделі алгоритму.

- 8) Круглик, О. С. Метод детектування DVB-S2/S2X сигналів / Круглик О. С., Семенов В. Ю. // Радіотехнічні проблеми, сигнали, апарати та системи: матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції, 09 – 11 листопада 2021 р., Київ, Україна: – Київ, 2021. – с. 66-68. (Тези конференції)

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

Публікації Круглика О. С. мають високий науковий рівень і повністю відповідають принципам академічної доброчесності. Наявність наукового підходу і логічне викладення матеріалу в статтях і тезах автора відповідає загальноприйнятим стандартам і вимогам до наукових публікацій.

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

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Перший розділ дисертації має великий обсяг в порівнянні з іншими розділами;
2. В роботі не вказано за рахунок чого отримані такі гарні результати, наприклад, як змінюється кількість обчислень і наскільки збільшиться чи зменшиться використання ресурсів і час виконання описаних алгоритмів порівняно з іншими відомими алгоритмами, які наводяться у роботі автора;
3. Немає чіткого роз'яснення, що саме мається на увазі під терміном ідентифікація.

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:

доцент кафедри радіотехнічних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», к.т.н., доц.



Олександр ШПИЛЬКА

Підпис рецензента,
к.т.н., доцента Шпилки О.О.
засвідчую.

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



Володимир АДАМЕНКО



«06» квітня 2023 року