

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕМАТИЧНИХ МАШИН І СИСТЕМ**

ЗАЙЦЕВ СЕРГІЙ ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 004.415.3:004.7(043)

**МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОЇ ДОСТОВІРНОСТІ
ІНФОРМАЦІЇ У БЕЗПРОВОДОВИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ**

05.13.06 – інформаційні технології

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Чернігівському національному технологічному університеті
Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант

доктор технічних наук, професор
Казимир Володимир Вікторович,
Чернігівський національний технологічний
університет Міністерства освіти і науки України,
проректор з наукової роботи

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Оксіюк Олександр Глібович,
Київський національний університет ім. Тараса
Шевченка Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри кібербезпеки та захисту
інформації

доктор технічних наук, професор
Кулик Анатолій Ярославович,
Вінницький національний медичний університет
ім. М.І. Пирогова Міністерства освіти і науки
України, Міністерства охорони здоров'я України,
завідувач кафедри біофізики, інформатики та
медичної апаратури

доктор технічних наук, професор
Опанасенко Володимир Миколайович,
Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН
України,
провідний науковий співробітник

Захист відбудеться «29» червня 2016 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 26.204.01 в Інституті проблем математичних машин і систем НАН
України за адресою: 03187, м. Київ-187, проспект Академіка Глушкова, 42.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту проблем математичних
машин і систем НАН України за адресою: 03187, м. Київ-187, проспект Академіка
Глушкова, 42.

Автореферат розісланий «26» травня 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



М.Г. Ієвлев

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку безпроводових систем передачі даних, таких як систем мобільного зв'язку другого покоління 2G, третього покоління 3G, четвертого покоління 4G LTE-Advanced, систем мобільного радіодоступу WiFi та WiMax, програмованих безпроводових розподілених систем, які використовують технологію Software Defined Radio, а також мобільний зв'язок різних військових формувань та відомств, вимагає застосування інформаційних технологій, які дозволяють у режимі реального часу гарантувати якісну передачу кодованих даних. Як правило, в таких системах забезпечення заданих значень показників достовірності інформації здійснюється за рахунок використання інформаційних технологій кодування. Значний внесок у розвиток цього напрямку зроблений такими вченими, як А. Г. Зюко, Д. Д. Кловський, М. Л. Теплов, Л. М. Фінк, Л. Є. Варакін, В. Л. Банкет, В. В. Квашенников, В. І. Борисов, К. Шеннон, Д. Форні, Ф. Дж. Мак-Вільямс, К. Берроу, Л. Хензо, А. Голдсмит, М. Валенті та ін. Їх роботи мають велике практичне і теоретичне значення, оскільки в них розглядаються потенційні можливості систем передачі інформації, пропонуються різні підходи до забезпечення їх достовірності.

Водночас, під час передачі даних безпроводовими каналами виникає багато труднощів, пов'язаних із впливом природних, промислових та навмисних завад (шумова загороджувальна завада, шумова завада в частині смуги, завада у відповідь, полігармонійна завада, комбінована завада тощо). В умовах динамічно змінюваних завад збільшується ймовірність бітової помилки, стає неможливим забезпечення заданого рівня достовірності інформації за допомогою простого використання відомих методів кодування, в тому числі й найбільш ефективних з них – LDPC-кодів та турбокодів. Априорна невизначеність щодо природи завад приводить до появи проблеми забезпечення сталої достовірності інформації, коли в заданих межах підтримується її необхідний рівень протягом певного проміжку часу передачі даних в наявних умовах.

Наявні методи адаптивного управління, які застосовуються для забезпечення заданої достовірності інформації на основі завадостійких кодів, носять розрізнений характер. При обмеженнях на значення швидкості кодування в системах з параметричною адаптацією у випадку підвищення рівнів шумів до певного рівня забезпечення заданих характеристик достовірності інформації стає неможливим. Тому постає питання застосування багаторівневої адаптації, причому не тільки параметрів, а й структури кодів.

Крім того, для кодів, які засновані на ймовірнісних алгоритмах декодування, виникає потреба у додатковому врахуванні априорної інформації та інформації щодо розкриття невизначеності декодування. Під час реалізації процедури декодування прийнятої кодової послідовності стають необхідні априорні відомості, які зводяться до знання або часткового знання функцій правдоподібності прийнятих даних. Найбільш характерним це стає саме для турбокодів та каскадних конструкцій на основі турбокодів. За результатами аналізу декодованої інформації можна сформулювати оцінки невизначеності інформації, мінімізувати ці оцінки вибором

правил рішення за допомогою методів структурної і параметричної адаптації та забезпечити сталу достовірність інформації.

Водночас, існує суперечність між обмеженими можливостями традиційних підходів щодо контролю, класифікації та кодування інформації, розрізненими методами та моделями забезпечення достовірності інформації, що ґрунтуються на надлишкових критеріях, та потребами створення організованої послідовності процесів адаптації багаторівневих систем з урахуванням невизначеності при прийнятті рішень для забезпечення сталої достовірності інформації.

Таким чином, науково-прикладна проблема, яка полягає у забезпеченні сталої достовірності інформації систем передачі даних в умовах апіорної невизначеності за рахунок розроблення моделей і методів, що використовують упорядковану послідовність процесів багаторівневої адаптації каскадних кодових конструкцій та додаткові показники розкриття невизначеності декодування, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота над дисертацією виконувалась у Чернігівському національному технологічному університеті в межах держбюджетної теми Чернігівського національного технологічного університету і прикладних науково-дослідних робіт. Напрямки досліджень дисертаційної роботи пов'язані з реалізацією розпорядження Кабінету Міністрів України від 15.05.2013 року № 386-р «Про схвалення Стратегії розвитку інформаційного суспільства в Україні». Результати дисертаційних досліджень були використані під час виконання науково-дослідної роботи наукового центру зв'язку та інформатизації ВІПІ НТУУ «КПІ» (шифр «Сопка») у ході визначення вимог до новітніх засобів радіозв'язку, в науково-дослідній роботі наукового центру зв'язку та інформатизації ВІПІ НТУУ «КПІ» (шифр «Вежа») під час визначення вимог до нових автоматизованих систем радіозв'язку, в науково-дослідній роботі наукового центру зв'язку та інформатизації ВІПІ НТУУ «КПІ» (шифр «Простір») у процесі визначення вимог до нових засобів радіозв'язку, в дослідно-конструкторській роботі «Аврора» ТОВ «Телекарт-Прилад» під час створення відомчих КХ-радіостанцій Р-1150 для військових формувань, а також у науково-дослідній та дослідно-конструкторській роботі ТОВ «РДЛ» у процесі створення відомчих IP-мереж для органів влади та місцевого самоврядування.

Автор дисертаційної роботи брав участь у цих науково-дослідних роботах як відповідальний виконавець та співвиконавець, що підтверджується відповідними актами реалізації в додатку дисертаційної роботи.

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає у підвищенні ефективності безпроводових систем передачі даних в умовах апіорної невизначеності через забезпечення сталої достовірності інформації за рахунок створення інформаційної технології, моделей і методів, що використовують упорядковану послідовність процесів багаторівневої адаптації каскадних кодових конструкцій та додаткові показники розкриття невизначеності декодування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1) на основі аналізу процесів передачі інформації в безпроводових системах передачі даних дослідити та обґрунтувати поняття сталої достовірності інформації в умовах апіорної невизначеності та розробити критерії її оцінювання;

2) розробити метод структурної адаптації каскадних кодів для динамічного синтезу їх комбінованих структур;

3) розробити метод параметричної адаптації компонентних кодів турбокоду з використанням показника невизначеності;

4) удосконалити метод оцінювання достовірності прийнятої інформації та метод оцінювання дисперсії завад в адаптивному декодері турбокоду;

5) удосконалити метод прийняття рішень у процесі декодування турбокодів завдяки врахуванню додаткової інформації в кожному циклі декодування;

6) удосконалити метод формування адаптивних кодів з повтореннями за рахунок введення надлишковості в інформаційну послідовність завдяки врахуванню кореляційних властивостей ортогональних послідовностей;

7) удосконалити Log Map метод декодування турбокодів завдяки використанню лінійної та гібридної апроксимації логарифма Якобіана під час прийняття рішень про декодований біт;

8) розробити імітаційну модель процесу функціонування безпроводової системи передачі даних, включаючи векторну модель дискретно-неперервного каналу з урахуванням впливу навмисних завад;

9) розробити інформаційну технологію забезпечення сталої достовірності передачі інформації в умовах апріорної невизначеності, що ґрунтується на запропонованих методах та моделях багаторівневої адаптації каскадних кодових конструкцій.

Об'єкт дослідження – процеси формування і переробки кодованих даних у безпроводових інформаційно-телекомунікаційних системах.

Предмет дослідження – моделі та методи забезпечення достовірності інформації у безпроводових системах передачі даних.

Методи дослідження. Для вирішення поставленої науково-прикладної проблеми використані методи теорії кодування під час створення інформаційної технології забезпечення сталої достовірності передачі інформації в умовах апріорної невизначеності за рахунок застосування багаторівневої адаптації каскадних кодових конструкцій; теорії управління у процесі розроблення методів адаптації структури та параметрів кодів, методу прийняття рішень у процесі декодування турбокодів та методу формування адаптивних кодів з повторенням; апарат теорії ймовірності та математичної статистики під час розрахунку функцій правдоподібності декодера турбокоду, для оцінювання дисперсії завад в адаптивному декодері, а також для перевірки ефективності отриманих результатів; методи регресійного аналізу для оцінки достовірності прийнятої інформації; методи імітаційного моделювання та об'єктно-орієнтованого програмування у процесі розроблення та реалізації імітаційної моделі процесу функціонування безпроводової системи передачі даних.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше запропонована концепція забезпечення сталої достовірності передачі інформації в умовах апріорної невизначеності, яка ґрунтується на нових критеріях та методах і, на відміну від наявних, використовує критерії забезпечення сталої достовірності, показники невизначеності декодування та багаторівневу адаптацію каскадних кодових конструкцій.

2. Вперше розроблено метод структурної адаптації каскадних кодів, який, на відміну від наявних, включає двоступеневу адаптацію структури конкатенації кодів (на першому етапі відбувається визначення структури внутрішнього коду, а на другому, з урахуванням показника невизначеності, обираються структури компонентних кодів) та дозволяє динамічно синтезувати структури каскадних кодів для забезпечення сталої достовірності інформації в умовах апіорної невизначеності.

3. Вперше розроблено метод параметричної адаптації компонентних кодів турбокоду для забезпечення сталої достовірності інформації, який, на відміну від наявних, використовує вперше запропонований показник невизначеності та дозволяє в динаміці визначати розмір кадру, тип перемешувача, поліноми компонентних кодів та кількість ітерацій декодування для адаптації структури кодера в умовах апіорної невизначеності.

4. Удосконалено метод оцінювання достовірності інформації з урахуванням щільності розподілу нормалізованих значень кількості змін знаку апостеріорно-апіорних логарифмічних відношень функцій правдоподібності декодера турбокоду, що дозволяє підвищити точність оцінки достовірності інформації у разі відсутності додаткового тестового каналу.

5. Отримав подальший розвиток метод оцінювання дисперсії завад в адаптивному декодері турбокоду за рахунок обчислення глибини згортки функцій правдоподібності про передані біти багатоконponentних турбокодів з урахуванням функціональної залежності величини дисперсії від кількості компонентних кодерів турбокоду, що дає можливість зменшити апіорну невизначеність під час прийняття рішень та покращує точність визначення дисперсії завад.

6. Удосконалено метод прийняття рішень у процесі декодування турбокодів за рахунок використання апіорної інформації від додаткового кодування при кожній ітерації декодування багатоконponentного турбокоду, що дозволяє підвищити достовірність передачі інформації.

7. Отримав подальший розвиток метод формування адаптивних кодів з повтореннями, що заснований на використанні простого повторення кодових комбінацій, у частині створення надлишковості в інформаційних даних за рахунок використання ортогональних послідовностей з урахуванням їх кореляційних властивостей; що дозволяє в декодері турбокоду підвищити надійність прийняття рішень під час декодування бітів інформації.

8. Удосконалено Log Map метод декодування турбокодів за рахунок використання в алгоритмі декодування лінійної та гібридної апроксимації логарифма Якобіана під час прийняття рішень про декодований біт, що дозволяє підвищити достовірність передачі інформації.

9. Вперше розроблено імітаційну модель процесу функціонування безпроводової системи передачі даних, яка, на відміну від відомих, включає векторну модель дискретно-неперервного каналу системи OFDM з урахуванням впливу навмисних завад і заснована на формалізованому описі процесів передавання та декодування типових даних; запропонована імітаційна модель ґрунтується на методах об'єднання компонентних кодів та має можливість у широких межах змінювати параметри кодів (поліноми, розмір кадру, типи перемешувачів, кількість

компонентних кодів, структури конкатенації кодів, кількість ітерацій декодування, алгоритми декодування й інші параметри) для отримання статистичних характеристик для вирішення задач аналізу та синтезу відомих та перспективних інформаційних технологій.

Практичне значення одержаних результатів. Наведені вище наукові результати у своїй сукупності утворюють нову інформаційну технологію забезпечення сталої достовірності інформації в безпроводових системах передачі даних в умовах апіорної невизначеності, яка представлена у вигляді алгоритмів збору, зберігання та оброблення кодованих даних у процесі багаторівневої адаптації каскадних кодових конструкцій та реалізована у схемних рішеннях у процесі створення приладів, систем та мереж, у тому числі військового призначення.

Особливу практичну цінність мають такі розроблені та апробовані схемні рішення та алгоритми:

1. Структурна схема інформаційної технології забезпечення сталої достовірності передачі інформації в умовах апіорної невизначеності за рахунок застосування багаторівневої адаптації каскадних кодових конструкцій.

2. Алгоритми адаптації структури конкатенації кодів.

3. Схема модифікованого декодера турбокоду з урахуванням зміни поліномів рекурсивних систематичних згорткових кодів турбокоду при гібридному автоматичному запиті повторної передачі.

4. Алгоритм визначення показника невизначеності оцінювання якості процесу декодування турбокодів.

5. Алгоритм вибору параметрів (розміру кадру, перемешувачів, ітерацій декодування) турбокоду.

6. Структурна схема декодера турбокоду з модулями розрахунку показника невизначеності та управління ітераціями декодування.

7. Структурна схема модифікованого декодера турбокоду з урахуванням апіорної інформації від додаткового кодування кожної ітерації багатоконпонентного турбокоду в кожному повному циклі декодування.

Результати дисертаційної роботи використані в ТОВ «Телекарт-Прилад» під час створення відомчих КХ-радіостанцій Р-1150 для військових формувань, ТОВ «РДЛ» у ході створення відомчих ІР-мереж для органів влади та місцевого самоврядування, в науково-дослідних роботах наукового центру зв'язку та інформатизації ВІТІ НТУУ «КПІ» (шифри «Сопка», «Вежа», «Простір»), у науково-дослідній роботі Чернігівського національного технологічного університету при створенні захищеної системи голосового конференц-зв'язку в ІР-мережах, а також результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі ВІТІ НТУУ «КПІ» під час підготовки навчально-методичних матеріалів з дисципліни «Технології забезпечення безпеки інформації в спеціальних інформаційних системах» та навчальному процесі Чернігівського національного технологічного університету у процесі підготовки навчально-методичних матеріалів з дисципліни «Телекомунікаційні системи і технології». Акти впровадження подані у додатку до дисертації.

Особистий внесок здобувача. Усі результати, які виносяться на захист, отримані автором особисто й опубліковані в одноосібно підготовлених працях [1–

12, 40, 41, 44–46, 48]. У роботах, написаних у співавторстві, автору належать постановка задач, вибір і обґрунтування їхнього розв'язання [15–20, 22, 24, 26–29, 31, 34–36, 38, 43, 47], а також математична модель декодування турбокодів за модифікованим алгоритмом Max Log Map [13, 39]; використання ітеративного декодування для оцінки дисперсії завад [14]; інформаційна технологія побудови системи з ортогонально-частотним мультиплексуванням OFDM з внутрібітовою псевдовипадковою перебудовою піднесучих частот, яка враховує вплив навмисних завад [21]; математичний апарат аналізу достовірності передачі інформації в системах з OFDM та внутрібітової перебудови піднесучих частот в умовах постановки оптимальних завад [23, 25]; модифікований метод декодування турбокодів [41]; алгоритм адаптивного управління і корекції параметрів турбокодів [42]; модель пристрою підвищення завадозахищеності систем з турбокодами при низьких значеннях відношення сигнал-шум у каналі [30]; модель пристрою перетворення логарифмічних відношень функцій правдоподібності в декодерах для прийняття рішення про прийнятий біт інформації [32]; модель пристрою ітеративної оцінки стану каналів зв'язку [33]; застосування модифікованих турбокодів для підвищення достовірності передачі інформації в системах захищеного голосового конференц-зв'язку в IP-мережах [37].

Апробація результатів роботи. Наукові результати й основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних конференціях, форумах, нарадах, засіданнях і семінарах, у тому числі на XIII Міжнародній науково-практичній конференції «Безпека інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах» (м. Київ, 2010); VIII, IX Міжнародних науково-практичних конференціях «Математичне та імітаційне моделювання систем» МОДС 2013, 2014 (м. Чернігів–Жукін, 2013, 2014 рр.); VI Міжнародній науково-технічній конференції «Комп'ютерні системи та мережні технології» (м. Київ, 2013); VIII Всеукраїнській науково-практичній заочній конференції «Наука України. Перспективи та потенціал» (м. Київ, 2013); Всеукраїнській науково-практичній конференції аспірантів, молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості» (м. Івано-Франківськ, 2013 р.); 3rd International Scientific Conference «Applied Sciences in Europe: tendencies of contemporary development» (Stuttgart, Germany, 2013); X mezinárodní vědecko-praktická konference «Efektivní nástroje moderních věd – 2014» (Praha, 2014); Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених і студентів (м. Чернігів, 2015).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи повно викладені в 48 публікаціях, що включають: 2 монографії, 24 наукові статті у фахових українських наукових журналах, серед яких 15 включені до міжнародних наукометричних баз та 10 одноосібних, 3 статті у зарубіжних фахових наукових журналах, серед яких 2 одноосібні, 5 патентів на корисну модель, 4 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір та 10 публікацій у збірниках матеріалів наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, списку використаних джерел із 258 найменувань та шести додатків. Повний обсяг дисертації становить 397 сторінок, у тому числі: 312 сторінок основного тексту, 110 рисунків, 13 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** аналізується стан проблеми, обґрунтовується актуальність теми дисертаційної роботи, формулюються мета та завдання дослідження, визначаються наукова новизна та практичне значення отриманих результатів.

Перший розділ присвячено аналізу наявної проблеми забезпечення сталої достовірності передачі інформації у безпроводових системах передачі даних.

Проведено аналіз напрямів розвитку та основних властивостей безпроводових систем передачі даних, аналіз сучасного стану та перспектив розвитку безпроводових мереж, описані принципи побудови систем передачі інформації по каналам з шумами та завадами, досліджено фактори, що призводять до невизначеностей при забезпеченні достовірності передачі інформації у безпроводових мережах, проведено аналіз методів забезпечення достовірності передачі інформації в безпроводових системах передачі даних.

Встановлено, що для забезпечення заданих показників достовірності передачі інформації використовуються методи завадостійкого кодування в поєднанні з технологіями модуляції, ортогонально-частотного мультиплексування OFDM, розширення спектра сигналу, Space Time Coding в поєднанні з технологіями багатоелементних антен MIMO й адаптивних антенних систем AAS, автоматичного запиту повторної передачі ARQ, одно- та дворівневого адаптивного управління. Дослідження відомих робіт показали, що в умовах передачі інформації в каналах з підвищеним рівнем шуму та завад найкращі характеристики забезпечуються за рахунок застосування турбокодів у поєднанні з кодами Ріда-Соломона. В той же час, використання таких кодів для забезпечення заданої достовірності інформації завдяки зміні швидкості кодування обраного корегувального коду призводить до зниження пропускної спроможності каналів передачі даних.

Враховуючи цей недолік, у роботі вводиться поняття сталої достовірності як властивості об'єкта зберігати в часі в установлених межах значення ймовірності помилки з дотриманням вимог щодо передачі даних без значного зниження пропускної спроможності.

Для оцінювання умов забезпечення сталої достовірності пропонується використовувати два критерії:

1. Середньоквадратичну величину відхилення (δ) значень ймовірності бітової помилки P_i від заданої величини $P_{\text{зад}}$

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_i (P_i - P_{\text{зад}})^2}{B}} \leq \delta_0, \quad (1)$$

де P_i – ймовірність бітової помилки у прийнятому i -му блоці, $i \in \overline{1, n}$, B – кількість переданих блоків, δ_0 – порогове значення.

2. Середньоквадратичне відхилення (σ) ймовірності бітової помилки P як випадкової величини

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i (P_i - \bar{P})^2}{B}} \leq \sigma_0, \quad (2)$$

де \bar{P} – оцінка математичного очікування ймовірності бітової помилки P , σ_0 – порогове значення.

У випадку невиконання жодної з умов (1), (2) пропонується застосовувати багаторівневе адаптивне управління структурою та параметрами каскадних кодів на основі турбокодів та кодів Ріда-Соломона, гібридний автоматичний запит на повторну передачу, методи підвищення достовірності передачі інформації, методи аналізу апріорної невизначеності для забезпечення сталої достовірності передачі інформації без значної втрати пропускнув спроможності каналів передачі даних за умов впливу потужних завад.

Крім того, для покращення коригувальної здатності турбокодів, які засновані на ймовірнісних алгоритмах декодування, виникає необхідність у додатковому врахуванні апріорної інформації та інформації щодо розкриття невизначеності декодування. Тому пропонується використовувати паралельно-послідовне каскадне кодування, для заданої швидкості кодування додатково змінювати розмір переданих блоків, типи перемешувачів, кількість ітерацій декодування, застосовувати гібридний запит на повторну передачу, за якого додатково змінюються поліноми компонентних кодів турбокоду, проводити аналіз невизначеності декодування прийнятої інформації при апріорній невизначеності щодо умов передачі даних для забезпечення сталої достовірності інформації без значної втрати пропускнув здатності.

Виходячи з проведеного аналізу, сформульовано наукову проблему, що підлягає вирішенню, та часткові задачі дослідження.

У **другому розділі** приводиться загальний опис розробленої інформаційної технології забезпечення сталої достовірності передачі інформації в умовах апріорної невизначеності за рахунок застосування багаторівневої адаптації каскадних кодових конструкцій.

Як зовнішній код використовується код Ріда-Соломона, а як внутрішній – багатокомпонентний турбокод. У кодері турбокоду використовуються рекурсивні систематичні згорткові коди, які виконують кодування інформаційної послідовності по діаграмі, структура якої залежить від поліноміальних генераторів. Декодування турбокодів відбувається ітеративно по ґратчастій діаграмі відповідного рекурсивного систематичного згорткового коду (РСЗК), при цьому для кожного біта обчислюється дійсне представлення «м'якого» рішення або логарифмічне відношення функцій правдоподібності (ЛВФП).

Схема гібридного автоматичного запиту повторної передачі (Hybrid Automatic Repeat reQuest – HARQ) використовується для формування сигналів HARQ і структурної адаптації кодера і декодера турбокоду безпроводової системи передачі інформації, за значенням яких при повторній передачі блока даних будуть змінюватись поліноми РСЗК, модифікуючи алгоритм декодування турбокодів з обліком додаткової апріорної інформації для заданої швидкості кодування.

На рис. 1 представлена структурна схема технології забезпечення сталої достовірності передачі інформації в умовах апріорної невизначеності за рахунок застосування багаторівневої адаптації каскадних кодових конструкцій.

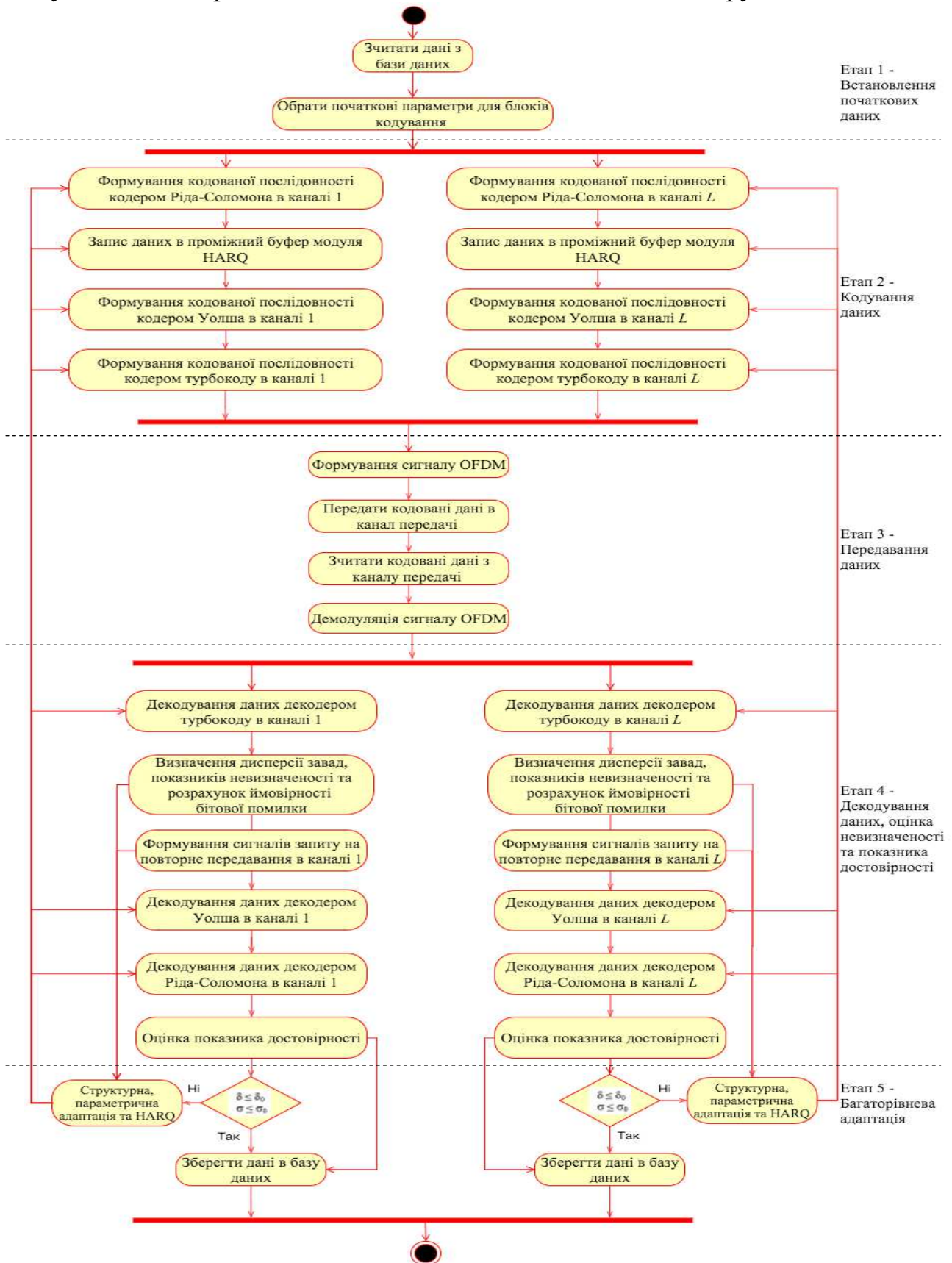


Рисунок 1 – Структурна схема технології забезпечення сталої достовірності передачі інформації в умовах апріорної невизначеності

Ця інформаційна технологія включає такі етапи:

1. Зчитування початкових даних із бази даних. На цьому етапі обираються початкові параметри модулятора OFDM та каскадних кодів.

2. Кодування даних. На цьому етапі дані перетворюються з послідовного вигляду в паралельний; у кожному сформованому каналі відбувається формування кодової послідовності кодером Ріда-Соломона; дані записуються у проміжний буфер модуля HARQ і поступають на кодер Уолша для формування кодової послідовності. Потім у кожному каналі відбувається формування кодової послідовності кодером турбокоду, і дані перетворюються з паралельного вигляду в послідовний.

3. Передавання даних. Відбувається формування сигналу OFDM, дані передаються в канал передачі, зчитуються з каналу передачі й відбувається демодуляція сигналу OFDM.

4. Декодування даних та оцінювання стану середовища передачі даних. На цьому етапі відбувається перетворення даних з послідовного вигляду в паралельний; у кожному сформованому каналі відбувається декодування даних декодером турбокоду; визначаються дисперсія завад, відношення сигнал-завада та показники невизначеності; розраховується ймовірність бітової помилки після декодера турбокоду. Для підвищення достовірності передачі інформації пропонуються удосконалені методи, в яких використовується апріорна інформація від додаткового кодування при кожній ітерації багатокomпонентного турбокоду, в яких використовуються ортогональні послідовності при створенні надлишковості у процесі формування адаптивних кодів з повтореннями, а також проводиться апроксимація логарифма Якобіана у процесі прийняття рішень про декодований біт в алгоритмі декодування турбокодів Log Map. У кожному каналі відбувається аналіз декодованих турбокодом даних, і ця інформація передається до модуля HARQ. Потім відбувається декодування даних декодером Уолша та Ріда-Соломона, проводиться розрахунок ймовірності бітової помилки декодера Ріда-Соломона, використовуючи значення ймовірності бітової помилки після декодера турбокоду.

5. Багаторівнева адаптація.

Спочатку, за результатами прийому B блоків у кожному паралельному каналі l , $l \in \overline{1, L}$, визначається структура конкатенації турбокодів та кодів Ріда-Соломона для кожного каналу БСПД. Середня ймовірність бітової помилки після декодера Ріда-Соломона $P_{l \text{ пом.}}(\vec{U}_l)$, яка враховує значення ймовірності бітової помилки декодування турбокодів, порівнюється з наперед заданим значенням $P_{\text{пом. зад.}}$:

$$\vec{U}_l^* = \arg\left(P_{l \text{ пом.}}(\vec{U}_l) \leq P_{\text{пом. зад.}}\right), \quad (3)$$

$$\Delta C \leq C_0,$$

де \vec{U}_l – вектор структури конкатенації турбокодів та кодів Ріда-Соломона, C_0 – задане допустиме зменшення пропускної спроможності.

Елементами вектора \overrightarrow{U}_l є: для турбокоду (внутрішнього коду) – швидкість кодування, яка залежить від структури компонентних кодів турбокоду, а для кодів Ріда-Соломона (зовнішнього коду) – довжина кодової комбінації, довжина інформаційної послідовності, виправна здатність коду, кількість біт у символі, швидкість кодування.

Якщо після першого етапу структурної адаптації не забезпечуються умови сталої достовірності за виразами (1) і (2), то відбуваються два кроки параметричної адаптації. На першому кроці здійснюється вибір параметрів турбокоду в кожному паралельному каналі l , $l \in \overline{1, L}$:

– розраховується середній показник невизначеності за результатами приймання B блоків даних

$$\tilde{R}(\mathbf{u}_l) = \sum_{i \in I} R_i(\mathbf{u}_l), \quad (4)$$

де \mathbf{u}_l – вектор параметрів турбокоду, $\mathbf{u}_l \in \mathbf{U}$ (тип перемешувача, кількість біт у переданому блоці, поліноми компонентних кодів турбокоду);

– для кожного з каналів розраховується значення відношення сигнал-завада Z_l , і за рішенням дискретної задачі оптимізації обираються параметри турбокоду:

$$\mathbf{u}_l^* = \min_{\mathbf{U}} f\left(\left|\tilde{R}(\mathbf{u}_l) - \tilde{R}_{\text{зад}}\right|, Z_l\right), \quad (5)$$

де $\tilde{R}_{\text{зад}}$ – задане значення показника невизначеності, $f(\cdot)$ – задається у вигляді наперед сформованої за допомогою моделювання таблиці, що зберігається у базі даних.

На другому кроці параметричної адаптації відбувається корекція кількості ітерацій декодування турбокоду залежно від результату порівняння значення показника невизначеності R_l , розрахованого на другому декодері j -ї ітерації декодування, $j \in \overline{1, I_{\text{зад}}}$, з наперед заданим значенням $R_{\text{зад}}$:

$$\overrightarrow{x}_l^{*} = \arg\left(R_l\left(\overrightarrow{x}_{0l} + \overrightarrow{x}_l^f + \overrightarrow{x}_l^{-}\right) \leq R_{\text{зад}}\right), \quad (6)$$

де \overrightarrow{x}_0 – вектор початкових значень параметрів турбокоду, \overrightarrow{x}^f – вектор фіксованих змін параметрів, \overrightarrow{x}^{-} – вектор компенсаційних змін кількості ітерацій декодування турбокоду.

Далі відбувається другий етап структурної адаптації. Якщо для ітерації $j = I_{\text{зад}}$, де $I_{\text{зад}}$ – задана кількість ітерацій декодування, показник невизначеності $R_l > R_{\text{зад}}$, то формується гібридний автоматичний запит на повторну передачу блока даних. Перед цим змінюються поліноми рекурсивних систематичних згорткових кодів турбокодів з метою підвищення їх коригувальних властивостей за рахунок збільшення кодового обмеження та модифікується алгоритм декодування турбокодів у частині використання введеної додаткової апріорної інформації щодо

функцій правдоподібності. Передача блоку даних повторюється доки помилка декодування не буде виправлена, але не більше наперед заданої кількості разів. Якщо після цього хоча б одна з умов сталої достовірності не забезпечується, то всі етапи адаптації повторюються.

На рис. 2 показано приклад функціонування інформаційної технології забезпечення сталої достовірності передачі інформації.

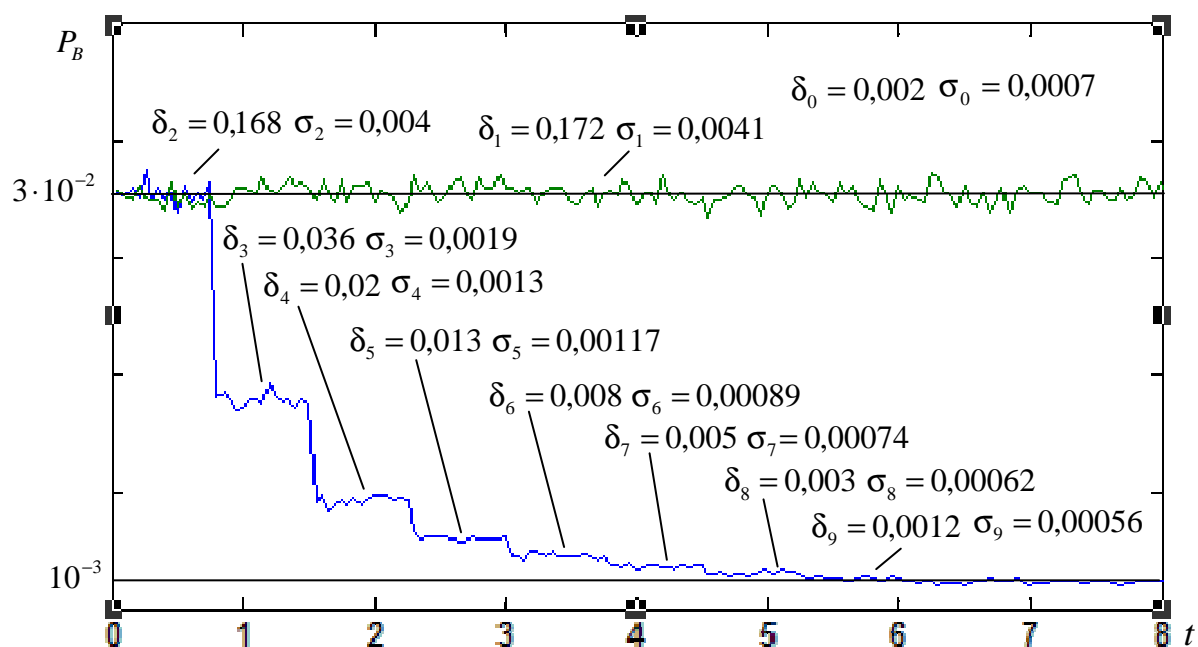


Рисунок 2 – Приклад функціонування інформаційної технології забезпечення сталої достовірності передачі інформації

Представлені результати отримані за допомогою проведення імітаційного моделювання. Під час моделювання передбачалось, що в каналі відношення енергії сигналу до спектральної щільності потужності завади дорівнює 0,8 дБ, а відношення енергії сигналу до спектральної щільності потужності шуму дорівнює 9,58 дБ. Використовувалось дев'ять різних кодових конструкцій з такими параметрами:

1. Узагальнений каскадний код (БЧХ ($n = 15, k = 11, t = 2$), Ріда-Соломона ($n = 63, k = 39, t = 12$), $R^* \approx 1/2$).

2. Турбокод ($N = 100$, регулярний перемежувач, алгоритм декодування Log Мар, $(1, 5/7)$, $I = 1..8$, $R = 1/2$).

3. Турбокод ($N = 100$, регулярний перемежувач, алгоритм декодування Log Мар, $(1, 5/7)$, $I = 1..15$, $R = 1/2$).

4. Турбокод ($N = 300$, регулярний перемежувач, алгоритм декодування Log Мар, $(1, 5/7)$, $I = 1..15$, $R = 1/2$).

5. Турбокод ($N = 500$, регулярний перемежувач, алгоритм декодування Log Мар, $(1, 5/7)$, $I = 1..15$, $R = 1/2$).

6. Турбокод ($N = 500$, регулярний перемежувач, алгоритм декодування Log Мар, $(1, 13/11)$, $I = 1..15$, $R = 1/2$).

7. Турбокод ($N = 1000$, псевдовипадковий перемежувач, алгоритм декодування Log Мар, $(1, 13/11)$, $I = 1..15$, $R = 1/2$).

8. Турбокод ($N = 1000$, псевдовипадковий перемешувач, алгоритм декодування Log Map, $(1, 25/21)$, $I = 1..10$, $R = 1/2$).

9. Турбокод ($N = 1000$, псевдовипадковий перемешувач, алгоритм декодування Log Map, $(1, 37/21)$, $I = 1..10$, $R = 1/2$).

Наведені результати свідчать, що за таких умов адаптивна зміна параметрів турбокоду при фіксованій швидкості кодування призводить до зменшення ймовірності бітової помилки без зниження пропускної спроможності. В то же час, для забезпечення ймовірності бітової помилки $P_B = 10^{-3}$ для узагальнених каскадних кодів такого результату можна досягти тільки за рахунок зменшення швидкості кодування до $R^* \approx 1/6$ (пропускна спроможність при цьому знижується на 66 %), а для турбокодів – до $R = 1/3$ (пропускна спроможність знижується на 34 %).

Таким чином, використання багаторівневої адаптації приводить до забезпечення стабільності достовірності з точністю до 0,056 %, а відхилення від заданого значення достовірності становить не більше 0,12 %. При цьому підвищення енергетичної ефективності становить 4,2 дБ.

У **третьому розділі** наведено метод структурної адаптації каскадних кодів та метод параметричної адаптації компонентних кодів турбокоду.

Метод структурної адаптації каскадних кодів призначений для забезпечення заданої достовірності передачі інформації БСПД при дії завад за рахунок динамічного синтезу комбінованих структур каскадних кодів.

Сутність методу полягає в застосуванні двоступеневої адаптації структури конкатенації кодів: на першому етапі відбувається визначення структури внутрішнього коду, а на другому, при автоматичному запиті на повторну передачу, – визначається структура компонентних кодів турбокоду.

Етап 1. Визначення структури внутрішнього коду.

1. Задаються початкові дані: види модуляції сигналу в субканалах сигналу OFDM, кількість субканалів сигналу OFDM, кількість каскадів кодування L , параметри внутрішніх кодів для кожного з l -го каскаду, $l \in \overline{1, L}$ (кількість біт у блоці N , вид перемешувача, швидкості кодування турбокоду R_{1l} , види утворюючих поліномів компонентних кодів турбокоду $(1, g_1/g_0, \dots, g_n/g_0)$, кількість компонентних кодерів (декодерів), метод декодування ТК (Map, Log Map, Max Log Map), кількість ітерацій декодування I), параметри зовнішнього коду для кожного з l -го каскаду, $l \in \overline{1, L}$ (кількість інформаційних біт у блоці k , загальна кількість біт у блоці n , виправна здатність коду $t = \left\lfloor \frac{n-k}{2} \right\rfloor$, кількість біт у символі m , швидкість кодування R_{2l}), ймовірність бітової помилки зовнішнього коду P_l , ймовірність бітової помилки допустима $P_{\text{пом. доп.}}$.

2. Приймаються такі обмеження: $R_{1l} \geq R_{1\text{доп.}}$, $R_{2l} \geq R_{2\text{доп.}}$, $L \leq L_{\text{доп.}}$, $k \in \overline{3, 11}$, $n \in \overline{7, 63}$, $m \in \overline{3, 7}$, $t \in \overline{1, 10}$.

3. Перевіряється виконання умови для кожного l -го, $l \in \overline{1, L}$ паралельного каскаду після прийому B блоків даних розміром N біт:

$$P_{l \text{ пом.}} = \frac{1}{2^m - 1} \sum_{j=i+1}^{2^m - 1} j \binom{2^m - 1}{j} p_l^j (1 - p_l)^{2^m - 1 - j} \leq P_{\text{пом. доп.}}, \quad (7)$$

де p_l – ймовірність бітової помилки декодування турбокодів l -го каскаду.

Якщо умова (7) для l -го каскаду не забезпечується, то відбувається зміна параметрів k , n , m зовнішнього коду Ріда-Соломона l -го каскаду кодування: $k = k + 1$, $n = n + 1$, $m = m + 1$. Це призводить до зміни швидкості кодування R_{2l} . Якщо при цьому виявиться, що $R_{2l} < R_{2 \text{ доп.}}$, то параметри кодів Ріда-Соломона встановлюються на початкові значення, вибирається нова швидкість кодування турбокоду R_{1l} із наперед заданої множини значень. Далі відбувається відповідна зміна структури компонентних кодів турбокоду.

У таблиці 1 показані, як приклад, параметри кодів Ріда-Соломона для l -го каналу, які були отримані за цим методом.

Таблиця 1 – Параметри кодів Ріда-Соломона

p_l	$P_{l \text{ пом.}}$	m	t	k	n
10^{-2}	10^{-3}	3	1	5	7
	10^{-4}	3	2	3	7
	10^{-5}	4	3	9	15
	10^{-6}	4	4	7	15

Для перевірки ефективності першого етапу визначення структури конкатенації кодів проведено імітаційне моделювання БСПД з використанням імітаційної моделі. Отримані характеристики залежності ймовірності бітової помилки від відношення сигнал-завада наведені на рис. 3.

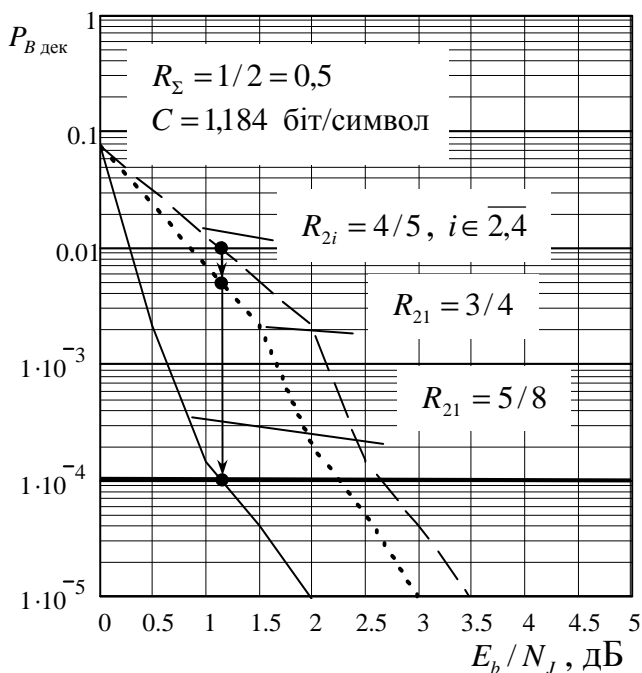


Рисунок 3 – Графік залежності ймовірності бітової помилки від відношення сигнал-завада

При моделюванні використовувався сигнал OFDM-2048, кількість паралельних каскадів кодування $L = 4$, внутрішні турбокоди ($N = 6144$, псевдовипадковий перемежувач, $R_{1l} = 4/5$, $R_{1l \text{ доп.}} = 1/2$, поліноми (1, 13/11), два компонентних кодера (декодера), метод декодування Log Map, кількість ітерацій декодування $I = 8$), аналогічні тим, які використовуються в системі 4G LTE-Advanced, та зовнішні коди Ріда-Соломона ($k \in \overline{3,11}$, $n \in \overline{7,63}$, $m \in \overline{3,7}$, $t \in \overline{1,10}$, $R_{2l} = 4/5$, $R_{2l \text{ доп.}} = 1/2$). Відношення сигнал-шум прийнято 9,58 дБ. У полосі частот, яка відповідає першому каскаду кодування, діє шумова завада в частині смуги (коефіцієнт перекриття $\gamma = 0,25$), при якій ймовірність бітової помилки декодування дорівнює $P_{l \text{ пом.}} = 10^{-2}$ для відношення сигнал-завада $E_b / N_J = 1,15$ дБ.

У другому, третьому і четвертому каскадах навмисні завади відсутні – $P_{2\text{ пом.}} = P_{3\text{ пом.}} = P_{4\text{ пом.}} = 10^{-4}$.

Ймовірність бітової помилки, при зменшенні значення якої відбувається зміна швидкості кодування кожного каналу кодування, дорівнює $P_{\text{пом. доп.}} = 10^{-4}$. Таким чином, у першому каналі буде змінюватися швидкість кодування каскадного коду, а швидкості кодування в другому, третьому та четвертому каналах залишаться незмінними, тобто $R_{2i} = 3/4$, $i \in \overline{2,4}$.

Швидкість кодування зовнішнього коду першого каскаду змінюється з $R_{21} = 4/5$ (сумарна швидкість кодування становить $R_{\Sigma} = 16/25$) на $R_{21} = 3/4$ ($R_{\Sigma} = 3/5$), а потім на $R_{21} = 5/8$ ($R_{\Sigma} = 1/2$). При цьому пропускна здатність зменшується з $C = 1,279$ біт/символ до $C = 1,184$ біт/символ. Результати моделювання свідчать, що в подібній ситуації в системі 4G LTE-Advanced швидкість кодування турбокоду змінилась би з $R = 2/3$ на $R = 4/9$, а пропускна здатність зменшилась би з $C = 1,332$ біт/символ до $C = 0,888$ біт/символ.

Отже, використання запропонованої схеми структурної адаптації каскадних кодів приводить до забезпечення заданої достовірності передачі інформації, при цьому пропускна спроможність БСПД зменшується на 4–12 % проти 20–35 % у системі 4G LTE-Advanced.

Етап 2. Визначення структури компонентних кодів турбокоду.

На цьому етапі визначаються структури компонентних кодів турбокоду при формуванні запиту повторної передачі за умов апіорної невизначеності.

Під час здійснення запиту повторної передачі змінюються поліноми РСЗК, формується відповідна гратчаста діаграма станів, модифікується алгоритм декодування в частині використання введеної додаткової апіорної інформації, розраховуються відповідні рекурсії і функції правдоподібності.

Як приклад, на рисунках 4 та 5 показані схеми РСЗК при різних значеннях поліномів і кодових обмежень K , які обираються на цьому етапі під час формування запиту на повторну передачу. Структура РСЗК визначає гратчасту діаграму станів та має вигляд: $(1, g_1/g_0)$, де g_0 – поліном зворотного зв'язку, а g_1 – поліном прямого зв'язку. У момент часу t на вхід РСЗК надходить інформаційний біт u_t , $t \in \overline{1, N}$ блока розміру N . РСЗК турбокоду залежно від значення вхідного біта формує систематичний (c_t^C) і перевірючий (c_t^P) біти, $t \in \overline{1, N}$, $c_t^C, c_t^P \in (0,1)$.

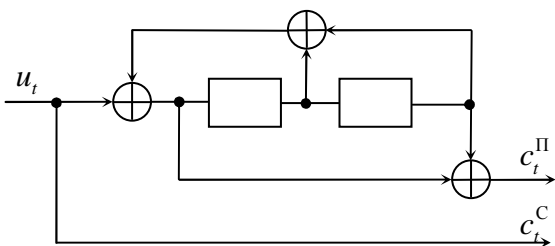


Рисунок 4 – РСЗК (1, 5/7), $K = 3$

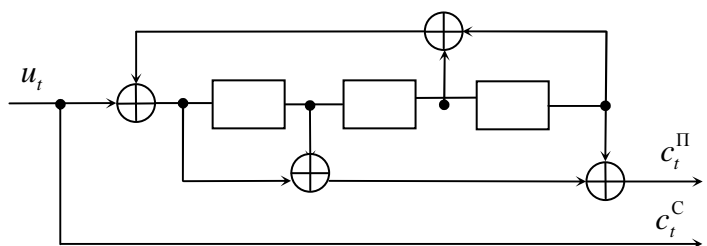


Рисунок 5 – РСЗК (1, 13/11), $K = 4$

У результаті турбокодування кожному систематичному біту c_i^c будуть відповідати два перевірочних біти $c_i^{\Pi_1}, c_i^{\Pi_2}$, які потім перетворюються в символи $x_i^c, x_i^{\Pi_1}, x_i^{\Pi_2} \in (-1,1)$.

У каналі зв'язку на передані символи впливають шуми і навмисні завади, які можуть бути представлені як обмежений по смузі частот адитивний білий гауссівський шум.

Декодування відбувається по двох напрямках. Першим розглядається РСЗК (1,5/7) із чотирма станами: у прямому напрямку (від початку блока до кінця) для кожного стану турбокоду обчислюються прямі ($\tilde{\alpha}_i(0), \tilde{\alpha}_i(1), \tilde{\alpha}_i(2), \tilde{\alpha}_i(3)$) та перехідні рекурсії ($\gamma_i(0,0), \gamma_i(0,2), \gamma_i(1,0), \gamma_i(1,2), \gamma_i(2,1), \gamma_i(2,3), \gamma_i(3,1), \gamma_i(3,3)$), у зворотному напрямку (з кінця блока до початку) відбувається розрахунок зворотних рекурсій ($\tilde{\beta}_i(0), \tilde{\beta}_i(1), \tilde{\beta}_i(2), \tilde{\beta}_i(3)$), використовуючи перехідні рекурсії, отримані на прямому напрямку обчислень. На основі цих обчислень розраховуються логарифмічні відношення функцій правдоподібності про кожен прийнятий біт.

Процес структурної адаптації кодера і декодера турбокоду для формування запиту повторної передачі в умовах невизначеності може бути представлений у вигляді алгоритму 1.

Алгоритм 1 (розглядається i -й декодер j -ї ітерації декодування).

Крок 1. Задаються початкові дані:

– кількість автоматичних запитів повторної передачі $H, h \in \overline{1, H}$ – поточний індекс, $h = 1$;

– параметри кодера турбокоду $\{I, N, P, K, \vec{G}, R\}$, де I – загальна кількість ітерацій декодування турбокоду, N – розмір блока даних у бітах, P – вид перемешувача, K – кількість компонентних кодерів (декодерів), $\vec{G}^H = (g_1^0, g_0^0, g_1^1, g_0^1, \dots, g_1^H, g_0^H)$ – вектор поліномів кодера турбокоду, які будуть вибиратися при наступних запитах повторної передачі, R – швидкість кодування турбокоду.

Крок 2. Після прийому блоку даних відбувається розрахунок ЛВФП біта даних $x_t, t \in \overline{1, N}$ для всіх біт блока довжиною N , декодера 1 та 2, ітерацій декодування $j \in \overline{1, I}$:

$$L^{i,j,h}(x_t) = \log \frac{\sum_{\substack{(s',s) \\ u_t=1}} \tilde{\alpha}_{t-1}^{(i)}(s') \cdot \tilde{\beta}_t^{(i)}(s) \cdot \gamma_t^{(i)}(s',s)}{\sum_{\substack{(s',s) \\ u_t=0}} \tilde{\alpha}_{t-1}^{(i)}(s') \cdot \tilde{\beta}_t^{(i)}(s) \cdot \gamma_t^{(i)}(s',s)} = L_c^{i,j,h}(y_t) + L_a^{i,j,h}(x_t) + L_e^{i,j,h}(x_t),$$

де $L_c^{i,j,h}(y_t)$ – параметр каналної «надійності», $L_a^{i,j,h}(x_t)$ – ЛВФП з попереднього декодера (апріорна інформація), $L_e^{i,j,h}(x_t)$ – зовнішнє ЛВФП поточного декодера (апостеріорна інформація поточного декодера).

Крок 3. Розрахунок апостеріорної інформації поточного декодера біта даних $x_t, t \in \overline{1, N}$ для всіх біт блока довжиною N , декодера 1 та 2, ітерацій декодування $j \in \overline{1, I}$:

$$L_e^{i,j,h}(x_t) = L^{i,j,h}(x_t) - L_c^{i,j,h}(y_t) - L_a^{i,j,h}(x_t).$$

Крок 4. Після завершення всіх ітерацій декодування виносяться «жорсткі» оцінки про декодовані біти. Якщо $h = H$, то здійснюється перехід до кроку 10.

Крок 5. Контроль наявності помилок у прийнятому блоці за зміною знаків апіорної та апостеріорної інформації останньої ітерації декодера турбокоду. Якщо існують помилки у прийнятому блоці довжиною N , то формується сигнал HARQ, що передається на кодер та декодер, і здійснюється перехід до кроку 6. Якщо помилок немає – перехід до кроку 10.

Крок 6. Формування вектора нових поліномів РСЗК $\vec{G}^h = (g_1^h, g_0^h)$ і зміна структури декодера відповідно до зміни ґратчастої діаграми РСЗК.

Крок 7. Після прийому наступного блока даних здійснюється розрахунок ЛВФП біта даних x_t , $t \in \overline{1, N}$ для всіх біт блока довжиною N , декодера 1 і 2, ітерацій декодування $j \in \overline{1, I}$ з урахуванням зміни структури декодера залежно від обраних поліномів $\vec{G}^h = (g_1^h, g_0^h)$ і додаткової апіорної інформації:

$$L^{i,j,h}(x_t) = L_c^{i,j,h}(y_t^{C,h}) + L_a^{i,j,h}(x_t^{C,h}) + L_a^{i,j,h-1}(x_t^{C,h-1}) + L_e^{i,j,h}(x_t^{C,h}).$$

Додаткова апіорна інформація враховує результати декодування біта даних x_t , $t \in \overline{1, N}$ попереднього запиту $h-1$, отриману з використання діаграми станів, що описується поліномами $\vec{G}^{h-1} = (g_1^{h-1}, g_0^{h-1})$.

Крок 8. Розрахунок зовнішньої апостеріорної інформації поточного декодера біта даних x_t , $t \in \overline{1, N}$ декодера 1 та 2, ітерацій декодування $j \in \overline{1, I}$ з урахуванням зміни структури декодера залежно від обраних поліномів $\vec{G}^h = (g_1^h, g_0^h)$ і додаткової апіорної інформації:

$$L_e^{i,j,h}(x_t^{C,h}) = L^{i,j,h}(x_t^{C,h}) - L_c^{i,j,h}(y_t^{C,h}) - L_a^{i,j,h}(x_t^{C,h}) - L_a^{i,j,h-1}(x_t^{C,h-1}).$$

Крок 9. Параметр автоматичних запитів повторної передачі $h = h + 1$. Якщо $h < H$, то здійснюється перехід до кроку 5, інакше – до кроку 4.

Крок 10. Передавання декодованого блока одержувачеві даних.

Для оцінювання ефективності структурної адаптації кодера і декодера турбокоду під час формування запиту повторної передачі в умовах невизначеності проведено імітаційне моделювання з використанням імітаційної моделі. У процесі моделювання використовувався сигнал OFDM-2048, турбокод з кількістю біт у блоці $N = 6144$, псевдовипадковим перемешувачем, $R = 1/3$, двома компонентними кодерами (декодера), методом декодування Log Map, кількістю ітерацій декодування $I = 8$. На рис. 6 показано отриманий у результаті імітаційного моделювання графік залежності середньої ймовірності бітової помилки декодування $P_{B \text{ дек}}$ від відношення сигнал-завада E_b/N_f ($\gamma = 0,95$). Відношення сигнал-шум прийнято 9,58 дБ. Наведений результат свідчить, що зміна структури компонентних

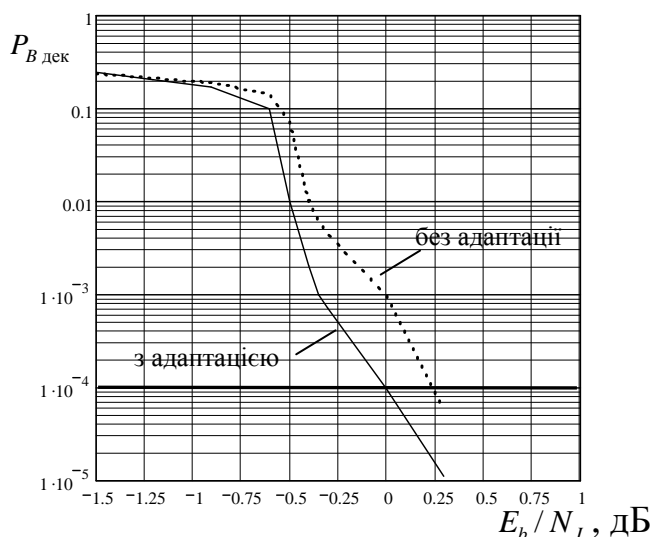


Рисунок 6 – Графік залежності $P_{B \text{ дек}}$ від E_b / N_j (використовувались поліноми (1, 39/33), (1, 47/43), (1, 57/53))

використанні двоступеневої параметричної адаптації: на першому етапі в динаміці визначаються розмір кадру, тип перемежувача та поліноми РСЗК, а на другому – кількість ітерації декодування.

Запропоновано введення показника невизначеності для декодера d , $d \in \overline{1,2}$, ітерації декодування j , $j \in \overline{1,I}$, який обчислюється за допомогою такої процедури:

$$\sum_{d=1}^2 R^{d,j}(t+1) = R^{d,j}(t) + 1,$$

якщо $\text{sign}(L_a^{d,j}(x_t^C)) \neq \text{sign}(L_e^{d,j}(x_t^C))$, $t \in \overline{1,N}$.

Етап 1. Алгоритм реалізації адаптивної зміни розміру кадру, типу перемежувача та поліномів РСЗК турбокоду.

Крок 1. Формування матриці LA розміру $1 \times N$ апіорних значень ЛВФП за результатами декодування для всіх декодерів d , $d \in \overline{1,2}$ всіх ітерацій декодування j , $j \in \overline{1,I}$: $LA = [L_a^{d,j}(x_1^C) \ L_a^{d,j}(x_2^C) \ \dots \ L_a^{d,j}(x_N^C)]$.

Крок 2. Розрахунок ЛВФП біт даних x_t , $t \in \overline{1,N}$ для всіх біт блока довжиною N , декодерів d , $d \in \overline{1,2}$ ітерацій декодування j , $j \in \overline{1,I}$.

Крок 3. Формування матриці LE розміру $1 \times N$ значень апостеріорних ЛВФП про передані біти x_t , $t \in \overline{1,N}$ для декодерів d , $d \in \overline{1,2}$ ітерацій декодування j , $j \in \overline{1,I}$: $LE = [L_e^{d,j}(x_1^C) \ L_e^{d,j}(x_2^C) \ \dots \ L_e^{d,j}(x_N^C)]$.

Крок 4. Формування матриці L^* розміру $1 \times N$ для декодерів d , $d \in \overline{1,2}$ ітерацій декодування j , $j \in \overline{1,I}$: $L^* = [L_a^{d,j}(x_1^C)L_e^{d,j}(x_1^C) \ L_a^{d,j}(x_2^C)L_e^{d,j}(x_2^C) \ \dots \ L_a^{d,j}(x_N^C)L_e^{d,j}(x_N^C)]$.

Крок 5. Виконання циклу: якщо $\text{sign}(L_a^{d,j}(x_t^C)) \neq \text{sign}(L_e^{d,j}(x_t^C))$, то $R^{d,j}(i+1) = R^{d,j}(i) + 1$, $R_\Sigma = \sum_{j=1}^I \sum_{d=1}^2 R^{d,j}$, $t \in \overline{1,N}$ для всіх біт блока довжиною N , декодерів d ,

кодів турбокоду при гібридному автоматичному запиті повторної передачі призводить до одержання енергетичного виграшу 0,3–0,7 дБ, забезпечуючи задану ймовірність бітової помилки без втрати пропускної спроможності у порівнянні з відомими результатами.

Метод параметричної адаптації компонентних кодів турбокоду призначений для забезпечення сталої достовірності передачі інформації БСПД при дії завад за рахунок адаптивного визначення розміру кадру, типу перемежувача, поліномів РСЗК та кількості ітерацій декодування турбокоду з урахуванням показника невизначеності.

Сутність методу полягає в

$d \in \overline{1,2}$, ітерацій декодування j , $j \in \overline{1,I}$. Якщо умова не виконується, то $R^{d,j}(i+1) = R^{d,j}(i)$.

Крок 6. Розрахунок середнього показника невизначеності за результатами приймання B блоків даних: $\tilde{R} = \sum_{i \in 1}^B R_{\Sigma_i}$.

Крок 7. Розраховується значення відношення сигнал-завада Z_i і за рішенням дискретної задачі оптимізації (5) обираються параметри турбокоду (розмір кадру, тип перемежувача, поліноми РСЗК), які задається у вигляді наперед сформованої за допомогою моделювання таблиці, що зберігається у базі даних. Задані значення $\tilde{R}_{\text{зад}}$ отримуються за допомогою проведення статистичного імітаційного моделювання системи з турбокодами в умовах впливу флуктуаційного шуму та навмисних завад для заданих значень середньої ймовірності бітової помилки декодування $P_{B \text{ дек}}$.

Етап 2. Визначення ітерацій декодування при гібридному автоматичному запиті на повторну передачу.

На цьому етапі будемо використовувати послідовно два алгоритми: перший алгоритм – для розрахунку показника невизначеності, другий – для адаптивного регулювання ітерацій декодування.

Алгоритм 1.

Крок 1. Формування матриці L^* розміру $1 \times N$ значень добутку апіорних ЛВФП на апостеріорні ЛВФП про передані біти x_t , $t \in \overline{1,N}$ поточного декодера:

$$L^* = [L_a^{2,j}(x_1^C)L_e^{2,j}(x_1^C) \quad L_a^{2,j}(x_2^C)L_e^{2,j}(x_2^C) \quad \dots \quad L_a^{2,j}(x_N^C)L_e^{2,j}(x_N^C)].$$

Крок 2. Виконання циклу: якщо $\text{sign}(L_a^{2,j}(x_t^C)) \neq \text{sign}(L_e^{2,j}(x_t^C))$, то $R^{2,j} = R^{2,j} + 1$, $t \in \overline{1,N}$ для 2-го декодера j -ї ітерації декодування та всіх біт блоку довжиною N . Якщо умова не виконується, то $R^{2,j} = R^{2,j}$.

Алгоритм 2.

Крок 1. Ітерація декодування $j = 1$.

Крок 2. Виконання алгоритму 1 для одержання значень показника невизначеності.

Крок 3. Перевірка умови: $R^{2,j} > 0$? Якщо умова виконується, то здійснюється перехід до кроку 4, якщо ні – то до кроку 7.

Крок 4. Перевірка умови: $j < I_{\text{зад}}$? Результатом виконання умови є перехід до кроку 5, якщо умова не виконується, то здійснюється перехід до кроку 7.

Крок 5. Застосовується ще одна ітерація декодування: $j = j + 1$.

Крок 6. Здійснюється перехід до кроку 3.

Крок 7. Процес ітеративного декодування завершується, якщо кількість ітерацій декодування $I \leq I_{\text{зад}}$, де $I_{\text{зад}}$ – задана кількість ітерацій декодування.

Крок 8. Вносяться «тверді» рішення про декодовані біти.

На рис. 7 показано отриманий у результаті імітаційного моделювання графік залежності середньої ймовірності бітової помилки декодування $P_{B \text{ дек}}$ від відношення сигнал-завада E_b / N_J .

На рис. 7 крива, отримана при фіксованій кількості ітерацій декодування $I = 8$, відображає характеристики достовірності передачі інформації без використання запропонованого методу.

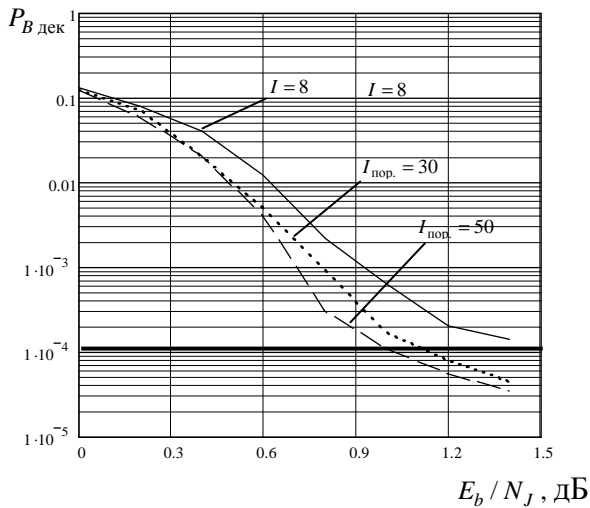


Рисунок 7 – Графік залежності $P_{B \text{ дек}}$ від E_b / N_J при корекції ітерацій декодування

Дві інші криві, отримані при адаптивному регулюванні ітерацій декодування від 1 до 30 і від 1 до 50 з використанням запропонованого показника невизначеності, показують забезпечення достовірності передачі інформації ($P_{B \text{ дек}} = 10^{-4}$) зі збільшенням ітерацій декодування. Таким чином, корекція ітерацій декодування турбокоду призводить до одержання енергетичного виграшу 0,1–0,3 дБ у порівнянні з відомими аналогами.

У четвертому розділі представлено удосконалений метод оцінювання достовірності інформації та удосконалений метод оцінювання дисперсії завад в адаптивному декодері турбокоду.

Удосконалений метод оцінювання достовірності інформації призначений для підвищення точності оцінювання достовірності інформації у процесах адаптації завадостійких кодерів у разі відсутності додаткового тестового каналу.

Сутність методу полягає у проведенні оцінювання каналу на основі формалізованого опису декодування турбокодів та використання для цього щільності розподілу нормалізованих значень кількості змін знаку апостеріорно-апріорних логарифмічних відношень функцій правдоподібності декодера турбокоду.

Етапи реалізації методу.

1. Формування матриці LA розміром $1 \times N$ значень апріорних ЛВФП для i -го декодера: $LA = [L_a^i(x_1^c) \quad L_a^i(x_2^c) \quad \dots \quad L_a^i(x_N^c)]$.

2. Формування матриці LE розміром $1 \times N$ значень апостеріорних ЛВФП поточного декодера біта даних x_t , $t \in \overline{1, N}$: $LE = [L_e^i(x_1^c) \quad L_e^i(x_2^c) \quad \dots \quad L_e^i(x_N^c)]$.

3. Формування матриці L^* розміром $1 \times N$ значень добутку апріорних ЛВФП на апостеріорні ЛВФП про передані біти даних x_t , $t \in \overline{1, N}$ для i -го декодера:

$$L^* = [L_a^i(x_1^c)L_e^i(x_1^c) \quad L_a^i(x_2^c)L_e^i(x_2^c) \quad \dots \quad L_a^i(x_N^c)L_e^i(x_N^c)].$$

4. Виконання циклу: якщо $L_a^i(x_k^c)L_e^i(x_k^c) < 0$, $k \in \overline{1, K}$, то $S_L = S_L + 1$, інакше – $S_L = S_L$, де K – кількість біт, для яких добутки апріорної інформації на апостеріорну менше нуля.

5. Нормалізація величини S_L : $S_L^* = \frac{S_L}{Nn}$, де N – кількість біт у блоці, n – кількість переданих блоків розміром N .

6. Розрахунок функції розподілу випадкової величини $L_e(x^c)$ (ймовірність попадання величини $L_e(x^c)$ в заданий інтервал) визначається через щільність розподілу $f(L_e(x^c))$ з використанням правила трьох сигм розсіювання значень випадкової величини відносно її математичного очікування:

$$F(L_e(x^c)) = P(-3\sigma_{L_e} < L_e(x^c) < 3\sigma_{L_e}) = \int_{-3\sigma_{L_e}}^{3\sigma_{L_e}} \frac{1}{\sigma_{L_e} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(L_e(x^c) - M_{L_e})^2}{2\sigma_{L_e}^2}} dL_e(x^c).$$

При імітаційному моделюванні застосовувався турбокод із двома компонентними кодерами, поліноміальними генераторами (1,7/5), псевдовипадковим перемежувачем (деперемежувачем), кількістю біт у переданому (прийнятому) блоці $N=1000$, алгоритмом декодування Мар, швидкістю кодування ТК $R = 1/3$, кількістю ітерацій декодування $I = 8$. Передбачалось, що передавання інформації в каналі здійснюється в умовах впливу білого гауссівського шуму зі спектральною щільністю потужності N_0 і шумовою завадою в частині смуги зі спектральною щільністю потужності N_j (коефіцієнтом перекриття завадою смуги спектра частот $\gamma = 0,95$) відношення сигнал-шум (ВСШ) при цьому дорівнює 0,3 дБ. У результаті проведених експериментів отримані залежності нормованого середнього значення кількості помилок $S_L^* = S_L / Nn$ від логарифмічного відношення функції правдоподібності $L_e(x^c)$, які наведені на рис. 8, 9. Розподіл значень помилок описується нормальним (гауссівським) законом розподілу випадкових величин.

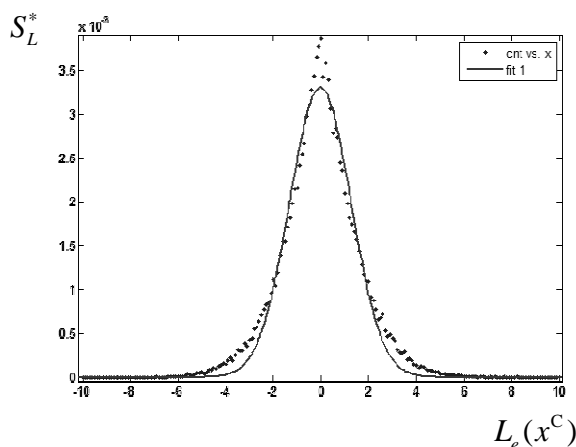


Рисунок 8 – Регресійний аналіз для області помилок (ітерація – 1, ВСШ – 0,3 дБ)

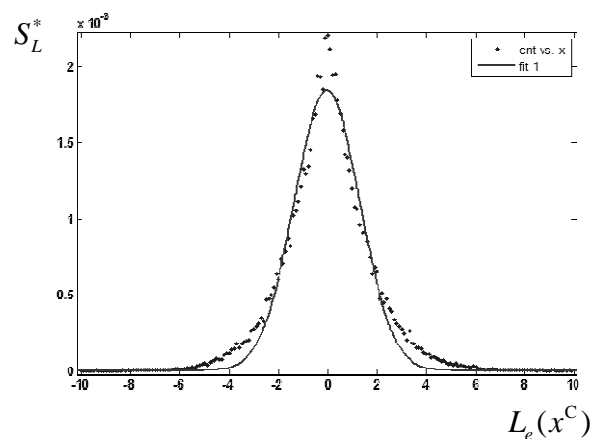


Рисунок 9 – Регресійний аналіз для області помилок (ітерація – 2, ВСШ – 0,3 дБ)

Таким чином, аналізуючи значення дисперсії ЛВФП про передані біти D_{L_e} , можна обчислювати значення коефіцієнтів функції нормального розподілу помилок

і розраховувати ймовірність бітрової помилки (або достовірність передачі інформації). Кількість блоків n для розрахунку математичного очікування і дисперсії обчислюються виходячи з необхідних значень довірчої ймовірності й довірчого інтервалу.

Оцінювання достовірності передачі інформації через розкриття внутрішньої структури декодування турбокодів, на відміну від відомих результатів, не вимагає застосування додаткового каналу для передачі тестової оціночної послідовності. При цьому підвищується точність оцінки достовірності, за якої пропускна спроможність знижується на 4–7 % проти 30–34 % відомих результатів.

Удосконалений метод оцінювання дисперсії завад в адаптивному декодері турбокоду призначений для зменшення апіорної невизначеності при розрахунку ЛВФП про передані біти даних у декодері турбокоду та підвищення достовірності передачі інформації на основі врахування функціональної залежності величини дисперсії від кількості компонентних кодерів багатоконponentного турбокоду.

Сутність методу полягає в обчисленні глибини згортки функцій правдоподібності про передані біти багатоконponentних турбокодів у частині підготовки початкових даних на підставі врахування функціональної залежності величини дисперсії від кількості компонентних кодерів турбокоду.

Особливістю декодування трикомponentного турбокоду, на відміну від двокомponentного, є те, що апіорна інформація для комponentного декодера формується як сума не двох, а трьох складових: каналного відліку систематичного біта, а також значень ЛВФП, отриманих двома попередніми комponentними декодерами. Відповідно, для чотирикомponentного турбокоду – апіорна інформація формується як сума чотирьох складових.

У цьому випадку при двокомponentному декодері дисперсія завад для n -ї ітерації декодування кожного каналу системи OFDM, з урахуванням обраного алгоритму декодування, буде визначатися таким чином (для n -ї ітерації декодування):

$$\hat{\sigma}_{n1}^2 = \frac{1}{N_1} \sum_{t=0}^{N_1-1} \left((L^{1,n}(x_{1t}^C) + L^{2,n}(x_{1t}^C)) - \hat{y}_{1t} \right)^2, \dots, \hat{\sigma}_{nv}^2 = \frac{1}{N_v} \sum_{t=0}^{N_v-1} \left((L^{1,n}(x_{vt}^C) + L^{2,n}(x_{vt}^C)) - \hat{y}_{vt} \right)^2.$$

При трикомponentному декодуванні:

$$\hat{\sigma}_{n1}^2 = \frac{1}{N_1} \sum_{t=0}^{N_1-1} \left((L^{1,n}(x_{1t}^C) + L^{2,n}(x_{1t}^C) + L^{3,n}(x_{1t}^C)) - \hat{y}_{1t} \right)^2, \dots, \hat{\sigma}_{nv}^2 = \frac{1}{N_v} \sum_{t=0}^{N_v-1} \left((L^{1,n}(x_{vt}^C) + L^{2,n}(x_{vt}^C) + L^{3,n}(x_{vt}^C)) - \hat{y}_{vt} \right)^2,$$

де \hat{y}_{1t} , \hat{y}_{vt} – оцінені передані символи для 1-ї ітерації декодування першого та v -го каналів відповідно; $\hat{y}_{1t} = 1$, якщо $L_c \cdot y_{1t}^C > 0$ і $\hat{y}_{1t} = -1$, якщо $L_c \cdot y_{1t}^C < 0$, відповідно $\hat{y}_{vt} = 1$, якщо $L_c \cdot y_{vt}^C > 0$ і $\hat{y}_{vt} = -1$, якщо $L_c \cdot y_{vt}^C < 0$.

Аналогічні залежності отримані для чотирикомponentного декодування.

Результати імітаційного моделювання показали, що використання чотирикомponentного турбокоду приводить до покращення точності визначення

дисперсії завад і, відповідно, відношення сигнал-шум. Наприклад, для 8-ї ітерації декодування при відношенні сигнал-завад, рівного 0 дБ: точність визначення відношення сигнал-завада підвищується на 0,15 дБ у порівнянні з використанням трикомпонентного турбокоду, на 0,3 дБ у порівнянні з використанням двокомпонентного турбокоду і на 1,3 дБ у порівнянні з методом, який не використовує ітеративне декодування.

У п'ятому розділі розроблено удосконалений метод прийняття рішень у процесі декодування турбокодів, удосконалений метод формування адаптивних кодів з повторенням та удосконалений Log Map метод декодування турбокодів.

Удосконалений метод прийняття рішень у процесі декодування турбокодів призначений для підвищення достовірності інформації в безпроводових системах передачі даних.

Сутність методу полягає у використанні апріорної інформації від додаткового кодування при кожній ітерації багатоконпонентного турбокоду.

Рішення про декодований переданий біт поточним декодером приймається за інформацією про стан каналу, прийняті інформаційні та перевірочні біти, а також за апріорною інформацією, яка отримується за результатами декодування попереднім декодером. Надійність прийняття рішення про декодований біт інформації можна підвищити за рахунок використання додаткової інформації під час розрахунку ЛВФП про переданий біт.

Пропонується використовувати під час розрахунку ЛВФП багатоконпонентного турбокоду наступної ітерації декодування інформацію, отриману за допомогою повторного кодування жорстких рішень з виходу кожного компонентного декодера ТК.

Отримані аналітичні залежності, які враховують отриману таким чином додаткову апріорну інформацію під час розрахунку ЛВФП кожного компонентного декодера ТК (для i -го декодера ітерації n).

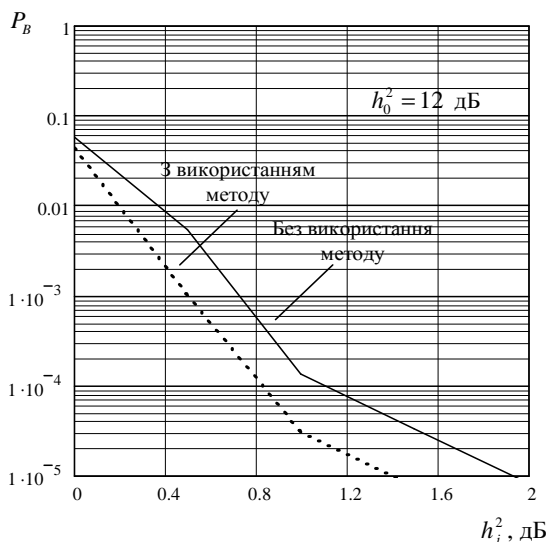


Рисунок 10 – Результати моделювання характеристик достовірності передачі інформації

На рис. 10 показано результати моделювання характеристик достовірності передачі інформації при впливі в каналі адитивного білого гауссівського шуму (відношення сигнал-шум $h_0^2 = E_b / N_0 = 12$ дБ) та навмисної широкополосної шумової завади (з різними значеннями відношення сигнал-завада $h_j^2 = E_b / N_j$) без використання та з використанням розробленого методу.

У процесі моделювання використовувався ТК з поліноміальними генераторами $g_0 = 7$, $g_1 = 5$, псевдовипадковим перемешувачем, швидкістю кодування $R = 1/3$, кількістю біт у блоці $N = 1000$, 8 ітераціями декодування, алгоритмом декодування Мар.

Результати моделювання свідчать, що додаткове використання перевірочних символів $x_t^{*Pi_j}$, $i \in (2, q)$, $t \in (1, N)$, які виробляються кодерами багатоконпонентного турбокоду на кожній ітерації декодування та передаються на декодери наступної ітерації під час розрахунку ЛВФП про передані біти, сприяють підвищенню достовірності передачі інформації за рахунок підвищення надійності прийняття рішень, при цьому кількість помилок зменшується в 4–6 разів.

Удосконалений метод формування адаптивних кодів з повторенням призначений для підвищення надійності прийняття рішень про декодовані біти, що приводить до підвищення достовірності передачі інформації.

Сутність методу полягає в удосконаленні процесу формування кодів з повторенням за рахунок використання ортогональних послідовностей з урахуванням їх кореляційних властивостей при створенні надлишковості в інформаційних даних.

Кожен L -й канал містить джерело інформації, приймач інформації, кодер Уолша, модифікований декодер Уолша, кодер турбокода, декодер турбокода, OFDM-модулятор (демодулятор).

Позначимо j -ю послідовність Уолша, $j \in \overline{1, N}$, як $\{W_j\}$, а її s -й символ, $s \in \overline{0, K-1}$, через $W_j(s)$.

Нехай $U = u_0, u_1, \dots, u_t, \dots, u_{N-1}$ – послідовність з виходу джерела інформації, тоді, використовуючи коди Уолша, для кожного символу u_t кодером Уолша будуть сформовані відповідні ортогональні набори:

$$u_t^* = u_t \cdot W_j(0), u_t \cdot W_j(1), \dots, u_t \cdot W_j(N-1) = u_{t0}, u_{t1}, \dots, u_{tK-1}.$$

Декодер буде розраховувати для кожного прийнятого набору їх ЛВФП, використовуючи апріорну інформацію з попередніх декодерів.

Модифікованим декодером Уолша буде прийматися рішення, використовуючи не «жорсткі» рішення, а ЛВФП останнього декодера ($L^{2,n}(x_{ts})$, $s \in \overline{0, K-1}$ – для двокомпонентного, $L^{3,n}(x_{ts})$, $s \in \overline{0, K-1}$ – для трикомпонентного). Наприклад, для трикомпонентного декодера:

$$L^3(x_t^C) = \sum_{s=0}^{K-1} L^3(x_{ts}^C) \cdot W_j(s),$$

$$\hat{x}_t^C = \begin{cases} 1, & \text{якщо } L^3(x_t^C) \geq 0 \\ 0, & \text{якщо } L^3(x_t^C) < 0 \end{cases}.$$

Проведено імітаційне моделювання характеристик достовірності передачі інформації при використанні турбокоду з $N = 1000$, швидкістю кодування $R = 1/3$, псевдовипадковим перемежувачем з використанням послідовностей Уолша W^N , $N = 1$, $N = 2$, $N = 4$ та модифікованого декодера Уолша. Аналіз залежності свідчить, що збільшення порядку матриці Адамара приводить до зменшення ймовірності бітової помилки декодування, тобто до підвищення достовірності передачі інформації в каналі. Так, при відношенні сигнал-завада в каналі 1,4 дБ зі

збільшенням порядку матриці Адамара з $N=1$ до $N=4$ ймовірність бітової помилки декодування зменшується з $P_B = 7 \times 10^{-4}$ до $P_B = 10^{-4}$. Виграш у заводозахищеності становить від 0,1 до 0,5 дБ.

Удосконалений Log Map метод декодування турбокодів призначений для підвищення достовірності передачі інформації за рахунок модифікації алгоритму декодування турбокодів Log Map.

Сутність методу полягає в удосконаленні процесу прийняття рішень про декодований біт із застосуванням гібридної і лінійної апроксимації логарифма Якобіана з урахуванням під час розрахунку параметра каналної «надійності» параметрів навмисних завод.

Запропоновані нові схеми гібридної:

$$f^*(\Delta) = \begin{cases} 0,6512 - 0,3251\Delta, & \Delta < 1,5 \\ 0,1635 / 2^{\lfloor 0,5\Delta \rfloor}, & 1,5 \leq \Delta < 2,5 \\ 0,1635 / 2^{(\lfloor 0,5\Delta \rfloor + \lceil 0,5\Delta \rceil) / 2}, & 2,5 \leq \Delta < 3 \\ 0,1635 / 2^{\lceil 0,5\Delta \rceil}, & \Delta \geq 3 \end{cases}$$

а також лінійної апроксимації логарифма Якобіана:

$$f^*(\Delta) = \begin{cases} 0,6588 - 0,3358\Delta, & \Delta < 1,5 \\ 0,3418 - 0,1037\Delta, & 1,5 \leq \Delta < 2,5, \\ 0,07767 - 0,01373\Delta, & \Delta \geq 3 \end{cases}$$

При цьому $\ln\left(\sum_{i=1}^n e^{a_i}\right) \approx \max_{i=1..n} a_i$, і, наприклад, для $i=2$ параметр $\Delta = |a_1 - a_2|$.

Одним з параметрів, який враховує аргумент Δ функції $f^*(\Delta)$, є параметр каналної «надійності» L_c , який враховується в алгоритмах декодування турбокодів та відображає поточний стан каналу передачі інформації. Стан каналу характеризується значеннями спектральних щільностей потужності шуму, навмисних завод, а також параметром γ перекриття заводою смуги частот, де присутній сигнал, або ширини тривалості корисного сигналу.

Одержано аналітичні залежності для розрахунку каналної «надійності» L_{cv} для K -х каскадів кодування, які враховують параметри навмисних завод. Наприклад, формула для визначення параметра каналної «надійності» при впливі шумової заводи в частині смуги буде мати такий вигляд:

$$L_{c1} = \frac{4 \cdot E_{b1} \cdot R_1 \cdot \log_2 M_1}{G_{01} + z \cdot G_{j1} / \gamma_1}, \dots, L_{cK} = \frac{4 \cdot E_{bK} \cdot R_K \cdot \log_2 M_K}{G_{0K} + z \cdot G_{jK} / \gamma_K},$$

де E_b – енергія біта, R – швидкість кодування, $M = 2^k$ – розмір множини сигналів, де k – кількість біт, які передаються одним символом, G_0 – спектральна щільність потужності флуктуаційного шуму, G_j – спектральна щільність потужності навмисної завади, z – випадкова змінна, яка визначає стан шумової завади в частині смуги: якщо $P(z = 1) = \gamma$, то завада присутня, і $P(z = 0) = 1 - \gamma$, – завада відсутня.

Результати проведеного імітаційного моделювання показали, що врахування параметрів навмисних завад та гібридної чи лінійної апроксимації логарифма Якобіана при декодуванні турбокодів дозволить підвищити характеристики достовірності передачі інформації, при цьому можна отримати енергетичний вигравш до 0,3 дБ та зменшити кількість помилок у прийнятій інформаційній послідовності за умов впливу навмисних завад у 2–10 разів.

У шостому розділі описано розроблену імітаційну модель процесу функціонування безпроводової системи передачі даних, яка включає векторну модель дискретно-неперервного каналу зв'язку (ДНКЗ) з урахуванням впливу навмисних завад. Запропонована імітаційна модель враховує методи та способи об'єднання компонентних кодів, властивості середовища поширення та має можливість у широких межах змінювати параметри кодів (поліноми, розмір кадру, типи перемежувачів, кількість компонентних кодів, структури конкатенації кодів, кількість ітерацій декодування, алгоритми декодування й інші параметри) для отримання статистичних характеристик з метою вдосконалення наявних та перспективних інформаційних технологій.

Використовуючи ортогональне представлення сигналів, процесів шуму та навмисних завад, отримані векторні моделі дискретно-неперервного каналу з сигналами OFDM, шумом та навмисними завадами.

У випадку застосування постановником завад навмисної завади з шириною смуги частот, яка відповідає k -му субканалу сигналу OFDM, на виході OFDM-демодулятора з ймовірністю $P = \gamma^{(k)}$ OFDM сигнал буде мати такий вигляд: $\mathbf{Y} = \mathbf{X} + \mathbf{N} + \mathbf{J}$. З ймовірністю $P = 1 - \gamma^{(k)}$ OFDM-сигнал на виході OFDM-демодулятора буде представлений таким чином: $\mathbf{Y} = \mathbf{X} + \mathbf{N}$.

Для випадку, коли застосовуються п'ять станцій завад: перша станція впливає на субканали сигналу OFDM з другого по п'ятий, друга та третя – на шостий субканал, четверта – на субканали з восьмого по десятий (усього субканалів – 16), матриця завад буде мати такий вигляд (для двовимірного евклідового простору):

$$\mathbf{J}^T = \begin{bmatrix} 0 & j_{21}^{(1)} & j_{31}^{(1)} & j_{41}^{(1)} & j_{51}^{(1)} & j_{61}^{(2)} + j_{61}^{(3)} & 0 & j_{81}^{(4)} & j_{91}^{(4)} & j_{101}^{(4)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & j_{22}^{(1)} & j_{32}^{(1)} & j_{42}^{(1)} & j_{52}^{(1)} & j_{62}^{(2)} + j_{62}^{(3)} & 0 & j_{82}^{(4)} & j_{92}^{(4)} & j_{102}^{(4)} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}.$$

Структурна схема запропонованої імітаційної моделі, яка призначена для розрахунку ймовірності бітової помилки з використанням та без використання запропонованих результатів, показана на рис. 11.

Адекватність імітаційної моделі була підтверджена порівнянням результатів з використанням F -критерію Фішера, які отримані за допомогою розробленої моделі, і результатів, отриманих за допомогою натурних експериментів та відомої

аналогічної імітаційної моделі. Як подібна імітаційна модель була обрана імітаційна модель системи UMTS стандарту 25.212, що представлена групою Iterative Solutions. Натурний експеримент проводився з використанням двох комплектів КХ-радіостанцій P-1150 виробництва компанії «Телекарт-Прилад», розміщених на відстані 500 метрів одна від одної, та двох ноутбуків, підключених до радіостанцій за допомогою інтерфейсу RS-232, на яких була запущена імітаційна модель. Здійснено передавання та приймання кодованих даних, створюваних імітаційною моделлю, через інтерфейс RS-232. Для створення гауссівського шуму в ефірі використовувався генератор шуму Г2-57 з підсилювачем потужності. Для вимірювання рівнів сигналів та шумів у радіоефірі використовувався селективний мікровольтметр SMV-11 з комплектом антен.

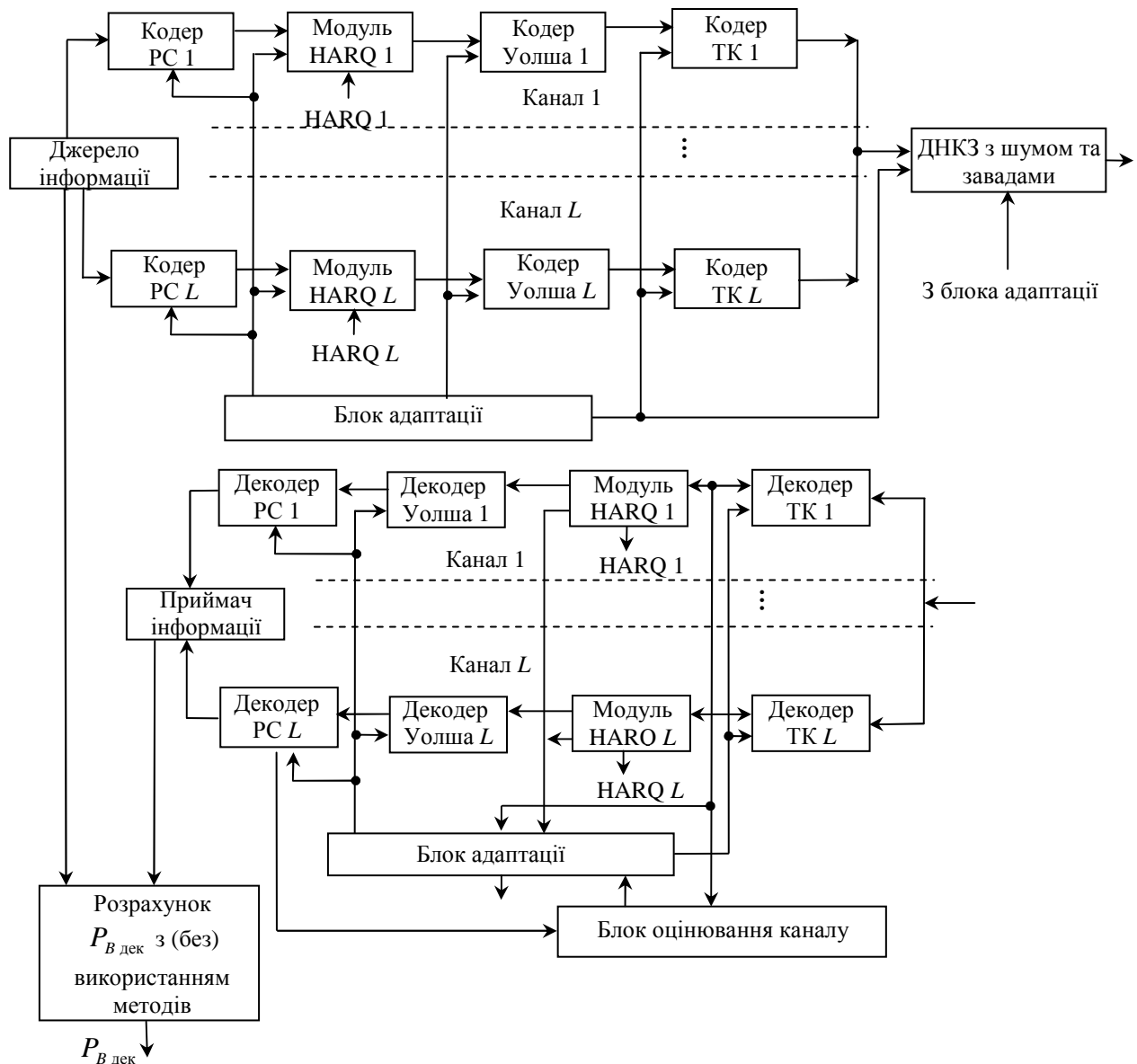


Рисунок 11 – Структурна схема імітаційної моделі процесу функціонування безпроводової системи передачі даних

Для оцінювання точності отриманих результатів була проведена необхідна кількість експериментів. Всі результати імітаційного моделювання отримані

виходячи з достовірності $\alpha=0,95$ ($t_a=1,95$), відносної точності $d=0,1$. Було розраховано, що для отримання значення ймовірності бітової помилки $P = 10^{-1}$ необхідно передати $3,422 \times 10^3$ біт, для $P = 10^{-2}$ – $3,764 \times 10^4$ біт, для $P = 10^{-3}$ – $3,799 \times 10^5$ біт, для $P = 10^{-4}$ – $3,802 \times 10^6$ біт та ін.

ВИСНОВКИ

У роботі сформульовано й вирішено актуальну науково-прикладну проблему, яка полягає у забезпеченні сталої достовірності інформації систем передачі даних в умовах апіорної невизначеності за рахунок розроблення моделей і методів, що використовують упорядковану послідовність процесів багаторівневої адаптації каскадних кодових конструкцій та додаткові показники розкриття невизначеності декодування. Запропоновані в дисертаційній роботі наукові результати у своїй сукупності утворюють нову інформаційну технологію забезпечення сталої достовірності інформації в безпроводових системах передачі даних в умовах апіорної невизначеності, яка представлена у вигляді алгоритмів збору, зберігання та оброблення кодованих даних у процесі багаторівневої адаптації каскадних кодових конструкцій.

При цьому були отримані такі наукові та практичні результати:

1. У роботі обґрунтована та запропонована концепція забезпечення сталої достовірності інформації, яка полягає у використанні упорядкованої послідовності процесів багаторівневої адаптації каскадних кодових конструкцій за заданими критеріями.

2. Для усунення апіорної невизначеності запропоновано використовувати показники невизначеності декодування при структурній та параметричній адаптації для забезпечення сталої достовірності.

3. Запропонована інформаційна технологія забезпечення сталої достовірності передачі інформації в умовах апіорної невизначеності, яка включає в себе сукупність нових критеріїв та методів, використовує вперше запропоновані та обґрунтовані критерії забезпечення сталої достовірності, показники невизначеності декодування та багаторівневу адаптацію каскадних кодових конструкцій.

Адаптивна зміна параметрів турбокоду при фіксованій швидкості кодування призводить до зниження ймовірності бітової помилки без зниження пропускної спроможності системи в порівнянні з узагальненими каскадними кодами та турбокодами при фіксованій швидкості кодування. Для забезпечення ймовірності бітової помилки $P_B = 10^{-3}$ для узагальнених каскадних кодів швидкість кодування необхідно зменшити до $R^* \approx 1/6$ (пропускна спроможність знижується на 66 %) і для турбокодів – до $R = 1/3$ (пропускна спроможність знижується на 34 %). Таким чином, використання багаторівневої адаптації приводить до забезпечення стабільності достовірності з точністю до 0,056 %, а відхилення від заданого значення достовірності становить не більше 0,12 %. При цьому підвищення енергетичної ефективності становить 4,2 дБ.

4. Розроблено двоступеневий метод структурної адаптації каскадних кодів для забезпечення сталої достовірності інформації: на першому етапі відбувається визначення структури внутрішнього коду, а на другому – з урахуванням показника невизначеності, обираються структури компонентних кодів.

Комбінована структура побудови каскадних кодів разом з технологією OFDM дозволяє незалежно адаптувати швидкість кодування кожного з каскадів кодування залежно від результатів аналізу достовірності інформації в цьому каскаді, що приводить до забезпечення заданої достовірності передачі інформації, при цьому пропускна спроможність БСПД зменшується на 4–12 % проти 20–35 % відомих результатів. Зміна структури компонентних кодів турбокоду при гібридному автоматичному запиті повторної передачі призводить до одержання енергетичного виграшу 0,3–0,7 дБ, забезпечуючи задану ймовірність бітової помилки без втрати пропускної спроможності у порівнянні з відомими результатами.

5. Запропоновано метод параметричної адаптації компонентних кодів турбокоду, який призначений для забезпечення сталої достовірності інформації за рахунок адаптивного визначення розміру кадру, типу перемежувача, поліномів компонентних кодів та кількості ітерацій декодування турбокоду з урахуванням показника невизначеності.

Застосування методу при апріорній невизначеності за рахунок зміни розміру кадру, типу перемежувача, поліномів РСЗК дозволяє отримати енергетичний виграш 3,7 дБ без збільшення швидкості кодування в умовах забезпечення сталої достовірності. Для підвищення достовірності передачі інформації відбувається корекція ітерацій декодування турбокоду, що призводить до одержання енергетичного виграшу 0,1–0,3 дБ у порівнянні з відомими аналогами.

6. Удосконалення методу оцінювання достовірності інформації з урахуванням розкриття внутрішньої структури декодування турбокодів та використання щільності розподілу нормалізованих значень кількості змін знаку апостеріорно-апріорних логарифмічних відношень функцій правдоподібності декодера турбокоду забезпечило проведення оцінювання стану каналу передачі даних з підвищеним рівнем шуму та завад без застосування додаткового каналу для передачі тестової оціночної послідовності. При цьому підвищується точність оцінки достовірності, за якої пропускна спроможність знижується на 4–7 % проти 30–34 % відомих результатів.

7. Отримав подальший розвиток метод оцінювання дисперсії завад в адаптивному декодері турбокоду в частині зменшення апостеріорної невизначеності під час розрахунку ЛВФП про передані біти даних у декодері турбокоду за рахунок врахування функціональної залежності величини дисперсії від кількості компонентних кодерів багатоконponentного турбокоду.

Результати імітаційного моделювання показали, що використання чотирикомponentного турбокоду приводить до покращення точності визначення дисперсії завад і, відповідно, відношення сигнал-шум. Наприклад, для 8-ї ітерації декодування при відношенні сигнал-завада, рівного 0 дБ: точність визначення відношення сигнал-завада підвищується на 0,15 дБ у порівнянні з використанням трикомponentного ТК, на 0,3 дБ у порівнянні з використанням двокомponentного ТК і на 1,3 дБ у порівнянні з методом максимальної правдоподібності, який не

використовує ітеративне декодування. Використовуючи більш точну оцінку дисперсії завад в алгоритмах декодування турбокодів Map, Max Log Map, Log Map сприяє підвищенню надійності прийняття рішень у процесі декодування біт інформації, а отже, підвищується достовірність переданої інформації, при цьому кількість помилок зменшується в 10–25 разів.

8. Удосконалено метод прийняття рішень у процесі декодування турбокодів на основі використання апріорної інформації від додаткового кодування при кожній ітерації декодування багатокomпонентного турбокоду, що дозволяє підвищити достовірність передачі інформації. Додаткове використання перевірочних символів, які виробляються кодерами на кожній ітерації декодування та передаються на декодери багатокomпонентного турбокоду наступної ітерації під час розрахунку ЛВФП, зменшує кількість помилок в 4–6 разів.

9. Удосконалено метод формування адаптивних кодів з повторенням, що заснований на використанні простого повторення кодових комбінацій, у частині створення надлишковості за рахунок використання ортогональних послідовностей з урахуванням їх кореляційних властивостей; це дозволяє в декодері турбокоду підвищити надійність прийняття рішень при декодуванні біт інформації. Застосування системи Уолша та процедури незалежності кодування призводить до зменшення кореляції інформаційної послідовності та до отримання додаткової інформації при декодуванні турбокодів, а отже, до підвищення надійності прийняття рішення про переданий біт, при цьому енергетичний виграш становить 0,1–0,5 дБ.

10. Удосконалено Log Map метод декодування турбокодів за рахунок використання лінійної та гібридної апроксимації логарифма Якобіана під час прийняття рішень про декодований біт, що дозволяє підвищити достовірність передачі інформації. Використовуючи запропоновану гібридну та лінійну апроксимацію з урахуванням параметрів завад в алгоритмі декодування турбокодів Log Map, отримано енергетичний виграш 0,3 дБ та зменшено кількість помилок у прийнятій інформаційній послідовності за умов впливу потужних завад у 2–10 разів.

11. На підставі формалізованого опису процесів при передаванні та декодуванні типових даних у перспективних інформаційних технологіях розроблено нову векторну модель дискретно-неперервного каналу системи OFDM з урахуванням впливу навмисних завад, що дозволило створити імітаційну модель процесу функціонування безпроводової системи передачі даних. Розроблена імітаційна модель враховує методи та способи об'єднання компонентних кодів, властивості середовища поширення та має можливість у широких межах змінювати параметри кодів (поліноми, розмір кадру, типи перемешувачів, кількість компонентних кодів, структури конкатенації кодів, кількість ітерацій декодування, алгоритми декодування й інші параметри) для отримання статистичних характеристик з метою вдосконалення відомих та перспективних інформаційних технологій. Адекватність імітаційної моделі була підтверджена порівнянням результатів з використанням F -критерію Фішера, які отримані за допомогою розробленої моделі, і результатів, які отримані за допомогою натурних експериментів та відомої аналогічної імітаційної моделі системи UMTS стандарту 25.212, що представлена групою Iterative Solutions.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Зайцев С. В. Математична модель каналу зв'язку з сигналами OFDM та навмисними завадами / С. В. Зайцев // Математичні машини і системи. – 2011. – № 4. – С. 166–175.
2. Зайцев С. В. Дослідження впливу навмисних завад на пропускну спроможність засобів радіозв'язку з технологією MIMO-OFDM / С. В. Зайцев // Математичні машини і системи. – 2012. – № 1. – С. 139–153.
3. Зайцев С. В. Аналіз пропускну спроможності каналу зв'язку з навмисними завадами та сигналами OFDM / С. В. Зайцев // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів : ЧДТУ, 2012. – № 1 (55). – С. 172–183.
4. Зайцев С. В. Інформаційна технологія побудови системи OFDM-FHSS на основі оптимальних частотно-часових сигнально-кодових конструкцій / С. В. Зайцев // Математичні машини і системи. – 2013. – № 1. – С. 83–93.
5. Зайцев С. В. Інформаційна технологія побудови системи радіозв'язку з OFDM, внутрішньо бітовою псевдовипадковою перебудовою піднесучих частот та трикомпонентними турбокодами / С. В. Зайцев // Математичні машини і системи. – 2013. – № 2. – С. 48–63.
6. Зайцев С. В. Метод підвищення достовірності передачі інформації в розподілених програмованих безпроводних системах з турбокодами / С. В. Зайцев // Математичні машини і системи. – 2013. – № 3. – С. 142–155.
7. Зайцев С. В. Дослідження характеристик достовірності передачі інформації з використанням модифікованого методу декодування / С. В. Зайцев // Проблеми інформатизації та управління : зб. наук. праць. – К. : НАУ, 2013. – Вип. 3 (43). – С. 26–34.
8. Zaitsev S. V. Method for controlling state channel wireless networks under apriori uncertainty / S. V. Zaitsev // International Journal «Information Models and Analyses». – ITHEA. – Bulgaria, 2014. – Vol. 3, N 2. – P. 186–194.
9. Зайцев С. В. Математична модель нечіткого декодування турбокодів / С. В. Зайцев // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – (Серія «Технічні науки»). – Чернігів : ЧДТУ, 2014. – № 2 (73). – С. 136–142.
10. Zaitsev S. V. Method of estimating reliability of information transmission in wireless networks channels increase in noise and interference / S. V. Zaitsev // International Journal «Information Models and Analyses». – ITHEA. – Bulgaria, 2015. – Vol. 4, N1. – P. 87–99.
11. Зайцев С. В. Параметрична адаптація турбо кодів в умовах апіорної невизначеності / С. В. Зайцев // Технічні науки та технології. – Чернігів : ЧНТУ, 2015. – № 1 (1). – С. 85–93.
12. Зайцев С. В. Модифікований алгоритм декодування турбо кодів LOG MAP з урахуванням впливу навмисних завад / С. В. Зайцев // Математичні машини і системи. – 2015. – № 4. – С. 70–79.

13. Казимир В. В. Математична модель декодування турбокодів по модифікованому алгоритму Max Log Map / В. В. Казимир, С. В. Зайцев, Б. В. Горлинський // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів : ЧДТУ, 2011. – № 1 (47). – С. 181–188.

14. Зайцев С. В. Математична модель ітеративної оцінки дисперсії завад для систем зв'язку з технологією МІМО / С. В. Зайцев, О. В. Кувшинов, О. І. Восколович // Вісник Чернігівського державного технологічного університету : збірник. – Чернігів : ЧДТУ, 2011. – № 2 (49). – С. 170–176.

15. Розрахунок пропускної здатності програмованих радіостанцій з використанням технології МІМО за умов впливу навмисних завад / О. О. Овчаров, С. В. Зайцев, С. П. Лівенцев, О. В. Кувшинов // Зв'язок. – 2010. – № 4 (92). – С. 48–55.

16. Зайцев С. В. Статистична оцінка завадозахищеності систем зв'язку з технологією МІМО / С. В. Зайцев, В. В. Казимир, О. І. Восколович // Математичні машини і системи. – 2011. – № 3. – С. 47–57.

17. Кувшинов О. В. Математична модель системи радіозв'язку на базі теорії ігор / О. В. Кувшинов, С. В. Зайцев // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів : ЧДТУ, 2011. – № 4 (53). – С. 159–165.

18. Яриловець А. В. Аналіз стану та перспективи розвитку телекомунікаційних мереж / А. В. Яриловець, С. В. Зайцев, В. Д. Назарук // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів : ЧДТУ, 2012. – № 2 (57). – С. 155–165.

19. Чумак В. К. Математична модель системи МІМО під час дії шумових завад / В. К. Чумак, С. В. Зайцев, О. І. Вервейко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів : ЧДТУ, 2012. – № 3 (59). – С. 177–183.

20. Яриловець А. В. Алгоритм побудови оптимальних частотно-часових сигнальних конструкцій / А. В. Яриловець, В. Д. Назарук, С. В. Зайцев // Математичні машини і системи. – 2012. – № 4. – С. 94–101.

21. Зайцев С. В. Інформаційна технологія побудови системи OFDM з внутрібітовою псевдовипадковою перебудовою піднесучих частот в умовах впливу навмисних завад / С. В. Зайцев, В. В. Приступа, А. В. Яриловець // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів : ЧДТУ, 2012. – № 4 (61). – С. 131–140.

22. Зайцев С. В. Дослідження структурних особливостей розподілених програмованих безпроводних систем / С. В. Зайцев, В. В. Приступа // Проблеми інформатизації та управління : зб. наук. праць. – К. : НАУ, 2013. – Вип. 2 (42). – С. 34–44.

23. Зайцев С. В. Оцінювання завадозахищеності безпроводних мереж із сигналами OFDM з внутрібітовою псевдовипадковою перебудовою піднесучих частот / С. В. Зайцев, В. В. Приступа, В. М. Василенко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів : ЧДТУ, 2013. – № 2 (65). – С. 192–201.

24. Яриловець А. В. Оцінка ефективності інформаційної технології для систем безпроводового доступу, побудованої на основі оптимальних ортогональних

багато частотних конструкцій / А. В. Яриловець, В. Д. Назарук, С. В. Зайцев // Математичні машини і системи. – 2014. – № 2. – С. 51–58.

25. Приступа В. В. Исследование характеристик помехозащищенности беспроводных сетей с сигналами OFDM с внутрибитовой псевдослучайной перестройкой поднесущих частот в условиях установки оптимальных помех / В. В. Приступа, С. В. Зайцев // Математичні машини і системи. – 2015. – № 1. – С. 84–95.

26. Zaitsev S. V. Method of Adaptive Decoding in Case of Information Transmission in Condition of Influence of Deliberate Noise / S. V. Zaitsev, V. V. Kazymyr // Radioelectronics and Communications Systems. – Allerton Press, Inc. – New York, 2015. – Vol. 58. – P. 30–40.

27. Technology for improve cyber security using turbo codes / [V. Kazymyr, S. Zaitsev, Y. Ryndych, R. Zarovskyi] // Information Technologies in Innovation Business. – 2015. – № 4. – P. 85–88.

28. Інформаційні технології побудови систем радіозв'язку зі складними сигнально-кодovими конструкціями / [С. В. Зайцев, В. В. Казимир, О. В. Кувшинов, С.П. Лівенцев, Є.В. Риндич]. – Чернігів : Чернігівський державний технологічний університет, 2012. – 444 с.

29. Інформаційні основи побудови телекомунікаційних мереж : монографія / [В. В. Казимир, В. В. Литвинов, С. М. Шкарлет, С. В. Зайцев]. – Чернігів : Чернігівський державний технологічний університет, 2013. – 340 с.

30. Пат. на корисну модель 43111, Україна, МПК Н03М 13-37. Пристрій підвищення завадозахищеності систем з турбокодами при низьких значеннях відношення сигнал-шум в каналі / Зайцев С. В., Лівенцев С. П., Кувшинов О. В., Артюх О. І. – заявл. 05.08.08; опубл. 10.08.09, Бюл. № 15.

31. Пат. на корисну модель 47618, Україна, МПК Н03М 13-37. Пристрій перетворення апостеріорної інформації турбодекодера з повторенням для підвищення завадозахищеності програмованих радіостанцій з технологією МІМО / Овчаров О. О., Зайцев С. В., Лівенцев С. П., Кувшинов О. В. – заявл. 30.09.09; опубл. 10.02.10, Бюл. № 3.

32. Пат. на корисну модель 52574, Україна, МПК Н03М 13-37. Пристрій перетворення логарифмічних відношень функцій правдоподібності в декодерах для прийняття рішення про прийнятий біт інформації / Зайцев С. В., Горлинський Б. В., Лівенцев С. П. – заявл. 12.04.10; опубл. 25.08.10, Бюл. № 16.

33. Пат. на корисну модель 62638, Україна, МПК Н03М 13-37. Пристрій ітеративної оцінки стану каналів зв'язку систем з технологією МІМО / Зайцев С. В., Восколович О. І., Кувшинов О. В. – заявл. 19.01.11; опубл. 12.09.11, Бюл. № 17.

34. Пат. на корисну модель 86753, Україна, МПК G07C 13/00 Н04N 7/15. Програмно-апаратний комплекс захищеної системи голосового конференц-зв'язку в ІР-мережах / Казимир В. В., Зайцев С. В., Риндич Є. В. – заявл. 08.07.13; опубл. 10.01.14, Бюл. № 1.

35. А.с. 31030. Комп'ютерна програма «Имитационная модель программируемой радиостанции с турбо кодами с повторением и технологией многоканальной передачи МІМО, псевдослучайной перестройкой рабочей частоты, функционирующей в условиях воздействия преднамеренных помех» / О. Овчаров,

С. Зайцев, С. Лівенцев, О. Кувшинов // Державний департамент інтелектуальної власності. – 19.11.2009.

36. А.с. 33677. Комп'ютерна програма «Имитационная модель физического уровня программируемой радиостанции с многокомпонентными турбо кодами» / Б. Горлинський, С. Зайцев, С. Лівенцев // Державний департамент інтелектуальної власності. – 10.06.2010.

37. А.с. 52194. Комп'ютерна програма «Захищена система голосового конференц-зв'язку у IP-мережах» / В.В. Казимир, С.В. Зайцев, Є.В. Риндич // Державна служба інтелектуальної власності. – 18.11.2013.

38. А.с. 52195. Комп'ютерна програма «Імітаційна модель IP-мережі з адаптивним кодуванням та ортогонально-частотним мультиплексуванням» / С.В. Зайцев, В.В. Приступа, В.М. Василенко // Державна служба інтелектуальної власності. – 18.11.2013.

39. Зайцев С. Модифікований метод декодування турбокодів для підвищення заводо захищеності перспективних засобів спеціального радіозв'язку / С. Зайцев, А. Яриловець // Безопасность информации в информационно-телекоммуникационных системах : XIII Междунар. науч.-практ. конф. – К., 2010. – С. 111.

40. Зайцев С. В. Алгоритм підвищення надійності прийняття рішення при розрахунку логарифмічного відношення правдоподібності про передану інформаційну послідовність в розподілених програмованих безпроводних системах / С. В. Зайцев // Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2013 : VIII Міжнар. наук.-практ. конф., (Чернігів–Жукін, 24–28 червня 2013 р.). – Чернігів : Черніг. держ. технол. ун-т, 2013. – С. 303–305.

41. Зайцев С. В. Метод підвищення достовірності передачі інформації в розподілених програмованих безпроводних системах за результатами аналізу декодування турбокодів / С. В. Зайцев // Збірник тез VI Міжнар. наук.-техн. конф. «Комп'ютерні системи та мережні технології» (CSNT-2013), (Київ, 11–13 червня 2013 р.). – К. : НАУ, 2013. – С. 57–58.

42. Зайцев С. В. Алгоритм адаптивного управління і корекції параметрів засобів безпроводних мереж / С. В. Зайцев, Є. В. Риндич // Збірник матеріалів VIII Всеукр. наук.-практ. заочної конф. «Наука України. Перспективи та потенціал» (Київ, 29–30 вересня 2013 р.). – К. : Всеукраїнське громадське партнерство «Нова освіта», 2013. – С. 62–65.

43. Зайцев С. В. Аналіз впливу оптимальних завод на достовірність передачі інформації засобів безпроводних мереж / С. В. Зайцев, Є. В. Риндич // Збірник тез доповідей Всеукр. наук.-практ. конф. аспірантів, молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості» (Івано-Франківськ, 8–11 жовтня 2013 р.). – Івано-Франківськ : Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2013. – С. 52–54.

44. Зайцев С. В. Оцінка достовірності передачі інформації в безпроводних телекомунікаційних системах на основі функцій правдоподібності турбокодів / С. В. Зайцев // Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2014 : IX Міжнар. наук.-практ. конф., (Київ–Жукін, 23–27 червня 2014 р.). – Чернігів : ЧДІЕУ, 2014. – С. 280–282.

45. Zaitsev S. V. Research of wireless networks channels statement using priori and aposteriori information of turbo decoder / S. V. Zaitsev // Papers of the 3rd International Scientific Conference «Applied Sciences in Europe: tendencies of contemporary development», (Stuttgart, Germany, September 2–3). – ORT Publishing. – Stuttgart, 2013. – P. 40–42.

46. Зайцев С. В. Математична модель підвищення ефективності декодування турбо кодів / С. В. Зайцев // Materiály X mezinárodní vědecko-praktická konference «Efektivní nástroje moderních věd – 2014». – Díl 30. Moderní informační technologie. Výstavba a architektura : Praha. Publishing House «Education and Science», 2014. – P. 5-8.

47. Доля А. Е. Имитационная модель беспроводной системы передачи информации с использованием технологии HARQ и дополнительной априорной информации для повышения достоверности передачи / А. Е. Доля, С. В. Зайцев // Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі: Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених і студентів, (Чернігів, 28 квітня 2014 р.). – Чернігів : Черніг. нац. технол. ун-т, 2015. – С. 70–71.

48. Зайцев С. В. Математична модель оцінки достовірності передачі інформації в безпроводних мережах за умов впливу структурних завад / С. В. Зайцев // Молода наука України. Перспективи та пріоритети розвитку : матеріали XIV Всеукр. наук.-практ. конф. з міжнар. участю, (Київ, 26–27 грудня 2013 р.). – К., 2012. – С. 174–175.

АНОТАЦІЯ

Зайцев С.В. Методи та моделі забезпечення сталої достовірності інформації у безпроводових системах передачі даних. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології. – Інститут проблем математичних машин і систем Національної академії наук України, Київ, 2016.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми забезпечення сталої достовірності інформації систем передачі даних в умовах априорної невизначеності за рахунок розроблення моделей і методів, що використовують упорядковану послідовність процесів багаторівневої адаптації каскадних кодових конструкцій та додаткові показники розкриття невизначеності декодування.

Запропоновано методи, розроблено моделі, які доведені до схематичних рішень та алгоритмів функціонування систем передачі даних, що працюють в умовах априорної невизначеності та забезпечують сталу достовірність передачі інформації.

Основні результати роботи використані під час створення відомчих радіостанцій для військових формувань, у ході створення відомчих IP-мереж для органів влади та місцевого самоврядування.

Ключові слова: безпроводові системи передачі даних, апіорна невизначеність, навмисні завади, каскадні коди, турбокоди, ітеративне декодування, адаптивні системи, оцінка каналу, автоматичний запит повторної передачі, адекватність моделі.

АННОТАЦІЯ

Зайцев С.В. Методы и модели обеспечения устойчивой достоверности информации в беспроводных системах передачи данных. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.13.06 – информационные технологии. – Институт проблем математических машин и систем Национальной академии наук Украины, Киев, 2016.

В работе сформулирована и решена актуальная научно-прикладная проблема обеспечения устойчивой достоверности информации систем передачи данных в условиях априорной неопределенности за счет разработки моделей и методов, использующих упорядоченную последовательность процессов многоуровневой адаптации каскадных кодовых конструкций и дополнительные показатели раскрытия неопределенности декодирования. Предложенные методы, разработанные модели приведены к схематическим решениям и алгоритмам функционирования систем передачи данных, которые работают в условиях априорной неопределенности и обеспечивают устойчивую достоверность передачи информации.

Впервые предложена концепция обеспечения устойчивой достоверности передачи информации в условиях априорной неопределенности, которая основывается на новых критериях и методах, и, в отличие от существующих, использует критерии обеспечения устойчивой достоверности, показатели неопределенности декодирования и многоуровневую адаптацию каскадных кодовых конструкций.

Впервые разработан метод структурной адаптации каскадных кодов, который, в отличие от существующих, включает двухступенчатую адаптацию структуры конкатенации кодов (на первом этапе происходит определение структуры внутреннего кода, а на втором, с учетом показателя неопределенности, выбираются структуры компонентных кодов) и позволяет динамично синтезировать структуры каскадных кодов для обеспечения устойчивой достоверности информации в условиях априорной неопределенности.

Впервые разработан метод параметрической адаптации компонентных кодов турбокода для обеспечения устойчивой достоверности информации, который, в отличие от существующих, использует впервые предложенный показатель неопределенности и позволяет в динамике определять размер кадра, тип перемежителя, полиномы компонентных кодов и количество итераций декодирования для адаптации структуры кодера в условиях априорной неопределенности.

Усовершенствован метод оценивания достоверности информации с учетом плотности распределения нормализованных значений количества изменений знака апостериорно-априорных логарифмических отношений функций правдоподобия декодера turboкоду, что позволяет повысить точность оценки достоверности информации в случае отсутствия дополнительного тестового канала.

Получил дальнейшее развитие метод оценивания дисперсии помех в адаптивном декодере turboкода за счет вычисления глубины свертки функций правдоподобия о переданных битах многокомпонентных turboкодов с учетом функциональной зависимости величины дисперсии от количества компонентных кодеров turboкода, что дает возможность уменьшить априорную неопределенность во время принятия решений и улучшает точность определения дисперсии помех.

Усовершенствован метод принятия решений в процессе декодирования turboкодов за счет использования априорной информации от дополнительного кодирования при каждой итерации декодирования многокомпонентного turboкода, что позволяет повысить достоверность передачи информации.

Получил дальнейшее развитие метод формирования адаптивных кодов с повторениями, который основан на использовании простого повторения кодовых комбинаций, в части создания избыточности в информационных данных за счет использования ортогональных последовательностей с учетом их корреляционных свойств; что позволяет в декодере turboкода повысить надежность принятия решений во время декодирования бит информации.

Усовершенствовано Log Map метод декодирования turboкодов за счет использования в алгоритме декодирования линейной и гибридной аппроксимации логарифма Якобиана во время принятия решений о декодированном бите, который позволяет повысить достоверность передачи информации.

Впервые разработана имитационная модель процесса функционирования беспроводной системы передачи данных, которая, в отличие от известных, включает векторную модель дискретно-непрерывного канала системы OFDM с учетом влияния преднамеренных помех и основанная на формализованном описании процессов передачи и декодирования типичных данных; предложенная имитационная модель основывается на методах объединения компонентных кодов и имеет возможность в широких пределах изменять параметры кодов (полиномы, размер кадра, типы перемежителей, количество компонентных кодов, структуры конкатенации кодов, количество итераций декодирования, алгоритмы декодирования и другие параметры) для получения статистических характеристик для решения задач анализа и синтеза известных и перспективных информационных технологий.

Ключевые слова: беспроводные системы передачи данных, априорная неопределенность, преднамеренные помехи, каскадные коды, turboкоды, итеративное декодирование, адаптивные системы, оценка канала, автоматический запрос повторной передачи, адекватность модели.

ABSTRACT

Zaitsev S.V. Methods and models of ensuring of sustained reliability of information in wireless data transmission systems. – Manuscript.

Thesis for achievement of doctor's degree in technical science in speciality 05.13.06 – information technologies. – Institute of Mathematical Machines and Systems Problems of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2016.

The thesis is devoted to solution of actual scientific and applied problem of ensuring sustainable reliability of information of data transmission systems in the conditions of aprioristic uncertainty by the development of models and methods that use the ordered sequence of processes of multilevel adaptation of cascade code constructions and additional indicators of disclosure of decoding uncertainty.

The methods are proposed and the models are developed in form of schematic solutions and algorithms of operation of data transmission systems, which performs in the conditions of aprioristic uncertainty and provides sustainable certainty of information transfer.

The main results have been used for the development of departmental stations for military units, during the creation of departmental IP networks for authorities and local self-government.

Key words: wireless data transmission systems, aprioristic uncertainty, intentional interference, cascade codes, turbocodes, iterative decoding, adaptive systems, channel estimation, automatic retransmission request, adequacy of the model.

Підписано до друку 26.05.2016. р. Формат 60x84/16.
Папір офсетний. Друк різнографія. Умов. др. арк. 1,9.
Тираж 100 пр. Замов. № 321/16.

Редакційно-видавничий відділ
Чернігівського національного технологічного університету
14027, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції серія ДК №4802 від 01.12.2014 р.