

Відгук

Офіційного опонента доктора технічних наук, доцента Москальця Миколи Вадимовича на дисертаційну роботу Голубничого Олексія Георгійовича на тему «Методологія синтезу та обробки узагальнених бінарних послідовностей Баркера для широкосмугових каналів зв'язку», яка подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Актуальність теми дисертації

Розвиток сучасних безпроводових телекомунікаційних систем та мереж, зокрема широкосмугових, безпосередньо пов'язаний з організацією фізичного рівня цих систем, методами формування та обробки сигнально-кодових конструкцій, які дозволяють забезпечити необхідні показники пропускної спроможності, завадостійкості, якості передавання та надійності функціонування систем передавання дискретних і аналогових повідомлень у каналах зв'язку з постійними, змінними та випадковими параметрами.

Дослідження, спрямовані на розвиток існуючих та розроблення нових методів формування та обробки сигнально-кодових конструкцій для ряду таких технологій перспективних безпроводових широкосмугових телекомунікаційних систем та мереж, як 5G з технологіями фізичного рівня multi-carrier DSSS & MIMO, CDMA, NOMA та інших, які б дозволили підвищити у порівнянні з відомими технічними рішеннями якість передавання повідомлень у каналах зв'язку з постійними, змінними та випадковими параметрами, представляють значний науковий та практичний інтерес.

Однією з основних проблем в області синтезу сигнально-кодових конструкцій та методів їх обробки для фізичного рівня широкосмугових телекомунікаційних систем є необхідність досягнення певних кореляційних властивостей таких сигнально-кодових конструкцій, а саме дельтаподібної форми та значень аперіодичної та періодичної автокореляційних (АКФ, ПАКФ) та, для випадку багатоканальних телекомунікаційних систем, взаємнокореляційних функцій (ВКФ, ПВКФ), які утворюють або строго ортогональні системи сигналів, або принаймні системи сигналів з мінімально можливим рівнем взаємної кореляції. Для сигнально-кодових конструкцій та систем сигнально-кодових конструкцій на основі бінарних послідовностей, до яких висуваються зазначені вимоги щодо їх ПАКФ, ВКФ або ПВКФ, відомі регулярні методи їх синтезу, до яких, наприклад, можна віднести найбільш відомі у техніці телекомунікацій та інших радіотехнічних систем методи синтезу для M-послідовностей (характеризуються оптимальними ПАКФ в умовах

5005.03/2020
в.г. 11.09.2020р.

бінарних структур послідовностей), функцій Уолша (оптимальні ВКФ через ортогональність цих функцій), кодів Голда (близькі до оптимальних ПВКФ). Однак регулярні методи синтезу бінарних послідовностей з дельтаподібною АКФ, які також називають оптимальними за мінімаксімним критерієм щодо їх АКФ (характеризуються мінімально можливим значенням максимального рівня абсолютних значень бічних пелюсток АКФ при заданих умовах), а у англійській науковій літературі – «Low Autocorrelation Binary Sequences», є невідомими, а усі відомі методи синтезу таких бінарних послідовностей містять як один з етапів перебір, про що, зокрема, прямо зазначається у багатьох наукових джерелах (наприклад, на с. 23 монографії В.Е. Гантмахера, Н.Е. Быстрова, Д.В. Чеботарева «Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка» – СПб.: Наука и техника, 2005 – 400 с.) та що становить собою наукову проблему теоретичного характеру.

Таким чином, необхідність проведення наукових досліджень, спрямованих на вирішення проблеми синтезу бінарних послідовностей, які є оптимальними за мінімаксімним критерієм щодо їх АКФ, виявлення регулярних структур таких послідовностей та створення на їх основі регулярних методів синтезу як цих послідовностей, так і їх можливих нових комбінаторних систем в умовах найжорсткіших обмежень на максимальний рівень абсолютних значень бічних пелюсток їх АКФ (послідовності з мінімально можливим рівнем бічних пелюсток АКФ відомі як послідовності Баркера, але невідомі регулярні методи синтезу для них) визначає актуальність теми дисертаційного дослідження Голубничого О.Г. для галузі телекомунікаційних систем та мереж.

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

Дисертація Голубничого О.Г. є кваліфікаційною науковою працею, написаною ним особисто, яка розв'язує значущу системну проблему у галузі телекомунікаційних систем та мереж, пов'язану із синтезом сигнально-кодівих конструкцій з необхідними властивостями, є важливою для забезпечення стійкого розвитку та вимагала створення нових системоутворювальних знань, а саме виявлення раніше невідомих регулярних структур бінарних послідовностей Баркера, розроблення регулярного методу їх синтезу, узагальнення та комплексне дослідження властивостей нових узагальнених послідовностей на їх основі. Загальний обсяг дисертації, що містить вступ, шість розділів, висновки та додатки, становить 396 сторінок.

У *вступі* виокремлено наукову проблему, вирішенню якої присвячена дисертація, сформульовано актуальність теми, мету, задачі, об'єкт і предмет дослідження, положення наукової новизни, зазначено відомості про практичну цінність роботи, зв'язок з науковими програмами.

У *першому розділі* проаналізовано відомі методологічні підходи до вирішення проблеми синтезу бінарних послідовностей, які є оптимальними за мінімакним критерієм щодо їх АКФ, показано їх обмеженість, яка на найбільш узагальненому сучасному методологічному рівні аналізу проблеми пов'язана з алгоритмічною нерозв'язністю десятої проблеми Гільберта, сформульовано основну наукову гіпотезу дослідження, яка полягає в тому, що бінарні послідовності Баркера є частиною більш узагальнених регулярних структур бінарних послідовностей (існування регулярних, певним чином упорядкованих структур досліджуваних послідовностей є основним питанням проблеми, вирішенню якої присвячена дисертація), обґрунтовано використання для розв'язання проблеми загальнометодологічного підходу «синтез через аналіз», особливістю якого є обхід тієї складової проблеми, яка пов'язана з алгоритмічною нерозв'язністю десятої проблеми Гільберта.

У *другому розділі* автор вирішує задачу виявлення апіорі невідомих регулярних (певним чином упорядкованих) структур в інверсно-ізоморфних структурах усіх відомих бінарних послідовностей Баркера (знайдених у різні роки іншими вченими з використанням ними підходів на основі прямого чи напрямленого перебору), в результаті чого були виявлені регулярні структури послідовностей Баркера, які названо автором дисертації «базовими регулярними структурами узагальнених бінарних послідовностей Баркера», обґрунтовано їх класифікацію на основі методів кластерного аналізу та структурного прогнозування. Для вирішення задачі автором було синтезовано новий метод структуризації кодових конструкцій з апіорі невідомими внутрішніми структурами, в основі якого лежить статистичний системно-структурний аналіз кореляційних зв'язків у системах кодових конструкцій з використанням розробленої автором параметрично-критеріальної модифікації EM-алгоритму з видаленням компонент гаусівської змішаної моделі. Під час розроблення та обґрунтування запропонованого методу автором дисертації було доведено дві теореми та введено три нові критерії 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 послідовностей з апіорі невідомими внутрішніми структурами. Для перевірки коректності отриманих результатів структуризації послідовностей Баркера через особливості EM-алгоритму (чутливість до початкового наближення, апіорі невідома кількість компонент гаусівської змішаної моделі, «жадібність» алгоритму до локальних екстремумів функції правдоподібності) автором було додатково використано метод k-середніх, який підтвердив коректність отриманих результатів, обґрунтованість виявлених базових регулярних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера, їх класифікацію за типами.

Третій розділ присвячено розробленню регулярного методу синтезу узагальнених бінарних послідовностей Баркера. Для цього автором було екстрапольовано виявлені у другому розділі дисертації базові регулярні структури узагальнених бінарних послідовностей Баркера, отримано повну систему регулярних структур цих послідовностей, в результаті аналізу яких були синтезовані правила кодування узагальнених бінарних послідовностей Баркера. Слід зазначити, що новий синтезований з використанням розробленого регулярного методу тип послідовностей з регулярними внутрішніми структурами містить з точністю до інверсно-ізоморфних структур як частинні випадки усі відомі бінарні послідовності Баркера. Це свідчить про логічну взаємопов'язаність нового синтезованого у дисертації типу послідовностей, основною характерною ознакою яких з точки зору вирішуваної проблеми є регулярність їх структур, з «нерегулярними» структурами відомих послідовностей Баркера, які можуть бути представлені як частинні випадки запропонованого у дисертації нового узагальненого типу послідовностей для ширококуглових каналів зв'язку. Автором також були досліджені властивості нових узагальнених бінарних послідовностей Баркера, які полягають у рекурентності послідовностей за їх довжиною у межах кожного типу чи підтипу, симетрично-дзеркальній структурі послідовностей відносно їх середини та їх рекурентно-прорідженій структурі, диференційованій за непарними та парними елементами першої половини послідовності. Аналіз властивостей синтезованих послідовностей разом з розробленим регулярним методом їх синтезу та їх запропонованою класифікацією формує засади системи нових концептуальних та методологічних знань в області синтезу регулярних структур послідовностей, які є оптимальними за мінімаксним критерієм щодо їх АКФ, для ширококуглових каналів зв'язку та інших областей використання.

У *четвертому розділі* шляхом використання підходів структурно-логічного аналізу було синтезовано повну систему математичних моделей для аналітичного опису аперіодичних АКФ узагальнених бінарних послідовностей Баркера, а також досліджено структури цих АКФ та виокремлено їх лінійні структури. Дослідження структур АКФ послідовностей нового запропонованого у дисертації типу дозволило автору виявити такі системні властивості їх АКФ, як відокремленість основної пелюстки АКФ, гребінчастість структури АКФ, композиція лінійних структур АКФ, емерджентність структур АКФ різних типів. Виявлення цих властивостей дозволило синтезувати нові мультиплікативно комплементарні структури узагальнених бінарних послідовностей Баркера, які можна використати у ширококуглових каналах зв'язку як мультиплікативний аналог відомих адитивно комплементарних послідовностей Голея та покращити показники якості передавання повідомлень (зокрема, пропускну спроможність).

П'ятий розділ дисертації присвячено розробленню методів синтезу та сумісної обробки в ширококутових каналах зв'язку мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера, декомпозиції мультиплікативної структури сигналу на виході системи обробки мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера на фізичному рівні ширококутових телекомунікаційних систем. Автором було отримано та досліджено ряд нових систем мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера. Практична значимість розробленого методу декомпозиції мультиплікативної структури вихідного сигналу полягає в тому, що він дозволяє шляхом введення інтервалів квазістаціонарності врахувати нестационарний характер складової завад у суміші корисного сигналу та завад на виході системи обробки мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера та за рахунок цього підвищити завадостійкість передавання повідомлень шляхом встановлення більш коректних правил прийняття рішень про прийнятий символ.

У *шостому розділі* автор досліджує особливості фізичного рівня ширококутових телекомунікаційних систем при використанні синтезованих у дисертації узагальнених бінарних послідовностей Баркера, а також виконує їх порівняльний аналіз з найближчим аналогом – адитивно комплементарними послідовностями Голея. Для врахування такої особливості синтезованих мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера, як їх чутливість до мультиплікативних завад, автором було розроблено параметричний метод оцінювання енергетичних параметрів ортогональних сигнально-кодових конструкцій, які переносять складові системи мультиплікативно комплементарних послідовностей. Розроблено алгоритм роботи та структурну схему системи оцінювання енергетичних параметрів для розробленого методу, визначено обмеження щодо його використання, пов'язані з внутрішніми параметрами методу та характеристиками фізичного рівня ширококутового каналу зв'язку. Також автором було досліджено взаємнокореляційні зв'язки у синтезованих системах мультиплікативно комплементарних послідовностей та визначено недоцільність їх використання для багатоканальних ширококутових телекомунікаційних систем (на відміну від одноканальних систем) CDMA через відносно велике максимальне абсолютне значення нормованої функції взаємної кореляції (до 0,25). У шостому розділі автором розроблено алгоритм формування та структурну схему обробки сигналів на фізичному рівні ширококутових телекомунікаційних систем, структурну схему передавання інформації у ширококутових каналах зв'язку, які функціонують за технологією DSSS з використанням багатопозиційних методів модуляції (до QAM-256) та синтезованих

мультиплікативно комплементарних структур. Розроблено аналітичні моделі для оцінювання завадостійкості, спектральної ефективності, пропускної спроможності у системах TH-DSSS, а також ймовірностей помилок 1-го та 2-го роду при виявленні сигналів при використанні синтезованих у дисертації мультиплікативно комплементарних структур на основі запропонованих узагальнених бінарних послідовностей Баркера.

В результаті порівняльного аналізу з адитивно комплементарними послідовностями Голя (найближчий аналог) виявлено, що синтезовані послідовності здатні забезпечити до 1,6 раз більше значення пропускної спроможності широкосмугового каналу зв'язку за рахунок як структурних особливостей синтезованих послідовностей разом з методом їх сумісної обробки, так і особливостей їх спектральних характеристик. З метою порівняльного аналізу та перевірки ефективності запропонованих технічних рішень у додатку В дисертації обсягом 37 стор. наведено моделювання широкосмугового каналу зв'язку за технологією TH-DSSS при дії адитивних завад у вигляді суміші стаціонарного випадкового процесу та імпульсних завад, в якому використовуються як відомі комплементарні послідовності Голя (Додаток В.1), так і синтезовані у дисертації нові узагальнені бінарні послідовності Баркера (Додаток В.2).

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

Результати дисертації викладені послідовно, систематично, відповідають поставленим задачам, в цілому формують нову теорію узагальнених бінарних послідовностей Баркера та їх мультиплікативно комплементарних структур у прикладному її застосуванні в галузі телекомунікаційних систем, основною характерною рисою якої є регулярні структури та методи синтезу послідовностей та їх комбінаторних систем. Достовірність отриманих у дисертації результатів підтверджується коректністю аналітичних моделей, представленими детальними розрахунками в дисертації та авторефераті, порівняльним аналізом з найближчим аналогом та моделюванням, представленим у додатках.

Наукова новизна дисертаційної роботи Голубничого О.Г. така:

1. *Вперше розроблено* методологію синтезу та обробки узагальнених бінарних послідовностей Баркера та їх мультиплікативно комплементарних структур для широкосмугових каналів зв'язку.

2. *Вперше розроблено* метод структуризації кодових конструкцій з апіорі невідомими внутрішніми структурами, який дозволив виявити базові регулярні структури узагальнених бінарних послідовностей Баркера.

3. *Вперше розроблено* класифікацію узагальнених бінарних послідовностей Баркера за типами.

4. *Вперше розроблено* регулярний метод синтезу узагальнених бінарних послідовностей Баркера.

5. *Вперше розроблено* повну систему математичних моделей для аналітичного опису АКФ узагальнених бінарних послідовностей Баркера та їх декомпозиційного представлення лінійними складовими.

6. *Вперше розроблено* метод синтезу та сумісної обробки мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера, використання яких підвищує завадостійкість передавання інформації у широкосмугових каналах зв'язку при дії імпульсних завад та їх пропускну спроможність у порівнянні з найближчим аналогом (комплементарними послідовностями Голея).

7. *Вперше розроблено* метод декомпозиції мультиплікативної структури сигналу на виході системи сумісної обробки мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера при їх використанні у широкосмугових каналах зв'язку.

8. *Вперше розроблено* метод оцінювання енергетичних параметрів ортогональних сигнально-кодових конструкцій та завад для широкосмугових каналів зв'язку при використанні у них узагальнених бінарних послідовностей Баркера.

9. *Отримали подальший розвиток* аналітичні моделі оцінювання показників якості передавання інформації у широкосмугових каналах зв'язку при використанні у них узагальнених бінарних послідовностей Баркера.

Практична цінність роботи

Отримані наукові результати дозволили в цілому підвищити пропускну спроможність широкосмугових каналів зв'язку до 1,6 раз при використанні синтезованих у дисертації узагальнених бінарних послідовностей Баркера у порівнянні з комплементарними послідовностями Голея. На базі методів та моделей, розроблених у дисертації розроблено програмне забезпечення, яке представлено у додатках та може бути використано у навчальних та наукових цілях за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Використання результатів дисертаційної роботи у науково-технічній діяльності Авіакомпанії «Украерорух» та навчальному процесі кафедри телекомунікаційних та радіоелектронних систем Національного авіаційного університету підтверджується актами впровадження.

Повнота викладу основних результатів та висновків в опублікованих працях

За матеріалами дисертації опубліковано 44 праці (26 – без співавторів), які розкривають зміст дисертації і серед яких статті у фахових та іноземних виданнях, патент на винахід, тези на конференціях.

Ідентичність змісту автореферату та положень дисертації

Зміст автореферату відповідає змісту дисертаційної роботи з виокремленням уваги на змісті найбільш значущих з точки зору автора дисертації положень.

Відповідність дисертаційної роботи науковій спеціальності

Дисертаційна робота Голубничого О.Г. відповідає паспорту спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі (в першу чергу – п. 18 «Розроблення методів аналізу й синтезу сигналів і кодів для передавання інформації каналами з постійними та змінними параметрами»).

Недоліки роботи та зауваження до неї

1. Для аналізу та синтезу кодових послідовностей часто використовується добре відомий та розвинутий методологічний апарат полей Галуа, однак автор не наводить у роботі достатнього обґрунтування недоцільності його використання для розв'язання наукової проблеми.

2. Синтезовані у дисертації узагальнені бінарні послідовності Баркера не утворюють ортогональних базисів та мають велике значення взаємної кореляції між послідовностями (до 0,25), що практично унеможливає їх використання в технології CDMA.

3. У роботі детально не розглянуто вибір системи інверсно-ізоморфних структур відомих бінарних послідовностей Баркера серед багатьох можливих таких комбінаторних систем, яка забезпечила виявлення базових регулярних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера.

4. Відсутнє обґрунтування вибору саме гаусівських розподілів у змішаній моделі (використання саме гаусівської змішаної моделі у другому розділі дисертації).

5. Автореферат дещо перенасичений математичною деталізацією доведених теорем та реалізацією розробленого методу структуризації кодових конструкцій з апіорі невідомими внутрішніми структурами.

6. Бажано було б навести докази унікальності саме тієї структуризації бінарних послідовностей Баркера, яка отримана у дисертаційному дослідженні. Можливо існує якась інша структуризація, яка дає менший поділ узагальнених бінарних послідовностей Баркера на типи та підтипи, ніж запропонований у дисертації.

7. У дисертації запропоновано схему передавання інформації з використанням узагальнених бінарних послідовностей Баркера та багатопозиційних методів модуляції лише до QAM-256.

8. Недостатньо акцентовано увагу, зокрема в назві теми дисертації, що синтезовані системи мультиплікативно комплементарних послідовностей доцільно використовувати саме в комбінованих

широкосмугових каналах зв'язку з часово-імпульсною модуляцією (ТН-DSSS), а не просто у широкосмугових каналах зв'язку (за класичною технологією DSSS).

Наведені недоліки та зауваження не знижують наукову значимість роботи та її практичну цінність.

Загальні висновки

У цілому дисертаційна робота «Методологія синтезу та обробки узагальнених бінарних послідовностей Баркера для широкосмугових каналів зв'язку» є завершеною науковою працею, в якій отримані нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують науково-прикладну проблему синтезу для фізичного рівня безпроводових широкосмугових телекомунікаційних систем бінарних послідовностей, які є оптимальними за мінімаксімним критерієм щодо їх АКФ, у частині синтезу регулярних структур цих послідовностей та їх комбінаторних систем в умовах обмежень на максимальний рівень абсолютних значень бічних пелюсток їх АКФ. Дисертація відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів № 567 від 24 липня 2013 року (зі змінами), а її автор Голубничий Олексій Георгійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

Офіційний опонент,
професор кафедри
інфокомунікаційної інженерії
імені В.В. Поповського
Харківського національного
університету радіоелектроніки,
доктор технічних наук, доцент

Москалець М.В.

Підпис професора Москальця М.В. підтверджую

Учений секретар ХНУРЕ



І.В. Магдаліна