

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, доцента
Отроха Сергія Івановича на дисертаційну роботу
Голубничого Олексія Георгійовича “Методологія синтезу та обробки
узагальнених бінарних послідовностей Баркера для широкосмугових каналів
зв’язку”, представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі

Актуальність теми дисертації. Рівень економічного розвитку будь-якої країни на даний час визначається ступенем впровадження новітніх технологій та розвитком телекомунікаційної мережі. Особливе значення мають такі технології, які окреслюють напрями науково-технічного прогресу. Характерною ознакою глобального ринку, що формується при цьому – це проникність процесів створення, обробки та передачі інформації. Одним із важливих напрямків розвитку сучасних телекомунікацій є удосконалення існуючих і створення нових технологій передавання інформації на фізичному рівні для різних безпроводових систем зв’язку, особливо для мереж 4 та 5 поколінь мобільного зв’язку, що безпосередньо пов’язано з питаннями синтезу та обробки сигнально-кодових конструкцій з певними властивостями, зокрема формою сигналів для забезпечення якісного частотного, часового, просторового розділення, розділення сигналів за формою разом з алгоритмами їх обробки та виявлення тощо. Важливе місце серед наукових задач та проблем теоретичного характеру при цьому посідають питання синтезу сигналів з певними кореляційними властивостями, які є важливими при організації фізичного рівня телекомунікаційних систем з розширенням спектру (технологія DSSS та інші) та, зокрема, систем з кодовим розділенням каналів (CDMA). Значна кількість сигнально-кодових конструкцій у таких системах формується на основі бінарних дискретно-кодованих послідовностей (ДКП), для яких важливими є ряд широко вживаних у цій частині теорії телекомунікацій кореляційних функцій, а саме аперіодичної та періодичної автокореляційних (АКФ та ПАКФ відповідно) та взаємнокореляційних (ВКФ та ПВКФ відповідно) функцій. До сигнально-кодових конструкцій з певними характеристиками їх кореляційних функцій, які використовуються у телекомунікаційних системах, належать, наприклад, сигнали на основі послідовностей Баркера (характерною є АКФ), М-послідовностей (характерною є ПАКФ), функцій Уолша (характерною є ВКФ), коди Голда (характерною є ПВКФ) та багато інших відомих типів кодів. На сучасному етапі розвитку теорій обробки сигналів, шумоподібних сигналів, електрозв’язку відомо, що для бінарних ДКП та систем ДКП, до яких висуваються вимоги щодо їх ПАКФ, ВКФ або ПВКФ, відомі регулярні методи їх синтезу, однак такі регулярні методи синтезу для бінарних ДКП, які є оптимальними за мінімальним критерієм щодо їх АКФ

№ 007.09/2020
в.у. 11.09.2020р.

(мають близьку до δ -функції Дірака АКФ), є невідомими, а відомі методи синтезу ДКП з такими властивостями АКФ використовують складову перебору, стохастичні, евристичні та інші підходи недетерміністичного характеру. Таким чином, у сфері телекомунікацій при впровадженні мереж 4G та 5G, з метою побудови високошвидкісних каналів зв'язку існує важлива науково-технічна проблема синтезу регулярними методами бінарних ДКП, які є оптимальними за мінімакним критерієм щодо їх АКФ, для якої також характерні такі теоретичні особливості: 1) протиріччя, пов'язане з тим, що регулярні методи синтезу співвідносяться з регулярними структурами цих ДКП, а для таких ДКП в цілому властивою повинна бути відсутність регулярних структур у їх складі через форму АКФ, яка є типовою для білого шуму; 2) методологічна складність розв'язання проблеми прямим шляхом, яка пов'язана з алгоритмічною нерозв'язністю десятої проблеми Гільберта, одним з наслідків якої є відсутність як такої певної можливої алгоритмічної процедури, яка б давала можливість визначати наявність або відсутність розв'язків у довільних системах діофантових рівнянь (а також нерівностей), які виникають при математичній постановці задачі знаходження елементів ДКП з певними властивостями АКФ. Слід зазначити, що до ДКП, які є оптимальними за мінімакним критерієм щодо їх АКФ в умовах додаткових найжорсткіших обмежень на рівень бічних пелюсток АКФ, належить відомий клас ДКП Баркера, у відношенні до яких, зокрема через відсутність регулярних методів синтезу таких ДКП, у 2008 р. науковою спільнотою (G. Coxson) було поставлено пряме наукове питання "Do the Barker Codes End?"

Зазначені факти обумовлюють теоретичну та практичну актуальність дисертаційного дослідження, спрямованого на пошук для галузі телекомунікацій регулярних структур та регулярних методів синтезу ДКП, до яких висуваються вимоги щодо їх АКФ.

Наукова робота за темою дисертації пов'язана з "Планом заходів на 2015-2017 роки щодо впровадження в Україні у 2017 році системи рухомого (мобільного) зв'язку четвертого покоління" та науково-дослідними роботами, які проводилися в Національному авіаційному університеті.

Вищезазначене обумовлює актуальність теми дисертаційної роботи, спрямованої на вирішення наукової проблеми розробки методології синтезу та обробки узагальнених бінарних послідовностей Баркера для широкосмугових каналів зв'язку.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій характеризується глибоким аналізом структур бінарних ДКП з використанням спеціальних методів теорії ймовірності та математичної статистики, кластерного аналізу (гаусівська змішана модель, EM-алгоритм, метод k-середніх), методологічний апарат яких було розвинуто та адаптовано (автором доведено специфічні теореми та обґрунтовано ряд додаткових критеріїв) для вирішення

поставленої наукової проблеми, методів структурно-логічного аналізу та структурного прогнозування, теорії множин, теорії інформації та передавання сигналів, компетентним визначенням наявних науково-практичних задач та обумовлюється коректністю здійснених у дисертаційній роботі теоретичних досліджень, що базуються на фундаментальних наукових теоріях.

Ідентичність змісту автореферату й основних положень дисертації.

Зміст автореферату повністю відповідає змісту дисертаційної роботи та відображає основні положення, що виносяться на захист.

Дисертаційна робота складається із вступу, шести розділів, висновків і додатків, має загальний обсяг 396 сторінок.

Структура дисертаційного дослідження Голубничого О.Г. має системний та послідовний характер, відповідає поставленим задачам дослідження.

У вступі автором показана актуальність дослідження для вирішення теоретичної проблеми, надано загальну характеристику обраної проблеми, вказано її протиріччя та існуючі методологічні обмеження, визначено мету, задачі, об'єкт та предмет дослідження, дано характеристику використаним методам, сформульовано наукову новизну отриманих результатів та зазначено відомості щодо їх практичної значимості та впровадження.

У першому розділі автор за літературними науковими джерелами проаналізував теоретичну складність проблеми синтезу бінарних ДКП, які є оптимальними за мінімаксним критерієм щодо їх АКФ, з точки зору її математичної постановки в загальному вигляді, яка полягає у необхідності розв'язання системи нелінійних діофантових рівнянь або нерівностей, яка також може бути представлена як цілочисельна задача мінімізації лінійної функції при нелінійних обмеженнях, а шляхи її розв'язання з використанням різних алгоритмів, зокрема перебірних та комбінаторних, співвідносяться у теорії алгоритмів з класом NP-задач. При аналізі відомих ДКП Баркера особливу увагу автором було зосереджено на різних інверсно-ізоморфних структурах відомих бінарних ДКП Баркера, що в подальшому при їх аналізі дало можливість виявити у них закономірності та представити їх як певним чином упорядковані (регулярні) структури. Також було проаналізовано різні модифікації ДКП Баркера, які пов'язані з їх небінарними структурами: трійкові, багатофазні ДКП Баркера та ін. Було показано прикладний характер проблеми, пов'язаний із застосуванням сигнально-кодових конструкцій на основі досліджуваних послідовностей у телекомунікаційних системах з розширенням спектру (DSSS). В результаті аналізу відомих нерегулярних методів синтезу бінарних ДКП, які є оптимальними за мінімаксним критерієм щодо їх АКФ, існуючих методологічних обмежень, пов'язаних з математичними аспектами проблеми, автором було сформульовано основну наукову гіпотезу дослідження (ДКП, які є оптимальними за мінімаксним критерієм щодо їх АКФ в умовах обмежень на максимальний рівень абсолютних

значень бічних пелюсток їх АКФ, тобто ДКП Баркера, є частиною більш узагальнених структур ДКП – узагальнених бінарних послідовностей Баркера, які мають регулярні структури та можуть бути синтезовані з використанням регулярних методів синтезу), яка надалі була підтверджена у наступних розділах дисертації, обґрунтовано використання основної методологічної схеми дослідження – підходу “синтез через аналіз”, який полягає у синтезі узагальнених структур ДКП на основі аналізу їх частинних відомих випадків.

У другому розділі автор, реалізуючи сформульовані у першому розділі основну наукову гіпотезу дослідження та основну методологічну схему дослідження, здійснює кореляційний аналіз відомих бінарних ДКП Баркера та їх інверсно-ізоморфних структур, результати якого стають вхідними даними для наступного етапу статистичного аналізу взаємнокореляційних зв'язків у системі бінарних ДКП Баркера на основі гаусівської змішаної моделі та виділення її компонент з використанням EM-алгоритму. На цьому етапі досліджень автор стикається з проблемною ситуацією застосування відомого методологічного апарату (EM-алгоритм та його особливості), яка описана у кінці підрозділу 2.2, та здійснює його удосконалення у підрозділі 2.3 шляхом розроблення параметрично-критеріальної модифікації EM-алгоритму з видаленням компонент гаусівської змішаної моделі, що потребувало обґрунтування структурного параметру EM-алгоритму та його варіативності, початкового наближення параметрів гаусівської змішаної моделі, введення та обґрунтування додаткових критеріїв кластеризації для корегування процедури реалізації EM-алгоритму за умов виникнення математичних сингулярностей у логарифмічній функції правдоподібності, а також врахування особливостей контексту кластеризації об'єктів для подальшої структуризації ДКП, для чого автором було доведено дві специфічні теореми. В результаті цих доопрацювань автор отримує разом зі складовою кореляційного аналізу новий метод структуризації ДКП з апіорі невідомими структурами, який дозволив виявити регулярні структури у відомих інверсно-ізоморфних структурах бінарних ДКП Баркера, обґрунтувати їх класифікацію, а також додатково підтвердити отримані результати за допомогою методу k-середніх. Виявлення регулярних структур у ДКП, які є оптимальними за мінімаксімним критерієм щодо їх АКФ, на прикладі ДКП Баркера у другому розділі можна вважати ключовим елементом дослідження, оскільки основним питанням вирішуваної наукової проблеми є саме наявність регулярних методів синтезу таких ДКП, що безпосередньо пов'язано з їх певною структуризацією (закономірностями в їх структурах, їх регулярними структурами).

Третій розділ присвячено розробленню регулярного методу синтезу узагальнених бінарних послідовностей Баркера на основі виявлених у другому розділі закономірностей у бінарних ДКП з дельтаподібною формою їх АКФ, а також дослідженню властивостей синтезованих за допомогою розробленого

методу синтезу ДКП та їх систем, які у подальшому можна використати для підвищення показників якості передавання дискретних повідомлень у телекомунікаційних системах. Для розв'язання поставленої наукової задачі розроблення регулярного методу синтезу узагальнених бінарних послідовностей Баркера автор екстраполує базові регулярні структури узагальнених бінарних послідовностей Баркера та отримує їх повну систему, яка складається з трьох типів та характеризується рядом спільних властивостей структур ДКП, проводить їх структурний аналіз, який ілюструється на рис. 3.1 – рис. 3.4 та у табл. 3.1 – табл. 3.5, в результаті чого у підрозділі 3.2 формує систему правил кодування для запропонованих узагальнених бінарних ДКП Баркера, представлену з урахуванням частинних випадків для різних типів та підтипів виразами (3.3) – (3.9). Також автор у табл. 3.7 – табл. 3.11 показав приклади синтезованих ДКП та у табл. 3.6 частковий характер усіх відомих послідовностей Баркера в запропонованій системі регулярних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера. У Додатку В (Б – див. зауваження), на який посилається автор у третьому розділі, представлено лістинги прикладних програм, розроблених з використанням програмного забезпечення РТС MathCAD 15, які реалізують розроблений регулярний метод синтезу узагальнених бінарних послідовностей Баркера, дозволяють досліджувати кореляційні властивості синтезованих ДКП та зберігати синтезовані ДКП у різних форматах даних (*.txt, *.dat, *.xl*, *.prn, *.wk*, *.dbf).

У четвертому розділі зроблено аналіз АКФ узагальнених бінарних послідовностей Баркера та синтезовано повну систему математичних моделей для аналітичного опису цих АКФ для ДКП будь-якого типу та підтипу будь-якої можливої довжини ($N = 4k$ для типу 1, $N = 4k - 1$ для типу 2, $N = 4k + 1$ для типу 3, $k \in \mathbb{Z}_+$), що є однією з поставлених наукових задач дисертаційного дослідження та є визначальним для характеристик виявлення сигналів та завадостійкості телекомунікаційних систем, функціонування фізичного рівня яких можна побудувати з використанням запропонованих у дисертації систем бінарних ДКП. Синтез математичних моделей для аналітичного опису АКФ запропонованих ДКП різних типів було проведено окремо: для типу 1 – у підрозділі 4.1, для типу 2 – у підрозділі 4.2, для типу 3 – у підрозділі 4.3. Синтез математичних моделей АКФ проводився за однаковою для усіх типів ДКП схемою на основі структурно-логічного аналізу структур АКФ з ілюстрацією процедур на 12 рисунках та у 12 таблицях, які деталізують структури АКФ ДКП та закономірності в них. Повноту та коректність розроблених моделей було перевірено при співставленні аналітичного та безпосереднього розрахунку АКФ ДКП усіх типів та підтипів для довжин $N = 4k; 4k - 1; 4k + 1$ при $k = 1 \dots 100$, а також вибірково при $k = 273, k = 579$ та $k = 7392$. У Додатку Б представлено лістинги прикладних програм, які дозволяють досліджувати кореляційні властивості синтезованих ДКП та

верифікувати коректність розроблених аналітичних моделей для АКФ синтезованих ДКП.

Далі автор досліджує структури АКФ ДКП на предмет їх декомпозиційного представлення лінійними складовими та представляє розроблену повну систему математичних моделей для аналітичного опису АКФ узагальнених бінарних ДКП Баркера у вигляді систем лінійних складових АКФ та виокремлених точок АКФ з використанням методологічного апарату теорії множин.

Характерною рисою етапу дослідження АКФ запропонованих ДКП є аналіз властивостей АКФ після розроблення моделей аналітичного опису АКФ для кожного типу ДКП та узагальнення у подальшому цих властивостей як системних для усіх типів ДКП, тобто усього запропонованого класу ДКП, що дозволило спрогнозувати існування властивості емерджентності у системах синтезованих ДКП різних типів та мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера.

У п'ятому розділі на основі виявлених у четвертому розділі дисертації системних властивостей АКФ ДКП було детально досліджено мультиплікативно комплементарні структури узагальнених бінарних послідовностей Баркера, які ґрунтуються на властивості емерджентності АКФ ДКП різних типів та дозволяють в результаті множення деяких масштабованих (по аргументу) АКФ ДКП різних типів утворювати структури, близькі за формою до δ -функції Дірака, що на практиці дозволяє отримувати відповідні сигнали з гарними характеристиками виявлення на виході системи обробки сигналів на базі узгодженої фільтрації у каналі зв'язку. Наведено ряд прикладів, що ілюструють утворення мультиплікативно комплементарних структур як у теоретичному контексті, тобто при множенні відповідних масштабованих АКФ ДКП (рис. 5.3, г), так і при можливому практичному застосуванні (рис. 5.1, рис. 5.2, рис. 5.3, а–в). Проаналізовано особливості застосування таких мультиплікативно комплементарних структур у телекомунікаційних системах, їх сумісність з методами багатопозиційної модуляції (табл. 5.2), виявлено їх основні структурні особливості у порівнянні з відомими комплементарними послідовностями Голя (табл. 5.3). Далі автором розроблено методи синтезу та сумісної обробки мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера, показано результати синтезу таких структур у табл. 5.4. Для врахування нестационарного характеру сигналу на виході системи обробки запропонованих мультиплікативно комплементарних ДКП, представлення його сукупністю квазістационарних інтервалів часу та здійснення у подальшому коректного статистичного аналізу вихідного сигналу розроблено метод декомпозиції мультиплікативної структури сигналу на основі узагальнених бінарних послідовностей Баркера.

Важливим практичним значенням синтезованих та досліджених у розділі мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера для ширококутових телекомунікаційних систем є те, що вони дозволяють використовувати їх як системи сигналів, які в результаті їх сумісної обробки даватимуть такий результат, який еквівалентний неіснуючим в природі окремим бінарним ДКП Баркера парної довжини $N > 13$ (питання існування таких ДКП з прийнятною для практичного використання довжиною було проаналізовано у підрозділі 1.2).

Шостий розділ дисертації присвячено розробленню методу оцінювання енергетичних параметрів ортогональних сигнально-кодових конструкцій, які переносять складові системи мультиплікативно комплементарних ДКП, для врахування особливості мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних ДКП Баркера, пов'язаної з їх чутливістю до мультиплікативних завад, що впливає на точність виявлення сигналів і, як наслідок, на завадостійкість передавання повідомлень при використанні запропонованих ДКП. Розроблений метод належить до класу параметричних, його особливістю є необхідність встановлення низки внутрішніх параметрів та формування додаткових сигналів у системі їх оброблення в приймальному пристрої. На основі розробленого методу оцінювання енергетичних параметрів було запропоновано алгоритм його роботи та структурну схему системи оцінювання енергетичних параметрів (рис. 6.2), які в цілому можна охарактеризувати як удосконалення кореляційного методу обробки сигналів з метою одержання нових функціональних можливостей, пов'язаних з визначенням постійних та змінних параметрів каналів зв'язку. Також автором були досліджені особливості умов використання розроблених алгоритму роботи та структурної схеми системи оцінювання енергетичних параметрів, визначено співвідношення параметрів, при яких запропоновані алгоритм та схема виявляються непрацездатними. Далі автор дослідив ВКФ у різних комбінаторних системах синтезованих ДКП з метою виявлення можливостей їх використання у системах зв'язку з кодовим розділенням каналів, в результаті чого було виявлено, що таке їх використання в цілому не є доцільним через великий рівень взаємної кореляції. Це, в свою чергу, обмежує область практичного використання синтезованих мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера лише для одноканальних систем зв'язку та систем синхронізації, тобто їх використання в тому ж контексті, що й у випадку класичних відомих ДКП Баркера. З метою подальшого дослідження можливостей використання синтезованих ДКП автор запропонував у підрозділі 6.5 алгоритм формування та структурну схему обробки сигналів на фізичному рівні ширококутових телекомунікаційних систем при використанні запропонованих ДКП, яку було представлено на рис. 6.3 та порівняно зі схемою передавання

інформації, що використовує відомі адитивно комплементарні послідовності Голя, які були коректно визначені автором як найближчий аналог до запропонованих ним ДКП; показано приклад оброблення сигналів у запропонованій системі та для аналогу, що виявило переваги та недоліки запропонованої схеми (рис. 6.5 та аналіз переваг та недоліків після нього). Далі було розроблено модифікацію цієї структурної схеми для спільної роботи з методами багатопозиційної модуляції з великим розміром сигнального сузір'я (рис. 6.6), а також проаналізовано особливості роботи цієї схеми. Також у розділі були розроблені аналітичні моделі для оцінювання завадостійкості, спектральної ефективності, пропускної спроможності у системах TH-DSSS, а також ймовірностей помилок 1-го та 2-го роду при використанні узагальнених бінарних послідовностей Баркера, що дозволяє аналітично, з використанням чисельних методів через особливості інтегрування у виразі (6.38), оцінювати показники ефективності широкосмугових каналів зв'язку.

Достовірність і новизна отриманих результатів, наукових положень, висновків та рекомендацій.

Висновки та результати дисертації викладені змістовно, в логічній послідовності, у відповідності до структури задач, поставлених та вирішених у дисертаційній роботі. Достовірність отриманих результатів та наукових положень підтверджена результатами моделювання та обширним порівняльним аналізом з найближчим відомим аналогом – комплементарними послідовностями Голя (у розділах 5 та 6, а також у Додатку В за різними критеріями порівняння).

Наукова новизна дисертаційної роботи Голубничого О.Г. полягає в наступному:

1. Вперше виявлено базові регулярні структури узагальнених бінарних послідовностей Баркера для передавання інформації сигнально-кодovими конструкціями на їх основі широкосмуговими каналами з постійними та змінними параметрами.

2. Вперше обґрунтовано класифікацію узагальнених бінарних послідовностей Баркера за типами як регулярних структур дискретно-кодovаних послідовностей для передавання інформації сигнально-кодovими конструкціями на їх основі широкосмуговими каналами з постійними та змінними параметрами.

3. Вперше розроблено регулярний метод синтезу узагальнених бінарних послідовностей Баркера для їх формування як сигнально-кодovих конструкцій при передаванні інформації широкосмуговими каналами з постійними та змінними параметрами.

4. Вперше розроблено повну систему математичних моделей для аналітичного опису автокореляційних функцій узагальнених бінарних послідовностей Баркера.

5. Вперше розроблено метод синтезу та сумісної обробки мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера, який дозволяє здійснювати синтез та обробку сигнально-кодкових конструкцій на основі мультиплікативно комплементарних структур цих послідовностей для передавання інформації широкосмуговими каналами з постійними та змінними параметрами та підвищувати пропускну спроможність передавання дискретних повідомлень у них у порівнянні з комплементарними послідовностями Голя.

6. Вперше розроблено метод декомпозиції мультиплікативної структури сигналу на виході системи сумісної обробки мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера, який дозволяє здійснювати статистичний аналіз вихідного сигналу з нестационарним характером складової завад при обробці сигнально-кодкових конструкцій на основі цих послідовностей при їх використанні для передавання інформації широкосмуговими каналами з постійними та змінними параметрами.

7. Вперше розроблено метод оцінювання енергетичних параметрів ортогональних сигнально-кодкових конструкцій та завад, який дозволяє одночасно оцінювати рівень повільних завмирань та дисперсію адитивних завад при використанні сигнально-кодкових конструкцій на основі узагальнених бінарних послідовностей Баркера, підвищувати живучість зв'язку на фізичному рівні широкосмугових телекомунікаційних систем до зовнішніх впливів, пов'язаних з чутливістю мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера до мультиплікативних завад.

8. Отримали подальший розвиток аналітичні моделі оцінювання показників якості передавання інформації у широкосмугових каналах зв'язку для випадку використання узагальнених бінарних послідовностей Баркера як сигнально-кодкових конструкцій при передаванні інформації широкосмуговими каналами зв'язку з постійними та змінними параметрами.

9. Вперше розроблено методологію синтезу та обробки узагальнених бінарних послідовностей Баркера та їх мультиплікативно комплементарних структур, яка за рахунок їх синтезованих регулярних структур та їх системно досліджених властивостей розв'язує науково-прикладну проблему синтезу бінарних дискретно-кодованих послідовностей, які є оптимальними за мінімаксімним критерієм щодо їх автокореляційної функції, у частині синтезу регулярних структур цих дискретно-кодованих послідовностей та їх комбінаторних систем в умовах обмежень на максимальний рівень абсолютних значень бічних пелюсток їх автокореляційної функції (послідовності Баркера), що дозволяє використовувати їх для передавання інформації широкосмуговими каналами DSSS з постійними та змінними параметрами та підвищити пропускну спроможність передавання дискретних повідомлень у таких каналах.

Практична цінність роботи. В цілому на практиці запропонована методологія синтезу та обробки узагальнених бінарних послідовностей Баркера та їх мультиплікативно комплементарних структур дозволяє використовувати їх для передавання інформації широкосмуговими каналами з постійними та змінними параметрами та підвищити при цьому пропускну спроможність передавання дискретних повідомлень у таких каналах до 1,6 раз у порівнянні з відомими комплементарними послідовностями Голея (найближчий аналог).

Загальна практична цінність дисертаційної роботи конкретизується через такі одержані результати частинного характеру:

- розроблено детерміновані правила кодування узагальнених бінарних послідовностей Баркера;

- розроблено методику виявлення внутрішніх структур у системах послідовностей, які апріорі мають стохастичний характер;

- розроблено алгоритм формування та структурну схему обробки сигналів на фізичному рівні широкосмугових телекомунікаційних систем для випадку використання мультиплікативно комплементарних систем послідовностей на основі узагальнених бінарних послідовностей Баркера;

- розроблено структурну схему передавання інформації у телекомунікаційних системах DSSS з використанням узагальнених бінарних послідовностей Баркера, адаптовану до методів багатопозиційної модуляції з великим обсягом сигнального сузір'я;

- розроблено алгоритм роботи та структурну схему системи оцінювання енергетичних параметрів завод та ортогональних сигнально-кодових конструкцій, що використовуються при передаванні інформації з використанням синтезованих систем послідовностей.

Результати дисертації впроваджено у науково-технічну діяльність ДП «Украерорух», освітню діяльність Національного авіаційного університету, у міжнародних наукових дослідженнях за програмою Erasmus.

Повнота викладу основних результатів та висновків в опублікованих працях. За матеріалами дисертаційного дослідження опубліковано 44 друковані роботи, що відображають положення дисертації, з них 1 патент на винахід, 2 патенти на корисну модель, 18 статей у фахових виданнях із переліків МОН України, 2 статті у періодичних виданнях іноземних держав, які включені до науково-метричної бази Scopus, 13 матеріалів та тез доповідей на науково-технічних конференціях. Більшість публікацій (26 з 44) опубліковано автором одноосібно та 13 – у складі авторських колективів, до яких входить науковий консультант.

Відповідність дисертаційної роботи науковій спеціальності. Дисертаційна робота Голубничого О.Г. за вирішуваною науково-прикладною проблемою, змістом, структурою, обсягом та оформленням повністю відповідає

спеціальності 05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі, зокрема пп. 4, 16 та 18 Паспорту цієї спеціальності.

Недоліки дисертації та автореферату, зауваження до них.

1. Усі синтезовані у дисертації узагальнені бінарні послідовності Баркера починаються з “-1”, у той час як усі відомі класичні послідовності Баркера, які можна вважати частинним випадком запропонованого у дисертації узагальненого типу послідовностей, представляються у науковій літературі такими, що починаються з “+1”. У дисертації відсутнє пояснення вибору автором такої “інвертованої”, відмінної від класичної, системи представлення синтезованих послідовностей.

2. В дисертаційній роботі доцільно було б притримуватись термінології, яка використовується в роботі міжнародного союзу електрозв'язку (ITU-T).

3. У розділах 3 та 4 дисертації зазначено, що у Додатку В представлено лістинги прикладних програм для синтезу узагальнених бінарних послідовностей Баркера та дослідження їх кореляційних властивостей. Однак зазначені лістинги прикладних програм наведено у Додатку Б, а не В, у якому представлено моделювання широкосмугових каналів зв'язку.

4. У розділі 4 автор досліджує структури АКФ послідовностей на предмет їх декомпозиційного представлення лінійними складовими. Такий елемент дослідження може бути дещо надмірним, оскільки при детальному аналізі розроблених аналітичних моделей АКФ у підрозділах 4.1 – 4.3 можна вже простежити таку структурованість АКФ на основі лінійних складових.

5. У четвертому розділі дисертаційної роботи зазначено про результати верифікації розробленої повної системи аналітичних моделей АКФ послідовностей лише для значень їх довжин $N = 4k; 4k - 1; 4k + 1$ при $k = 1...100; 273; 579; 7392$. Крім того, з метою цілісного сприйняття роботи доцільно було б об'єднати у єдиній формі представлення дані з деяких рисунків та таблиць, наприклад, табл. 4.2 та рис. 4.2, табл. 4.3 та рис. 4.3 тощо, які певною мірою дублюють одну й ту саму інформацію щодо досліджуваних структур АКФ.

6. У розділі 6 відсутній аналіз точності розробленого методу оцінювання енергетичних параметрів ортогональних сигнально-кодових конструкцій, які переносять складові системи мультиплікативно комплементарних послідовностей, та завад. Це є важливим з огляду на зазначений автором у підрозділі 6.3 факт того, що при деяких співвідношеннях параметрів розроблений метод взагалі не дозволяє здійснювати зазначене оцінювання. Також відсутній порівняльний аналіз похибок розробленого у розділі 6 методу оцінювання енергетичних параметрів у порівнянні, наприклад, з відомими методами оцінювання показників якості сигналу та його рівня, які використовують дані про виявлені на каналному рівні бітові помилки.

7. Частина синтезованих з використанням регулярного методу синтезу мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера (табл. 5.4 дисертації та табл. 2 автореферату) не характеризуються повною комплементарністю АКФ ДКП на рівні $1/N_{\max}$, де N_{\max} – максимальна довжина послідовності у мультиплікативно комплементарній системі.

8. Досліджені у підрозділі 6.4 значення ВКФ систем мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера показують, що ці послідовності через відносно високий рівень взаємної кореляції між ними не можуть бути повною мірою використані для організації багатостанційного доступу з кодовим розділенням каналів.

Загальні висновки.

Дисертаційна робота Голубничого О.Г. є завершеною науковою працею, виконаною автором самостійно на високому науковому рівні. В роботі отримані науково обґрунтовані результати, які є суттєвими для теорії та практики побудови фізичного рівня безпроводових телекомунікаційних систем та мереж.

Дисертація вирішує науково-прикладну проблему синтезу регулярними методами сигнально-кодових конструкцій з певними властивостями АКФ для широкосмугових каналів зв'язку, задовольняє вимогам, що означені у «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженому Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ № 656 від 19.08.2015 р, № 1159 від 30.12.2015 р. та № 567 від 27.07.2016 р.), та вимогам МОН України до докторських дисертацій та авторефератів, тому її автор Голубничий Олексій Георгійович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

Офіційний опонент,
професор кафедри автоматизації проектування
енергетичних процесів і систем
Національного технічного університету України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”,
доктор технічних наук, доцент



С.І. Отрох

Підпис Отроха С.І. завіряю

