

Голові спеціалізованої вченої ради
Д 26.062.19 в Національному авіаційному
університеті

03680, м. Київ, пр. Любомира Гузара, 1.

ВІДГУК

офіційного опонента професора кафедри кібербезпеки та захисту інформації Київського національного університету імені Тараса Шевченка доктора технічних наук, професора Толюпи Сергія Васильовича на дисертаційну роботу Голубничого Олексія Георгійовича за темою «Методологія синтезу та обробки узагальнених бінарних послідовностей Баркера для ширококугових каналів зв'язку», представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Актуальність теми дисертації. Розроблення методів аналізу й синтезу сигналів і кодів для передавання інформації каналами з постійними та змінними параметрами є одним з основних напрямків наукових досліджень у галузі телекомунікаційних систем та мереж. При цьому особливий інтерес становлять ще невирішені, поставлені декілька десятиріч тому, теоретичні проблеми синтезу та обробки різних структур сигнально-кодових конструкцій з певними властивостями, зокрема кореляційними, вирішення яких давало б відповіді як на відкриті наукові питання та являло собою складову теоретичного розвитку галузі електрозв'язку, так і мало прикладне значення для розвитку сучасних телекомунікаційних технологій, підвищення пропускної спроможності, завадостійкості, якості передавання та надійності функціонування телекомунікаційних систем у різних умовах їх роботи у порівнянні з відомими технічними рішеннями та аналогами.

Однією з таких невирішених теоретичних проблем у галузі телекомунікацій та суміжних до неї областей, розв'язанню якої в умовах додаткових обмежень присвячена дисертація Голубничого О.Г., є проблема синтезу бінарних дискретно-кодованих послідовностей, які є оптимальними за мінімаксімним критерієм щодо їх автокореляційної функції (АКФ), тобто послідовностей з мінімально можливим максимальним рівнем бічних пелюсток АКФ для заданої довжини послідовності (за умов найжорсткіших додаткових обмежень на рівень бічних пелюсток такі послідовності відомі як послідовності Баркера), що на фізичному рівні ширококугових телекомунікаційних систем та систем синхронізації дозволяє

15.06.09/2020
Від 11.09.2020р.

отримати високі показники якості передавання дискретних повідомлень та забезпечити високу точність синхронізації. У англomовній науковій літературі зазначена науково-прикладна проблема має назву «Low Autocorrelation Binary Sequence Problem» та входить під номером 005 до переліку сучасних проблем теоретичного, прикладного та обчислювального характеру «CSPLib: A problem library for constraints», які пропонуються для розв'язання вченим міжнародної наукової спільноти. Основною складовою цієї проблеми є питання існування регулярних структур послідовностей, регулярних методів їх синтезу, які б дозволяли як розуміти закономірності у внутрішніх структурах цих послідовностей, так і синтезувати їх з використанням детерміністичних підходів на основі регулярних правил кодування (синтезу), на відміну від існуючих стохастичних, евристичних та інших методів, які, як правило, містять у своєму складі етап перебору (напрявлений перебір у певних областях тощо). Теоретичні дослідження, спрямовані на розвиток методологічного апарату виявлення закономірностей у послідовностях та різних кодових структурах є також важливими для суміжних до галузі телекомунікацій областей, наприклад, для галузі кібербезпеки та захисту інформації. Таким чином, тема дисертаційної роботи Голубничого О.Г. є **актуальною** у теоретичній та практичній площині галузі телекомунікацій та суміжних галузей.

Наукова робота за темою дисертації пов'язана з реалізацією п. 2 напрямів розвитку телекомунікаційних мереж, визначених «Концепцією розвитку телекомунікацій в Україні», у частині розвитку широкосмугового абонентського доступу з використанням перспективних технологічних рішень, зокрема технологій надширокосмугового радіодоступу, «Основними науковими напрямами та найважливішими проблемами фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних і гуманітарних наук НАН України на 2014-2018 роки». Актуальність тематики також підтверджується НДР, з якими вона тісно пов'язана і в яких Голубничий О.Г. був виконавцем:

- НДР № 674-ДБ10 «Технологія створення, експлуатації та експертизи комплексних систем захисту інформації» (№ держ. реєстрації 0110U000225);
- НДР № 874-ДБ13 «Створення та дослідження нових систем захищеного авіаційного радіозв'язку в рамках концепції CNS/ATM ICAO» (№ держ. реєстрації 0113U000093).

Оцінка обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій. Дисертаційна робота характеризується глибоким аналізом та коректним використанням теорії шумоподібних сигналів та теорії обробки сигналів (для розроблення регулярного методу синтезу узагальнених бінарних послідовностей Баркера, методу оцінювання енергетичних параметрів сигналів та завад), теорії інформації та передавання сигналів (для порівняльного аналізу якості передавання повідомлень при використанні синтезованих та відомих

послідовностей), теорії ймовірності та математичної статистики (гаусівська змішана модель, EM-алгоритм, метод k-середніх, метод максимальної правдоподібності), теорії множин (для аналітичного опису кореляційних функцій послідовностей), теорії систем (для дослідження емерджентності та інших системних властивостей синтезованих послідовностей), методів кластерного аналізу (для аналізу інверсно-ізоморфних структур відомих бінарних послідовностей Баркера), структурного прогнозування (для виділення базових регулярних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера), структурно-логічного аналізу (для аналізу структур синтезованих послідовностей та їх кореляційних функцій). Окремим підтвердженням достовірності наукових положень та отриманих результатів є конкретні приклади синтезованих у дисертації систем послідовностей та їх порівняльний аналіз з найближчим аналогом (комплементарними послідовностями Голея) у п'ятому та шостому розділах дисертації, а також у додатку В (моделювання широкопasmового каналу зв'язку TH-DSSS).

Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списків використаних джерел до кожного розділу та додатків і має 294 сторінки основного тексту безпосередньо у розділах дисертації, 65 рисунків, 38 таблиць, 65 сторінок додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи – 396 сторінок.

Ідентичність змісту автореферату й основних положень дисертації.
Проаналізувавши автореферат та дисертацію здобувача, можна зробити висновок, що в авторефераті з необхідною повнотою відображено проблему, яка вирішується у дисертації, загальну характеристику роботи, основний зміст та висновки дисертації. Для основних положень дисертації та змісту автореферату характерна повна ідентичність.

У **вступі** автором обґрунтована: актуальність проблеми; означені мета, задачі, об'єкт та предмет дослідження; визначена наукова новизна та практична значимість результатів роботи, наведені дані про їх впровадження.

У **першому оглядовому розділі роботи** автором виконано аналіз наукової літератури за темою дисертаційного дослідження, зокрема, проаналізовано існуючі методологічні обмеження проблеми синтезу бінарних послідовностей, які є оптимальними за мінімаксним критерієм щодо їх АКФ, відомі типи послідовностей Баркера (трійкові, багатофазні, композитні та обернені композитні, сигнали Баркера-Волинської, коди на основі комбінацій кодів Баркера, Мерсенна та Рагхаварао та ін.), практичну цінність таких послідовностей для побудови телекомунікаційних систем з розширеним спектром, відомі нерегулярні методи синтезу бінарних послідовностей, які є оптимальними за мінімаксним критерієм щодо їх АКФ. Проведений аналіз надав можливість окреслити проблему дисертаційного дослідження з урахуванням додаткових обмежень, обґрунтувати використання методологічного підходу «синтез через аналіз» для її розв'язання

(синтез узагальнених структур послідовностей на основі аналізу їх частинних відомих випадків), а також сформулювати основну наукову гіпотезу дослідження, яка полягає в тому що усі відомі бінарні послідовності Баркера є частиною більш узагальнених регулярних структур послідовностей, які можуть бути синтезовані регулярними методами.

У *другому розділі* автор розв'язує одну з основних наукових задач, пов'язаних з вирішенням проблеми синтезу послідовностей з дельтаподібною АКФ – задачу виявлення базових регулярних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера та обґрунтовує їх класифікацію. Для цього автором запропоновано наукову ідею структуризації послідовностей з апіорі невідомими внутрішніми структурами, яка полягає в тому, що взаємнокореляційні зв'язки між послідовностями містять інформацію про внутрішні структури цих послідовностей та взаємозв'язки між ними, а отже слід провести поглиблений статистичний аналіз цих кореляційних зв'язків з використанням спеціальних методів кластерного та структурно-логічного аналізу. Для реалізації цієї наукової ідеї та вирішення зазначеної наукової задачі автор здійснює розроблення нового методологічного апарату – параметрично-критеріальної модифікації EM-алгоритму з видаленням компонент гаусівської змішаної моделі для системно-структурного аналізу взаємнокореляційних зв'язків у системах кодових конструкцій, отриманих в результаті їх кореляційного аналізу, а також на її основі методу структуризації кодових конструкцій з апіорі невідомими внутрішніми структурами, якими у дослідженні є комбінаторні набори інверсно-ізоморфних структур усіх відомих бінарних послідовностей Баркера. На цьому етапі досліджень автор доводить дві теореми та вводить три нові додаткові критерії кластеризації для корегування процедури реалізації EM-алгоритму при аналізі структур послідовностей. В результаті структуризації відомих бінарних послідовностей Баркера з використанням запропонованого методу структуризації у другому розділі дисертації виявлено внутрішні структури таких послідовностей та взаємозв'язки між ними, що в сукупності становить собою інформацію про їх регулярні структури та представлено з урахуванням обґрунтованої класифікації структур за трьома типами на рис. 2.3, рис. 2.6 та рис. 2.7 дисертації (рис. 2 – рис. 4 автореферату). Виявлені базові регулярні структури узагальнених бінарних послідовностей Баркера лягли в основу подальшого узагальнення цього типу бінарних послідовностей на основі їх виявлених регулярних структур.

У *третьому розділі* дисертації розроблено регулярний метод синтезу узагальнених бінарних послідовностей Баркера, в основі якого лежить екстраполяція базових регулярних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера, які було виявлено у другому розділі. При екстраполяції структур як основний принцип було використано виявлену та досліджену автором властивість рекурентності базових регулярних структур узагальнених бінарних послідовностей

Баркера за довжиною, яка схематично спостерігається для різних типів послідовностей на рис. 2.3, рис. 2.6 та рис. 2.7, що в загальнометодологічному сенсі відповідає реалізації підходу «синтез через аналіз». При екстраполяції також додатково була використана ще одна виявлена у дисертації властивість базових регулярних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера, а саме симетрично-дзеркальна структурованість послідовностей. Відтворення зазначених двох властивостей базових регулярних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера у повній системі регулярних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера забезпечило системність у регулярних структурах послідовностей для усього нового запропонованого у дисертації класу узагальнених бінарних послідовностей Баркера.

Слід зазначити, що основною класифікаційною ознакою (критерієм) приналежності послідовностей до класу послідовностей Баркера класично вважаються їх кореляційні властивості, а саме обмеження абсолютного рівня бічних пелюсток АКФ значенням $1/N$, де N – довжина послідовності. У запропонованому в дисертації класі «Узагальнені бінарні послідовності Баркера» основною класифікаційною ознакою, з урахуванням екстраполяції базових регулярних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера, є спільність властивостей структур послідовностей, яка в першу чергу полягає у рекурентності їх структур за довжиною та симетрично-дзеркальній структурованості як для окремо взятих типів послідовностей (тип 1, тип 2 та тип 3), так і для усього запропонованого класу в цілому. При цьому базові регулярні структури узагальнених бінарних послідовностей Баркера одночасно відповідають як класичній класифікаційній ознаці (критерію) приналежності послідовностей до класу послідовностей Баркера, так і класифікаційній ознаці спільності властивостей їх структур, яку автор обґрунтовано вважає класифікаційною ознакою регулярності (певної упорядкованості) послідовностей з урахуванням контексту вирішуваної наукової проблеми, пов'язаної з синтезом регулярних структур послідовностей та регулярних методів їх синтезу. При цьому, як було показано автором дисертації у подальших розділах, зазначена основна класична класифікаційна ознака приналежності послідовностей до класу послідовностей Баркера повністю відтворюється у виявлених далі автором мультиплікативно комплементарних структурах синтезованих узагальнених бінарних послідовностей Баркера.

У *четвертому розділі* досліджено кореляційні властивості синтезованого у третьому розділі класу узагальнених бінарних послідовностей Баркера та виявлено закономірності у структурах їх АКФ. Важливе практичне значення цієї складової дослідження полягає в тому, що структури АКФ синтезованих послідовностей проявляються при обробленні відповідних сигналів на фізичному рівні ширококутових телекомунікаційних систем та впливають на якість виявлення

сигналів, які в результаті їх обробки утворюють сигнальні структури, близькі за формою до δ -функції Дірака (при обробленні сигналів результати узгодженої фільтрації за формою відтворюють АКФ сигналу, з яким він є узгодженим), що визначальним чином впливає на швидкість та завадостійкість передавання дискретних повідомлень у каналах зв'язку широкосмугових телекомунікаційних систем.

Основною робочою науковою гіпотезою, сформульованою автором при вирішенні наукової задачі синтезу математичних моделей для аналітичного опису АКФ узагальнених бінарних послідовностей Баркера, було те, що АКФ синтезованих послідовностей становлять собою певним чином упорядковані (регулярні) структури, які можуть бути формалізовані у складі математичних моделей для аналітичного опису АКФ певними математичними виразами, що мають властивості рекурентності, прорідженості структур за значенням зсуву (аргументу) АКФ тощо. Реалізація та підтвердження зазначеної робочої наукової гіпотези дозволили автору отримати такі важливі характерні риси синтезованої повної системи математичних моделей для аналітичного опису АКФ узагальнених бінарних послідовностей Баркера, як компактність математичних моделей, яка проявляється завдяки відсутності в них дублювання структурних складових АКФ послідовностей, та відтворення у математичних моделях не лише структур, а й структурних особливостей АКФ послідовностей, які б проявлялися за такими ознаками, як залежність від певних значень довжин ДКП, наявності структурних складових АКФ тощо. В результаті, на основі структурно-логічного аналізу АКФ послідовностей, у четвертому розділі було синтезовано повну систему (для синтезованої послідовності будь-якої довжини будь-якого типу та підтипу) математичних моделей для аналітичного опису АКФ узагальнених бінарних послідовностей Баркера, які в результуючому вигляді для послідовностей типу 1 представлено виразом (4.8), для послідовностей типу 2 – виразом (4.9), для послідовностей типу 3 – виразом (4.12).

Було виконано декомпозицію структур АКФ синтезованих узагальнених бінарних послідовностей Баркера на основі їх лінійних складових, що було проілюстровано на прикладах рис. 4.13 – рис. 4.16, отримано модифікацію повної системи математичних моделей для аналітичного опису АКФ узагальнених бінарних послідовностей Баркера, яка ґрунтується на представленні АКФ у вигляді сукупностей лінійних складових та виокремлених точок АКФ. Теоретичний та практичний інтерес розробленої модифікації математичних моделей АКФ полягає в зручності спектрального аналізу сигнально-кодових конструкцій на основі синтезованих послідовностей (лінійна складова АКФ відповідає структурній складовій типу $\sin x/x$ у спектрі сигналу при спрощеному використанні при такому аналізі аналогії форми сигналу, його АКФ та спектру для випадку прямокутного імпульсу).

У розділі також було виявлено ряд спільних для усіх типів та підтипів синтезованих узагальнених бінарних послідовностей Баркера системних властивостей їх АКФ, які, зокрема, можуть служити одним з факторів заявленої автором «узагальненості» нового запропонованого у дисертації типу послідовностей: відокремленість основної пелюстки АКФ, гребінчастість структур АКФ, декомпозиція структур АКФ лінійними складовими, емерджентність структур АКФ синтезованих послідовностей різних типів, яка дозволила виявити та синтезувати регулярними методами у п'ятому розділі нові сигнально-кодові структури – мультиплікативно комплементарні структури узагальнених бінарних послідовностей Баркера.

У *п'ятому розділі* розроблено методи синтезу, сумісної обробки та декомпозиції мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера для фізичного рівня широкосмугових телекомунікаційних систем, які працюють за технологією DSSS. У теоретичному плані мультиплікативно комплементарні структури узагальнених бінарних послідовностей Баркера, які було виявлено у дисертації на основі досліджених у четвертому розділі системних властивостей АКФ синтезованих послідовностей, розвивають теорію кодування та обробки сигналів й доповнюють її мультиплікативно комплементарною ланкою регулярних структур сигнально-кодових конструкцій. Слід зазначити, що найближчим аналогом до синтезованих у дисертації мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера є відомий тип адитивно комплементарних послідовностей Голя, тому можна вважати, що дисертаційне дослідження доповнило теорію комплементарних послідовностей мультиплікативною ланкою на додачу до відомої адитивної ланки. Важливе практичне значення виявлених та синтезованих розробленим регулярним методом мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера для широкосмугових телекомунікаційних систем полягає в тому, що створюється можливість використання таких синтезованих систем бінарних послідовностей, які в результаті їх сумісної обробки даватимуть результат, еквівалентний певним неіснуючим (питання їх існування було розглянуто за аналізом робіт та доказів інших вчених у першому розділі дисертації) окремим бінарним послідовностям Баркера парної довжини $N > 13$.

В результаті синтезу з використанням розробленого методу були знайдені системи мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера, параметри та склад яких представлено у табл. 5.4 дисертації (табл. 2 автореферату). Автором представлено порівняльний аналіз синтезованих послідовностей з відомими комплементарними послідовностями Голя, який показав, що синтезовані у дисертації мультиплікативно комплементарні системи узагальнених бінарних послідовностей Баркера

дозволяють при тій же кількості (дві) послідовностей у системі отримати нові можливі значення кількості дискретних елементів сигналу у широкосмуговому каналі зв'язку, а саме $N = 12, 24, 48, 56, 96, 112, 192, 224, 384, 448, 768, 896$ при $N < 1000$, що дозволяє підвищити можливості конфігурації параметрів фізичного рівня широкосмугових телекомунікаційних систем.

У шостому розділі досліджено особливості функціонування фізичного рівня широкосмугових телекомунікаційних систем при використанні синтезованих узагальнених бінарних послідовностей Баркера та зроблено їх порівняння з комплементарними послідовностями Голя, які є найближчим аналогом до синтезованих послідовностей та використовуються у безпроводових телекомунікаційних системах. Автором враховано особливість синтезованих систем мультиплікативно комплементарних послідовностей, яка полягає в їх чутливості до мультиплікативних завад, що впливає на результат обробки сигнально-кодових конструкцій на їх основі (вибір порогу прийняття рішення, завадостійкість, характеристики виявлення тощо). З метою врахування цього явища було розроблено метод оцінювання енергетичних параметрів ортогональних сигнально-кодових конструкцій, які переносять складові системи мультиплікативно комплементарних послідовностей, метою якого є одночасне оцінювання рівня мультиплікативних завад у вигляді повільних (у порівнянні з тривалістю сигнально-кодових конструкцій) завмирань та дисперсії адитивних завад на вході системи обробки при дії на її вході суміші корисного сигналу з мультиплікативними та адитивними завадами. Розроблений метод ґрунтується на кореляційній обробці сигналів, належить до класу методів непрямих вимірювань та потребує при його реалізації формування додаткових сигналів, які можна класифікувати як «калібрувальні». Розроблено алгоритм роботи та структурну схему системи оцінювання енергетичних параметрів сигналу та завад на основі використання розробленого методу, визначено особливості його функціонування, які пов'язані з налаштуванням внутрішніх параметрів методу. З метою визначення можливості використання синтезованих систем послідовностей у багатоканальних широкосмугових системах з багатостанційним доступом з кодовим розділенням каналів (CDMA) автором було досліджено взаємнокореляційні зв'язки у синтезованих системах мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера та показано обмеженість їх використання для телекомунікаційних систем з технологією CDMA із зазначенням найбільш прийнятних (слабо корельованих) кодових структур.

У підрозділі 6.5 автором було розроблено алгоритм формування та структурну схему обробки сигналів на фізичному рівні широкосмугових телекомунікаційних систем при використанні мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера. Запропонована структурна схема була представлена у порівняльному контексті зі структурною

схемою на основі відомих адитивно комплементарних послідовностей Голя (рис. 6.3 та рис. 6.4), який дозволив на с. 292 – 295 дисертації показати переваги синтезованих систем послідовностей (зменшення апаратної складності, вимог до перехідних процесів, зменшення сумарної ширини спектру у каналі зв'язку у 1,6 раз та відповідне підвищення спектральної ефективності передавання інформації, зниження ймовірності виникнення помилок першого роду при виявленні сигналів через більше на 2,3 дБ співвідношення сигнал/шум у бічних пелюстках сигналу на виході системи обробки), а також їх недоліки (затримка через те, що головна пелюстка сигналу на виході системи обробки з'являється дещо пізніше через узгодження головних пелюсток сигнальних складових після узгодженої фільтрації, підвищення ймовірності виникнення помилок другого роду при виявленні сигналів через більше на 8,9 дБ співвідношення сигнал/шум у основній пелюстці сигналу на виході системи обробки) у порівнянні з відомими комплементарними послідовностями Голя. Розроблено структурну схему передавання інформації за технологією DSSS при використанні запропонованих узагальнених бінарних послідовностей Баркера та методів багатопозиційної модуляції (рис. 6.6), яка на відміну від найближчого аналогу (послідовностей Голя) дозволяє використовувати на фізичному рівні системи сигнально-кодових конструкцій з кількістю компонентів у системі, більшою двох. Також у розділі розроблено аналітичні моделі для оцінювання завадостійкості, спектральної ефективності, пропускної спроможності у системах TH-DSSS, а також ймовірностей помилок першого та другого роду при використанні синтезованих узагальнених бінарних послідовностей Баркера.

У *висновках* дисертаційної роботи показано, що в ході проведених наукових досліджень вирішена наукова проблема синтезу 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. Констатовано, що вирішенням цієї проблеми у галузі телекомунікацій є новий синтезований у дисертації тип послідовностей – узагальнені бінарні послідовності Баркера, які характеризуються регулярними структурами, можуть бути синтезовані регулярними методами синтезу та утворюють нові мультиплікативно комплементарні структури бінарних послідовностей.

Наукова цінність результатів роботи. Висновки та результати дисертації викладені змістовно, в логічній послідовності, у відповідності зі структурою задач, поставлених і вирішених у дисертаційній роботі. Достовірність отриманих результатів та наукових положень підтверджена результатами моделювання та порівняльного аналізу з найближчим аналогом (комплементарними послідовностями Голя), які в основному викладені у шостому розділі да додатку В, коректністю математичних викладок.

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

– *вперше розроблено* метод структуризації кодових конструкцій з апіорі невідомими внутрішніми структурами, який за рахунок розробленої у дисертації параметрично-критеріальної модифікації ЕМ-алгоритму з видаленням компонент гаусівської змішаної моделі для аналізу кореляційних зв'язків у системі кодових конструкцій дозволив виявити базові регулярні структури узагальнених бінарних послідовностей Баркера та обґрунтувати класифікацію узагальнених бінарних послідовностей Баркера за типами з метою подальшого розроблення регулярних методів синтезу сигнально-кодових конструкцій на їх основі для передавання інформації широкосмуговими каналами;

– *вперше розроблено* класифікацію узагальнених бінарних послідовностей Баркера за типами, обґрунтовану за рахунок аналізу виявлених базових регулярних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера, яка разом з результатами аналізу виявлених базових регулярних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера дозволила синтезувати детерміновані правила кодування узагальнених бінарних послідовностей Баркера та їх мультиплікативно комплементарних структур з метою їх використання як сигнально-кодових конструкцій для передавання інформації широкосмуговими каналами;

– *вперше розроблено* регулярний метод синтезу узагальнених бінарних послідовностей Баркера, який за рахунок детермінованих правил кодування узагальнених бінарних послідовностей Баркера дозволив отримати регулярні структури узагальнених бінарних послідовностей Баркера, їх мультиплікативно комплементарні структури та виявити у них системні властивості з метою синтезу сигнально-кодових конструкцій, які підвищують пропускну спроможність систем передавання дискретних повідомлень у широкосмугових каналах зв'язку;

– *вперше розроблено* повну систему математичних моделей для аналітичного опису АКФ узагальнених бінарних послідовностей Баркера, які за рахунок структурно-логічного аналізу та декомпозиційного представлення АКФ узагальнених бінарних послідовностей Баркера лінійними складовими дозволили проводити аналіз та виявляти системні властивості у АКФ узагальнених бінарних послідовностей Баркера, синтезувати мультиплікативно комплементарні структури сигнально-кодових конструкцій на їх основі для передавання інформації широкосмуговими каналами;

– *вперше розроблено* метод синтезу та сумісної обробки мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера, який за рахунок виявлених системних властивостей у структурах АКФ узагальнених бінарних послідовностей Баркера та мультиплікативної сумісної обробки результатів узгодженої фільтрації сигнальних складових дозволяє здійснювати синтез та обробку сигнально-кодових конструкцій на основі мультиплікативно

комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера, що зменшує ймовірність помилок першого роду при виявленні сигналів у широкосмугових каналах передавання інформації та підвищує пропускну спроможність передавання дискретних повідомлень у них у порівнянні з комплементарними послідовностями Голя;

– *вперше розроблено* метод декомпозиції мультиплікативної структури сигналу на виході системи сумісної обробки мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера, який за рахунок виокремлення частинних пелюсток у складі сигналу дозволив здійснювати статистичний аналіз вихідного сигналу з нестационарним характером складової завад при обробці сигнально-кодових конструкцій на основі узагальнених бінарних послідовностей Баркера при їх використанні для передавання інформації широкосмуговими каналами;

– *вперше розроблено* метод оцінювання енергетичних параметрів ортогональних сигнально-кодових конструкцій та завад, який за рахунок непрямих вимірювань, реалізованих шляхом статистичного аналізу сигналів на виході системи кореляційної обробки сигналів, дозволяє одночасно оцінювати постійні та змінні параметри широкосмугових каналів передавання інформації при використанні сигнально-кодових конструкцій на основі узагальнених бінарних послідовностей Баркера, підвищувати живучість зв'язку на фізичному рівні широкосмугових телекомунікаційних систем при використанні таких каналів зв'язку до зовнішніх впливів, пов'язаних з чутливістю мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера до мультиплікативних завад;

– *отримали подальший розвиток* аналітичні моделі оцінювання показників якості передавання інформації у широкосмугових каналах зв'язку шляхом розроблення таких моделей для випадку використання узагальнених бінарних послідовностей Баркера як сигнально-кодових конструкцій;

– *вперше розроблено* методологію синтезу та обробки узагальнених бінарних послідовностей Баркера, яка розв'язує проблему синтезу регулярними методами 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 бічних пелюсток їх АКФ для широкосмугових каналів зв'язку.

Значення результатів для практики. Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що основні результати роботи можуть використовуватися для організації фізичного рівня широкосмугових телекомунікаційних систем, які повинні функціонувати при низьких співвідношеннях сигнал/шум, із забезпеченням до 1,6 раз більшої пропускну спроможності в умовах однакової ширини смуги частот та сигнально-завадового

стану у порівнянні з найближчим відомим аналогом (комплементарними послідовностями Голея). Важливою практичною складовою також є те, що запропоновано регулярні правила кодування бінарних послідовностей та їх систем для одноканальних ширококутових телекомунікаційних систем, які працюють за технологією DSSS, що дозволяє на основі їх використання спростити програмно-апаратну складність відповідних вузлів обладнання, пов'язаних з формуванням та обробкою сигнально-кодових конструкцій (для відомих технічних рішень необхідно було зберігати у функціональних вузлах готові послідовності, зазначені наприклад у проєкті GitHub «Peak Sidelobe (PSL) Level of Binary Sequences Research Kit» чи інших джерелах у зв'язку з відсутністю регулярних методів їх синтезу та широким використанням перебірних алгоритмів їх пошуку).

Практична цінність дисертаційної роботи полягає в такому:

– розроблено алгоритм формування та структурну схему обробки сигналів на фізичному рівні ширококутових 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, особливістю якої є краща адаптованість до використання методів багатопозиційної модуляції;

– розроблено імітаційні моделі каналів зв'язку та їх складові при використанні узагальнених бінарних послідовностей Баркера.

Матеріали дисертаційної роботи впроваджено у науково-технічну діяльність Авіакомпанії «Украерорух» (Державне підприємство обслуговування повітряного руху України «Украерорух»), освітню діяльність кафедри телекомунікаційних та радіоелектронних систем Факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Національного авіаційного університету, використано у рамках програми міжнародної академічної мобільності Erasmus Mundus ACTIVE в Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes університету Ecole Centrale de Nantes (м. Нант, Франція).

Повнота викладу основних результатів та висновків в опублікованих працях. За матеріалами дисертації опубліковано 44 друковані праці, з яких більшість (26 праць, зокрема статті у періодичних виданнях) опубліковано автором одноосібно без співавторів. Публікаційна активність автора безпосередньо за назвою теми дисертаційного дослідження простежується з 2013 року, що свідчить про системність дослідження протягом тривалого періоду часу. Серед публікацій автора за темою дисертації 7 індексуються наукометричною базою Scopus (5 з яких – також Web of Science), 3 – наукометричною базою Index Copernicus, є 1 патент на винахід, 2 патенти на корисні моделі, 2 статті у періодичних виданнях іноземних

держав, 18 статей у періодичних фахових виданнях України, 18 матеріалів та тез доповідей на наукових конференціях, одна з яких, що безпосередньо пов'язана з назвою теми дисертації, здобула відзнаку «The Best Poster Presentation» 2nd prize на Signal Processing Symposium / SPS-2013 (м. Яхранка, Польща, 2013 р.), що свідчить про достатній рівень апробації результатів дисертації.

Ідентичність змісту автореферату й основних положень дисертації.
Зміст автореферату повністю відповідає змісту дисертаційної роботи та відображає основні положення, що виносяться на захист.

Відповідність дисертаційної роботи спеціальності. Дисертаційна робота Голубничого О.Г. за змістом, обсягом та оформленням повністю відповідає формулі та основним напрямкам досліджень спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

Зауваження до роботи.

1. Наукова проблема синтезу бінарних послідовностей, які є оптимальними за мінімакним критерієм щодо їх АКФ (відома як «Low Autocorrelation Binary Sequence Problem» у англійських джерелах), вирішена в дисертації лише за умов наявності додаткових обмежень, які полягають у синтезі регулярних структур послідовностей та їх комбінаторних систем при обмеженому максимальному рівні абсолютних значень бічних пелесток їх АКФ, про що, зокрема, автор зазначає у загальних висновках до дисертації.

2. Запропоновані автором нові системи послідовностей та методи їх обробки на сучасному етапі розвитку телекомунікацій є більш актуальними не для організації безпосередньо фізичного рівня широкосмугових систем, як показує автор у шостому розділі роботи, а для забезпечення синхронізації у телекомунікаційних системах, підвищення її точності у порівнянні з аналогами.

3. Формулювання пунктів наукової новизни в дисертації та авторефераті характеризується надмірною деталізацією.

4. У дисертації відсутні дані щодо експериментального підтвердження запропонованих технічних рішень, їх ефективність ілюструється лише теоретичними викладками та результатами моделювання у додатку В.

5. На рис. 6.1 дисертації та відповідно рис. 9 автореферату показано приклад сигналів, які існують при обробці однієї з найпростіших запропонованих систем послідовностей, що визначає тривіальний характер цього прикладу.

6. Розроблення регулярного методу синтезу узагальнених бінарних послідовностей Баркера у третьому розділі дисертації безпосередньо ґрунтується на структурно-логічному аналізі та структурному прогнозуванні виявлених у другому розділі базових регулярних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера, що формує евристичний характер цієї складової дослідження та отриманих результатів.

7. У підрозділі 6.7 дисертації розроблено аналітичну модель для визначення ймовірності бітових помилок при використанні у широкосмуговому каналі зв'язку синтезованих мультиплікативно комплементарних структур узагальнених бінарних послідовностей Баркера, але не представлені типові для таких досліджень графіки, що характеризують завадостійкість передавання дискретних повідомлень, не надано їх порівняльну характеристику з відповідними графіками для відомих сигнально-кодових конструкцій, методів прийому, обробки сигналів тощо.

8. Представлений у підрозділі 1.4 аналіз методів синтезу бінарних ДКП, які є оптимальними за мінімаксімним критерієм щодо їх АКФ, не виявляє причин проблеми відсутності регулярних методів синтезу таких ДКП, їх умов, які були б строго формалізовано математично, а лише описує відомі групи нерегулярних методів синтезу, приклади відомих типів послідовностей та їх особливості.

Загальні висновки. Дисертаційна робота Голубничого О.Г. є завершеною працею, що виконана автором самостійно на високому науковому рівні. В роботі отримані науково обґрунтовані теоретичні та практичні результати, які є суттєвими для розвитку методів аналізу й синтезу сигналів і кодів для передавання інформації каналами з постійними та змінними параметрами, підвищення пропускної спроможності та завадостійкості систем передавання дискретних повідомлень у телекомунікаційних системах та мережах.

За актуальністю, ступенем новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною значимістю одержаних результатів дисертаційна робота Голубничого О.Г., яка подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, відповідає вимогам до докторських дисертацій п.п. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р. (зі змінами внесеними згідно з Постановами КМУ № 656 від 19.08.2015 р. та № 567 від 27.07.2016 р.), а її автор Голубничий Олексій Георгійович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

ОФІЙНИЙ ОПОНЕНТ

професор кафедри кібербезпеки та захисту
інформації факультету інформаційних технологій
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка
доктор технічних наук, професор

С. В. Толупа
С. В. Толупа



