

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

ІВАНОВ ЮРІЙ ЮРІЙОВИЧ

УДК 621.391:519.72 + 004.942

**ЗАВАДОСТІЙКЕ ДЕКОДУВАННЯ ТУРБО-КОДІВ У РОЗПОДІЛЕНИХ
КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ**

Спеціальність 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2016

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Кулик Анатолій Ярославович,
Вінницький національний медичний
університет імені М.І. Пирогова,
завідувач кафедри біофізики, інформатики
та медичної апаратури.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор,
лауреат Державної премії України
в галузі науки і техніки
Казимир Володимир Вікторович,
Чернігівський національний технологічний
університет,
проректор з наукової роботи;

доктор технічних наук, професор,
лауреат Премії Кабінету Міністрів України
Мусієнко Максим Павлович,
Чорноморський національний університет
імені Петра Могили, м. Миколаїв,
декан факультету комп'ютерних систем.

Захист відбудеться “02” грудня 2016 р. о 12.⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.01 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитися у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК.

Автореферат розісланий “31” жовтня 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

С.М. Захарченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Пристрої цифрового зв'язку відіграють важливу роль у комп'ютерних системах різного функціонального призначення. Це пов'язано з тим, що такі системи часто є територіально розподіленою сукупністю обчислювальних секторів із високошвидкісними каналами передавання даних, інформаційно-обчислювальними комплексами, апаратними та програмними засобами, які виконують автоматизований збір, збереження, оброблення, передавання, отримання даних.

Наявність завад різної природи зумовлює актуальність розробки нових методів і засобів, які дозволяють виявляти та коригувати помилки передавання даних. Особливої уваги заслуговують завадостійкі коди, які дозволяють ефективно усувати помилки в каналі зв'язку, забезпечуючи високу вірогідність переданих даних при малих співвідношеннях сигнал/шум. На сучасному етапі розвитку теорії завадостійкого кодування найбільш перспективним є турбо-код (ТК), який здатний забезпечувати необхідні характеристики завадостійкості, максимально наближаючись до відомої із загальної теорії зв'язку межі К.Е. Шеннона. Саме тому в сучасних системах зв'язку даний коригуючий код використовується для роботи з інформаційними повідомленнями великого обсягу при високошвидкісному передаванні даних для забезпечення високої завадостійкості. ТК удосконалюється в напрямі підвищення швидкості та вірогідності передавання даних, що безперечно, робить перспективним його застосування у розподілених комп'ютерних системах.

Останнім часом спостерігається збільшення кількості досліджень за цим напрямком у наукових роботах закордонних авторів, зокрема С. Berrou, А. Glavieux, Р. Robertson, J. Hagenauer, Р. Hoeher, L. Hanzo, D. Divsalar, F. Pollara, D. Declercq, Ю.Б. Зубарєв, І.В. Васильєв, В.В. Золотарьов, А.І. Корольов, а також українських вчених: В.Л. Банкет, В.В. Казимир, С.В. Зайцев, С.П. Лівенцев, Б.В. Горлінський, В.В. Топалов та інші. Це пов'язано з тим, що сучасні технічні можливості дозволяють застосовувати складні обчислювальні методи, які забезпечують високий ступінь виправлення помилок, проте ряд питань вимагає дослідження.

До сучасних завадостійких інформаційних систем висувуються умови роботи з необхідною швидкістю та вірогідністю передавання даних. У свою чергу, це безпосередньо пов'язано зі швидкодією декодування. Враховуючи вищеописане, необхідно досягти прийняттого компромісу між цими параметрами. Процедура декодування ТК є найважливішим і найтрудомісткішим етапом передавання даних, а існуючі методи декодування характеризуються складністю обчислювального процесу, що обмежує швидкодію декодування та ускладнює апаратну реалізацію. З огляду на це, *актуальною науково-практичною задачею* є розробка та вдосконалення методів і засобів декодування ТК з метою підвищення вірогідності передавання даних і зменшення обчислювальної складності їх декодування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась на кафедрі автоматики та інформаційно-виміральної техніки Вінницького національного технічного університету (ВНТУ) відповідно до планів науково-дослідної роботи (НДР): "Розробка алгоритму роботи турбо-кодека та впровадження програмного забезпечення для передавання інформації у комп'ютерних системах різного функціонального призначення" (шифр № 41/7, номер державної реєстрації

0116U004713). Результати впроваджено в процес роботи "ТВА-Сервіс" (Вінниця, акт впровадження від 31.05.2016), ТОВ "Медичний центр "Альтамедіка плюс" (Вінниця, довідка від 20.05.2016) та в навчальний процес кафедри автоматики та інформаційно-вимірювальної техніки ВНТУ (акт впровадження від 01.05.2016), а також у наукових розробках кафедри нормальної фізіології Вінницького національного медичного університету (ВНМУ) імені М.І. Пирогова (довідка від 31.05.2016). При виконанні НДР автор був відповідальним виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення вірогідності передавання даних і зменшення обчислювальної складності їх декодування за рахунок удосконалення каскадної конструкції турбо-декодера у розподілених комп'ютерних системах різного функціонального призначення.

Для досягнення мети необхідно розв'язати такі задачі:

↪ проаналізувати роботу перспективних завадостійких кодів у засобах обміну даними розподілених комп'ютерних систем різного функціонального призначення;

↪ модифікувати метод декодування турбо-коду за максимумом апостеріорної імовірності log-MAP з урахуванням зниження обчислювальної складності без втрати ефективності декодування даних;

↪ запропонувати модель декодера турбо-коду, яка використовує спрощений розрахунок метрик та апостеріорних значень відповідно до модифікованого методу декодування;

↪ отримати аналітичні вирази для оцінки складності роботи турбо-декодера з комплексним урахуванням елементарних математичних операцій та виконати порівняльний аналіз обчислювальної складності декодування даних, використовуючи різні методи декодування турбо-коду;

↪ розробити програмно-апаратні засоби та дослідити запропонований PL-log-MAP метод декодування турбо-коду за допомогою комп'ютерного імітаційного моделювання для оцінювання характеристик процесу передавання даних.

Об'єктом дослідження є процес обміну даними із забезпеченням необхідної вірогідності передавання даних для розподілених комп'ютерних систем.

Предметом дослідження є методи та засоби декодування турбо-коду.

Методи дослідження. В роботі використано методи теорії ймовірності та математичної статистики, теорії інформації і кодування, теорії апроксимації функцій для удосконалення методу декодування ТК та модифікації турбо-декодера; аналітичні методи дослідження математичних моделей для аналізу обчислювальної складності процедури декодування ТК; імітаційне моделювання та експериментальне дослідження для аналізу та перевірки достовірності отриманих теоретичних положень. Оброблення експериментальних даних виконувалося за допомогою пакетів програм MatLab R2013a 8.01; MathCad 14.0; Microsoft Excel пакету MS Office.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в подальшому розвитку теоретичних засад побудови завадостійких турбо-кодів, що забезпечує підвищення вірогідності обміну даними при зменшенні кількості елементарних математичних операцій (ЕМО) під час реалізації засобів турбо-декодування.

1. Вперше запропоновано математичну модель турбо-декодера, особливістю якої є використання спрощеного розрахунку метрик та апостеріорних значень логарифма відношення функцій правдоподібності, що дозволяє зменшити кількість ЕМО

декодування порівняно з методом MAP без втрати ефективності декодування даних, виключивши з обчислювального процесу розрахунок логарифмів та сум експоненціальних складових.

2. Вперше отримано аналітичні вирази для оцінки складності роботи турбо-декодера з урахуванням кількості комірок пам'яті та символів з виходу кодера для методів декодування SOVA, Bi-SOVA, а також запропонованого PL-log-MAP, що дало можливість провести аналіз складності та вибирати модель турбо-декодера при його програмно-апаратній реалізації залежно від поставлених умов.

3. Запропоновано використання нової форми компенсуючої функції у складі логарифма Якобіана в математичній моделі турбо-декодера, яка, на відміну від існуючих, застосовує кусково-лінійні функції, що дозволяє представити логарифм Якобіана у спрощеному вигляді, завдяки чому виключити з обчислення суми експоненціальних складових і логарифми, зменшуючи кількість ЕМО під час турбо-декодування без втрати ефективності декодування даних.

4. Модифіковано метод декодування log-MAP на етапі обчислення метрик та апостеріорних рішень з виходу кодера, що дозволяє підвищити вірогідність передавання даних порівняно з іншими існуючими методами декодування ТК, досягаючи значень BER оригінальних MAP та log-MAP методів, і зменшити складність обчислювального процесу декодування даних.

5. Отримав подальший розвиток метод визначення обчислювальної складності (кількості ЕМО) турбо-декодування, особливістю якого є комплексне врахування елементарних операцій, які реалізуються в декодері, за рахунок чого можна отримати аналітичні вирази для оцінки складності роботи турбо-декодера та виконати порівняльний аналіз обчислювальної складності декодування даних з використанням різних методів декодування ТК з урахуванням кількості комірок пам'яті та символів з виходу кодера.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що на основі отриманих теоретичних положень розроблено комплекс програмних і апаратних засобів, які дозволяють підвищити вірогідність передавання даних та знизити обчислювальну складність методів декодування турбо-кодів без втрати ефективності декодування даних у розподілених комп'ютерних системах. У роботі отримані результати, які мають практичну цінність, а саме:

1. Розроблено структурні схеми турбо-декодера, блоків для обчислення метрик та апостеріорних значень з виходу кодера за методом PL-log-MAP із застосуванням запропонованої компенсуючої функції (кореляція з оригіналом $r=0,9994$, що перевищує інші методи до 10,5 %) для роботи у розподілених комп'ютерних системах різного функціонального призначення.

2. Розроблено алгоритм турбо-декодування PL-log-MAP, використання якого дає можливість зменшити кількість ЕМО методу декодування MAP у 3-7 рази, максимально наближаючись до показників BER MAP ($RMSE=0,0004$, $r=0,9997$) та log-MAP ($RMSE=0,0005$, $r=0,9998$) методів.

3. Розроблені програмні засоби для системи передавання даних з турбо-декодером, які дозволяють оцінити та забезпечити необхідну вірогідність обміну даними з використанням різних методів декодування при певному рівні нормованого відношення сигнал/шум у каналі передавання даних.

4. Сформульовано рекомендації щодо застосування різних методів декодування ТК відповідно до необхідних імовірнісних та енергетичних характеристик процесу передавання даних.

Результати, які отримані у роботі, були використані в процесі розроблення: системи охоронної телесигналізації на ПП "ТВА-Сервіс"; розподіленої системи оброблення зображень органів людини на ТОВ "Медичний центр "Альтамедіка плюс"; багатоканальної телеметричної системи передавання фізіологічних характеристик лабораторних тварин у ВНМУ імені М.І. Пирогова, а також кафедральних дослідженнях ВНТУ.

Особистий внесок здобувача. Всі результати, які складають основний зміст роботи, отримані автором самостійно. Роботи [10, 21, 32 – 37, 39 – 41] є одноосібно підготовленими працями. У публікаціях, написаних у співавторстві, дисертанту належать: [1, 3, 8, 18] – аналіз основних властивостей ТК, розрахунок логарифма відношення функцій правдоподібності (ЛВФП) та моделювання роботи методів декодування SOVA та Bi-SOVA, представлення апаратних засобів; [2, 4, 14] – математичний апарат, апаратні та програмні засоби для методу декодування MAP, проведення імітаційного моделювання; [5, 6, 9] – математичні моделі та апаратні засоби для методів декодування log-MAP, max-log-MAP, оцінювання їх роботи; [7] – аналіз обчислювальної складності методів декодування MAP, max-log-MAP, SOVA, Bi-SOVA; [11] – аналіз методу декодування A. Viterbi; [12, 15, 20] – використання алгебри ЛВФП для блокових ТК; [13] – модифікація методу декодування log-MAP, аналіз його основних властивостей та визначення числових оцінок, розробка засобів декодування, моделювання роботи на мультимедіа даних; [16, 17, 19, 27] – аналіз перспектив застосування ТК у системах різного функціонального призначення; [22] – математичні моделі методів моделювання шумів у каналах передавання даних Гауса та Релея; [23] – опис узагальненої ітеративної стратегії турбо-декодування; [24] – аналіз видів інтерліверів у турбо-кодових конструкціях; [25, 26] – математичні моделі методів оцінювання інтерліверів; [28, 30] – опис основних принципів роботи системи передавання даних у складі телемедичного комплексу; [29] – порівняння правил зупинки процесу турбо-декодування; [31] – статистичне оцінювання кусково-лінійної компенсуючої функції у складі логарифма Якобіана; [38, 42] – розробка алгоритму та реалізація окремих модулів програмного забезпечення.

Апробація результатів роботи. Основні результати та положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на таких наукових конференціях: VI та VII міжнародних конференціях з оптико-електронних інформаційних технологій Photonics-ODS (Вінниця, 2012, 2015); I, II, III міжнародних наукових конференціях "Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах" (Вінниця, 2011, 2013, 2015); XII міжнародній конференції "Контроль і управління в складних системах" (Вінниця, 2014); IV та V міжнародних науково-практичних конференціях "Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія" (Вінниця, 2014, 2015); міжнародній науково-технічній конференції "Информационные системы и технологии" (АР Крим, Морське, 2012); міжнародній науково-практичній інтернет-конференції "Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании" (Одеса, 2012); міжнародній науковій конференції "Современные информационные и электронные технологии" (Одесса, 2013); XIII міжнародній науково-технічній конфе-

ренції “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах” (Хмельницький, 2014); III науково-технічній конференції “Обчислювальні методи і системи перетворення інформації” (Львів, 2014); X and XI International Siberian Conference on Control and Communications (Russian Federation, Krasnoyarsk, 2013; Omsk, 2015); International scientific and practical conference “News of the Advanced Science” (Bulgary, Sofia, 2013), а також 3-ох (XLI, XLII, XLV) конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів ВНТУ за участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств міста Вінниці та області (Вінниця, 2012, 2013, 2016).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 42 наукові праці: 15 статей в наукових фахових виданнях, 10 з яких в українських наукових фахових виданнях, 2 роботи у збірниках наукових праць, 3 статті у закордонних виданнях, з яких 1 стаття входить до журналів із міжнародної науково-метричної бази даних SCOPUS, 2 – до міжнародної цифрової бібліотеки наукових статей IEEE Xplore, 7 статей у складі робіт науково-метричної бази РИНЦ SCIENCE INDEX; 16 публікації у вигляді тез доповідей і 11 свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір (комп’ютерну програму).

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел, який містить 145 бібліографічних посилань (18 стор.), і 6 додатків (20 стор.). Матеріали дисертаційної роботи викладено на 136 сторінках основного тексту (на 20 сторінках розміщено рисунки і таблиці, які повністю займають площу сторінки), включаючи 75 рисунків і 18 таблиць. Загальний обсяг роботи складає 174 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ містить загальну характеристику роботи: обґрунтування актуальності теми дисертації, її зв’язок з науковими програмами, планами та темами; формулювання мети та основних задач досліджень; визначення об’єкта, предмета та методів досліджень; представлення наукової новизни та практичного значення одержаних результатів; дані про особистий внесок дисертанта, публікації, апробацію та впровадження результатів, а також про структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У **першому розділі** дисертації проведено аналітичний огляд літератури за темою досліджень. Розглянуто сучасні завадостійкі коди, які ефективно виправляють помилки в каналі зв’язку, забезпечуючи високу вірогідність передавання даних на високих швидкостях при малому співвідношенні сигнал/шум.

Проаналізовано ефективність використання різних сучасних завадостійких кодів у поєднанні з бінарною фазовою модуляцією (BPSK) для розподілених комп’ютерних систем різного функціонального призначення. Дослідження асимптот кодової відстані для представлених кодів дозволило визначити, що при високих імовірностях помилки $p = 10^{-5} - 10^{-7}$ (мале нормоване відношення сигнал/шум E_b/N_0 , від 0 до 3 дБ), кращим з розглянутих кодів є ТК (паралельна конкатенація рекурсивних систематичних згорткових (RSC) кодів), який на практиці дозволяє досягти енергетичного виграшу 9 дБ. Застосування ТК при високих значеннях коефіцієнта бітових помилок (BER) зменшує показник E_b/N_0 на 5–7 дБ порівняно з іншими завадостійкими кодами. Таким чином, показано, що за певних умов ТК мають перевагу перед

існуючими коригуючими кодами, оскільки дозволяють досягти компромісу між високими показниками вірогідності та швидкості передавання даних у каналах з низькою енергетикою.

Проведений аналіз засобів передавання даних показав, що ключовим і найбільш складним для реалізації елементом є декодер. Застосування декодерів з “м’яким” входом і “м’яким” виходом та ітеративних методів декодування ТК дозволяє підвищити вірогідність передавання даних для систем, на характеристики яких суттєвий вплив має канал передавання даних. Але використання завадостійких ТК вимагає ефективної реалізації відповідних обчислювальних методів декодування.

У роботі проаналізовано методи мінімізації помилки для одного бінарного інформаційного символу (MAP, log-MAP, max-log-MAP) та для всієї послідовності (SOVA, Bi-SOVA). Метод декодування MAP та його логарифмічна версія log-MAP дозволяють досягти менших значень BER, на відміну від SOVA, але мають високу обчислювальну складність, що є значним недоліком ітеративного декодування ТК. Це, в свою чергу, призводить до зниження швидкості оброблення даних декодером за рахунок збільшення кількості операцій декодування, які приходяться на один інформаційний символ, що підвищує витрати на реалізацію. Зменшення обчислювальної складності декодування ТК без значного зниження характеристик системи передавання даних можна виконати за рахунок модифікації методу декодування log-MAP, удосконаливши етапи обчислення метрик та “м’яких” рішень з виходу декодера. Для цього застосовують апроксимації компенсуючої функції $f_{ком}$ у складі логарифма Якобіана, які дають можливість досягти компромісу між складністю декодера та його робочими характеристиками, але використання існуючих функцій $f_{ком}$ не дозволяє отримати значення BER оригінального методу декодування MAP.

На основі проведеного аналізу сформульовано задачі, які необхідно розв’язати для досягнення мети дисертаційного дослідження.

У **другому розділі** дисертаційної роботи представлено модифікований метод декодування log-MAP, який має назву PL-log-MAP. Також наведено математичну модель модифікованого турбо-декодера та виконано комплексний порівняльний аналіз обчислювальної складності методів декодування ТК з використанням цифрових сигнальних процесорів (DSP).

На етапах розрахунку метрик та “м’яких” рішень з виходу декодера у методі декодування log-MAP важливим елементом обчислень є спадна нелінійна функція $f_{ком}(z) \in [\ln(2); 0]$ при $z \in (0; +\infty)$. Запропоновано спростити розрахунки, використавши лінійні функції виду $f_{комi}(z) = a_i \cdot z_i + b_i$, де параметри a_i і b_i знайдено комп’ютерним пошуком за методом найменших квадратів. Визначено, що доцільно розділити інтервал z на частини: $z_0 \in [0; 1)$, $z_1 \in [1; 1,5)$, $z_2 \in [1,5; 2)$, $z_3 \in [2; 3)$, $z_4 \in [3; 4]$ і $z_5 \in (4; +\infty)$.

Таким чином, *етап обчислення прямої α та зворотної β метрик* методу декодування PL-log-MAP для класичного двовимірного ТК можна представити у вигляді

$$\begin{aligned} \alpha_k^{PLM}(s) &= \ln \alpha_k(s) = \ln \left(\sum_{(s',s)} \exp(\gamma_k^{LM}(s',s) + \alpha_{k-1}^{PLM}(s')) \right) = \\ &= \ln(e^A + e^B) = \max(A, B) + f_{PL}(z), \quad z = |A - B|, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}\beta_{k-1}^{PLM}(s') &= \ln \beta_{k-1}(s') = \ln \left(\sum_{(s',s)} \exp(\gamma_k^{LM}(s',s) + \beta_k^{PLM}(s)) \right) = \\ &= \ln(e^C + e^F) = \max(C, F) + f_{PL}(z), \quad z = |C - F|,\end{aligned}\quad (2)$$

де $\alpha_k(s)$ та $\beta_{k-1}(s')$ – пряма та зворотна метрики методу декодування MAP;

$$\gamma_k^{LM}(s',s) = \frac{1}{2} \cdot \left(D_k \cdot LLR_{анп}(D_k) + LLR_{кан} \cdot \left(D_k \cdot x_{\xi_k} + \sum_{h=2}^n D_{h,v} \cdot x_{\xi_{h,v}} \right) \right) – \text{транзитна метри-}$$

рика в логарифмічній формі; s та s' – попередній та теперішній стани на ґратці коду (трелліс); $D_k, D_{h,v}$ – k -ий систематичний бінарний інформаційний символ на трелліс та його h перевірочних символів для v -ого RSC-кодера; $x_{\xi_k}, x_{\xi_{h,v}}$ – зашумлена версія символів D_k та $D_{h,v}$; $LLR_{анп}, LLR_{кан}$ – ЛВФП або апіорна (внутрішня) та канална інформація про переданий символ; A, C та B, F – суми транзитної і прямої метрик, а також транзитної та зворотної метрик на трелліс для $D_k=1$ та $D_k=0$ відповідно; f_{PL} – форма запропонованої компенсуючої функції (її вигляд і статистичне оцінювання (середня квадратична помилка $RMSE$ та лінійний коефіцієнт кореляції r ; К. Пірсона лінійної функції до оригіналу) відображені в табл. 1).

Таблиця 1 – Чисельні оцінки запропонованої компенсуючої функції f_{PL}

Апроксимація	Інтервал	a_i	b_i	$RMSE$	r
$f_{ком0}(z) = a_0 \cdot z_0 + b_0$	[0; 1)	-0,3792	0,6754	0,0108	0,9968
$f_{ком1}(z) = a_1 \cdot z_1 + b_1$	[1; 1,5)	-0,2229	0,5327	0,0019	0,9987
$f_{ком2}(z) = a_2 \cdot z_2 + b_2$	[1,5; 2)	-0,1483	0,4213	0,0014	0,9984
$f_{ком3}(z) = a_3 \cdot z_3 + b_3$	[2; 3)	-0,0773	0,2758	0,0032	0,9929
$f_{ком4}(z) = a_4 \cdot z_4 + b_4$	[3; 4]	-0,0300	0,1362	0,0013	0,9922
$f_{ком5}(z) = a_5 \cdot z_5 + b_5$	(4; ∞)	-0,0000	0,0100	–	–

Модифікація етапу обчислення "м'яких" або апостеріорних рішень декодера проводиться з використанням узагальненої рекурсивної формули логарифма Якобіана з N експоненціальними складовими та компенсуючої функції f_{PL} , що можна представити у формі

$$\begin{aligned}LLR_{PLM}(D_k) &= \ln \frac{\sum_{(s',s)}^{D_k=+1} \exp(\alpha_{k-1}^{PLM}(s') + \beta_k^{PLM}(s) + \gamma_k^{LM}(s',s))}{\sum_{(s',s)}^{D_k=-1} \exp(\alpha_{k-1}^{PLM}(s') + \beta_k^{PLM}(s) + \gamma_k^{LM}(s',s))} = \\ &= f(L_1, \dots, L_N) \Big|_{D_k=+1} - f(L_1, \dots, L_N) \Big|_{D_k=-1} = \\ &= f_{PL}(L_1, f_{PL}(L_2, \dots, f_{PL}(L_{N-2}, f_{PL}(L_{N-1}, L_N)))) \Big|_{D_k=+1} - \\ &- f_{PL}(L_1, f_{PL}(L_2, \dots, f_{PL}(L_{N-2}, f_{PL}(L_{N-1}, L_N)))) \Big|_{D_k=-1} = \\ &= LLR_{анп}(D_k) + LLR_{кан} \cdot x_{\xi_k} + LLR_{зовн}(D_k),\end{aligned}\quad (3)$$

де L_i – сума прямої, зворотної та транзитної метрик для $D_k=1$ та $D_k=0$ відповідно; $LLR_{зовн}$ – зовнішня інформація з декодера про переданий символ.

Порівняння статистичних оцінок (середня абсолютна помилка MAE , $RMSE$ та r_i між аналогом та оригінальною функцією) на тестовому діапазоні $z \in [0;10]$ наведено в табл. 2. Показник Θ показує перевагу запропонованої апроксимації над аналогом. Запропонована кусково-лінійна апроксимація наближається до значень оригіналу краще, ніж існуючі аналоги (0,11...10,53%).

Таблиця 2 – Порівняння статистичних оцінок існуючих компенсуючих функцій

Аналог	MAE	$RMSE$	r	Θ , %
Запропонована функція	0,0059	0,0070	0,9994	–
S. Asoodeh, дробовий	0,0063	0,0089	0,9983	0,1100
L. Zhang, S.-Z. Yu, квадратичний	0,0091	0,0135	0,9974	0,2000
С.В. Зайцев, комбінований	0,0147	0,0172	0,9957	0,3700
P. Robertson, J. Wang, таблиця пошуку	0,0108	0,0170	0,9940	0,5400
С.В. Зайцев, лінійний	0,0176	0,0243	0,9929	0,6500
L.L. Lim, D.W.G. Lim, гібридний	0,0227	0,0265	0,9925	0,6900
J.F. Cheng, T. Ottosson, лінійний	0,0179	0,0285	0,9860	1,3400
L.L. Lim, D.W.G. Lim, багатокроковий	0,0265	0,0453	0,9756	2,3800
S. Talakoub, лінійний в ряд	0,0342	0,0641	0,9351	6,4300
W.J. Gross, P.G. Gulak, константний	0,0432	0,0807	0,8941	10,5300

Графічні порівняння запропонованої кусково-лінійної функції f_{PL} з існуючими аналогами представлені на рис. 1. Отже, точність розрахунку метрик та “м’яких” значень LLR для запропонованого методу декодування PL-log-MAP максимально наближена до оригіналів log-MAP та MAP.

У ході досліджень ТК під час програмно-апаратної реалізації на DSP, отримав подальший розвиток метод комплексного оцінювання обчислювальної складності турбо-декодерів з урахуванням кількості комірок пам’яті m RSC-кодера і загальної кількості символів h з його виходу.

На *першому* етапі методу аналізується гратчаста діаграма RSC-кодера з 2^m станами та визначається загальна кількість переходів зі стану s' до стану s для одного бінарного інформаційного символу.

На *другому* етапі відповідно до методів декодування визначається кількість математичних операцій у виразах для обчислення транзитної, прямої та зворотної метрик, метрики шляху $M_k(s)$ та різниці Δ_i для групи методів SOVA, нормалізованих метрик $\tilde{\alpha}_k(s)$, $\tilde{\beta}_{k-1}(s')$, $\tilde{M}_k(s_k)$, значень $LLR_{аност}$ та $LLR_{зобн}$, а також ”жорстких” рішень декодера $sign(LLR_{аност})$.

На *третьому* етапі всі математичні операції необхідно представити елементарними для DSP. Обмін даними з використанням ТК можна виконувати на базі високопродуктивного 32-розрядного процесору ADSP-2106x сімейства ADSP-21000 з плаваючою точкою. Операція ділення представляється як $c \cdot (1/d)$, експоненціювання приймає форму розкладу функції $\exp(.)$ в ряд на діапазоні $(-\infty; +\infty)$, а логарифмування розглядається як ряд для $\ln(.)$ на діапазоні $(0; +\infty)$. У результаті виконання даного етапу можна отримати аналітичні вирази, що визначають кількість ЕМО, які необхідно виконати для обчислення параметрів різних методів турбо-декодування в ході декодування одного бінарного інформаційного символу.

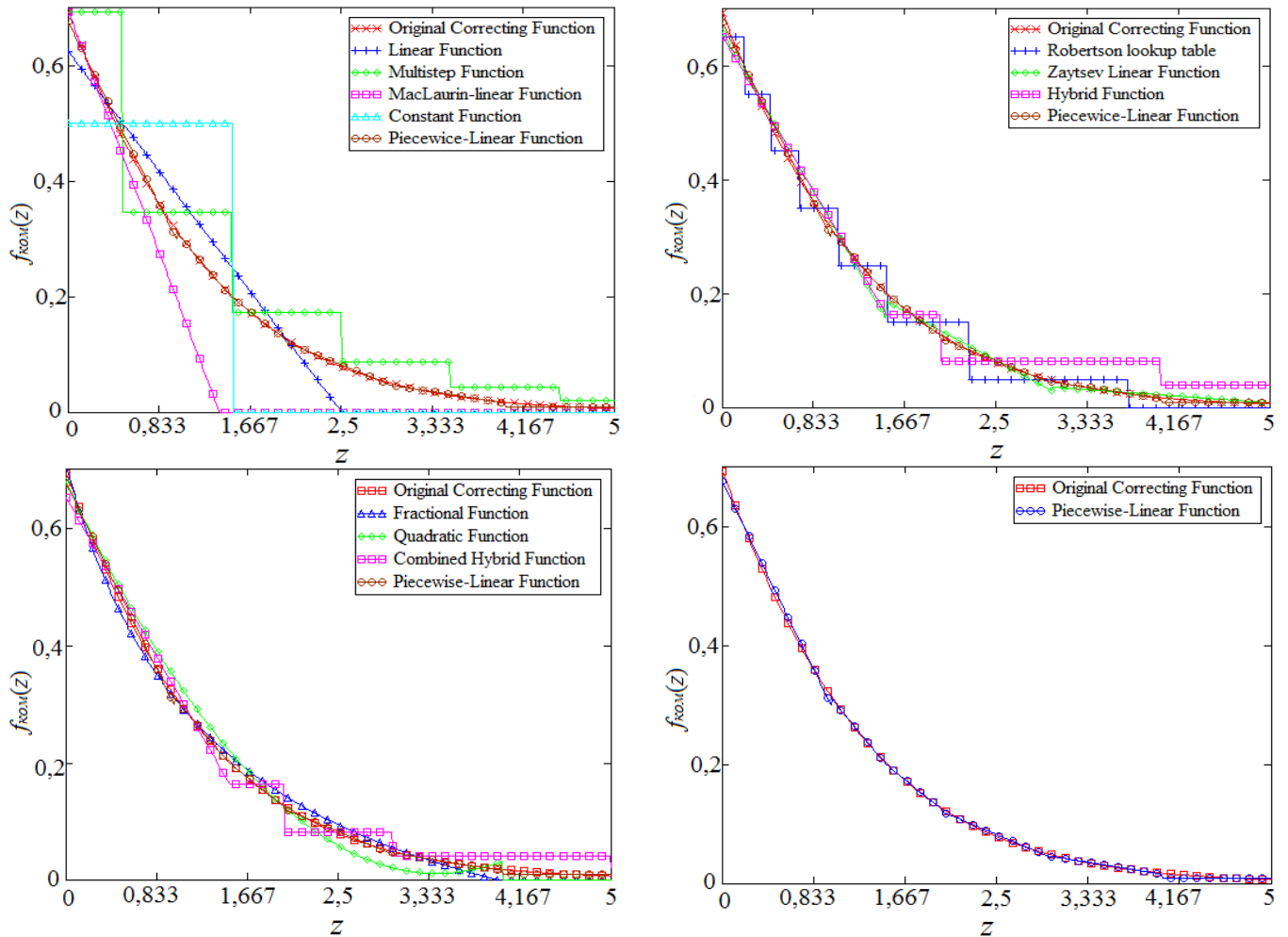


Рисунок 1 – Графічне порівняння існуючих компенсуючих функцій

На *четвертому* етапі необхідно додати всі операції, які необхідно виконати на DSP для декодування одного бінарного інформаційного символу, та отримати загальну кількість ЕМО для кожного з методів турбо-декодування.

$$f_{MAP}(m, h) = 2^{m+2} \cdot h + 153 \cdot 2^{m+1} + 361, \quad (4)$$

$$f_{PL-\log-MAP}(m, h) = 2^{m+2} \cdot h + 33 \cdot 2^{m+1} - 19, \quad (5)$$

$$f_{MLM}(m, h) = 2^{m+2} \cdot h + 11 \cdot 2^{m+1} + 3, \quad (6)$$

$$f_{SOVA}(m, h) = 2^{m+2} \cdot h + 11 \cdot 2^m + 5 \cdot m + 11, \quad (7)$$

$$f_{Bi-SOVA}(m, h) = 2^{m+2} \cdot h + 2^{m+4} + 10 \cdot m + 17. \quad (8)$$

Отже, складність декодування одного бінарного інформаційного символу за показником ЕМО для відповідних методів декодування представляється функцією $f(m, h)$, максимум якої в точці $(+\infty; +\infty)$, а мінімум – $[1; 2]$. Аналіз формул (4)–(8) свідчить про те, що складність реалізації методів декодування ТК зростає у вигляді степеневі функції зі збільшенням m RSC-кодера, а з ростом величини h значення функції збільшується на показник 2^{m+2} . Крім того, при однакових вихідних даних найбільш складним є метод MAP, далі PL-log-MAP, max-log-MAP, Bi-SOVA, а найменш складний – SOVA. Для комплексного порівняльного аналізу обчислювальної

складності методів турбо-декодування доцільно застосувати параметри відносної складності

$$O_i = \frac{N_{iEMO}}{n_{iEMO}}, \quad (9)$$

де N_{iEMO} , n_{iEMO} – відповідно більша та менша кількості ЕМО для методів декодування, які порівнюються.

Результати розрахунків для значень $m \in [1;9]$ та $h \in [2;6]$ представлено у табл. 3, де \uparrow (\downarrow) показує у скільки разів (мінімум та максимум) метод декодування в рядку складніший (простіший) за той, який у стовпці.

Таблиця 3 – Показники O_i для методів турбо-декодування

Методи декодування	MAP	PL-log-MAP	max-log-MAP	Bi-SOVA	SOVA
MAP	1	$\uparrow 3,68 \dots 7,67$	$\uparrow 7,19 \dots 15,7$	$\uparrow 8,22 \dots 13,2$	$\uparrow 9,42 \dots 18,3$
PL-log-MAP	$\downarrow 3,68 \dots 7,67$	1	$\uparrow 1,69 \dots 2,46$	$\uparrow 1,50 \dots 3,06$	$\uparrow 1,87 \dots 3,87$
max-log-MAP	$\downarrow 7,19 \dots 15,7$	$\downarrow 1,69 \dots 2,46$	1	$\uparrow 0,84 \dots 1,23$	$\uparrow 1,10 \dots 1,57$
Bi-SOVA	$\downarrow 8,22 \dots 13,2$	$\downarrow 1,50 \dots 3,06$	$\downarrow 0,84 \dots 1,23$	1	$\uparrow 1,24 \dots 1,39$
SOVA	$\downarrow 9,42 \dots 18,3$	$\downarrow 1,87 \dots 3,87$	$\downarrow 1,10 \dots 1,57$	$\downarrow 1,24 \dots 1,39$	1

Отримані результати можна використовувати для аналізу складності реалізації ТК на DSP з метою вибору елементної бази.

Третій розділ дисертаційної роботи присвячений розробці апаратних та програмних засобів для турбо-декодування даних у розподілених комп'ютерних системах різного функціонального призначення.

Запропоновано використовувати ітеративний декодер ТК, який функціонує з блоком розрахунку метрик (БРМ, рис. 2) та апостеріорних рішень (БРАР, рис. 3) для методу декодування PL-log-MAP, що підвищує швидкодію системи та забезпечує наближення показників декодування до мінімуму ймовірності помилкового декодування кожним елементарним декодером. Алгоритм для розрахунку метрик зображено на рис. 4, де значення A , C та B , F обчислюються за схемою, наведеною на рис. 2, застосовуючи формули (1) і (2). Алгоритм представлений на рис. 5 описує процедуру обчислення апостеріорних рішень декодера в рекурсивній формі. Загальну структурну схему турбо-декодера з використанням наведених модифікацій показано на рис. 6. Алгоритм роботи модифікованого турбо-декодера зображено на рис. 7.

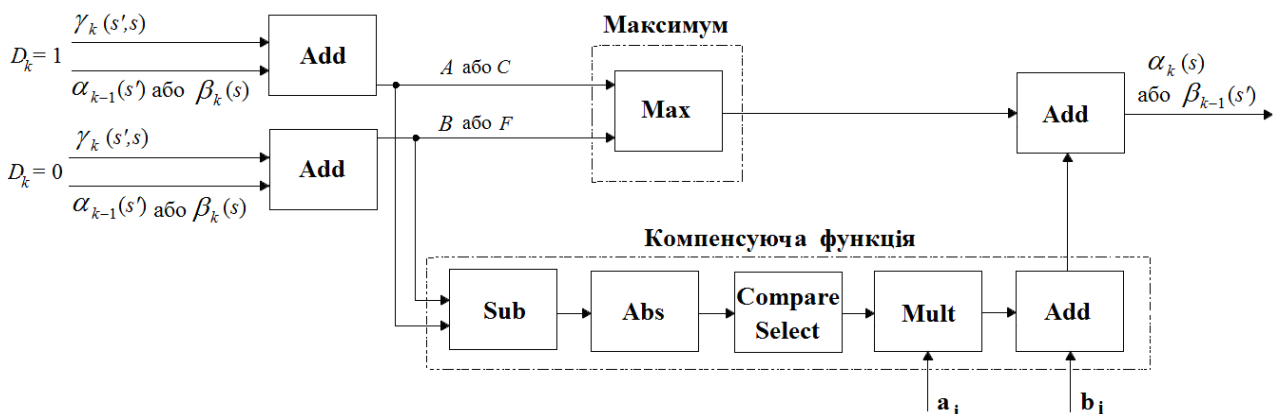


Рисунок 2 – БРМ для модифікованого турбо-декодера

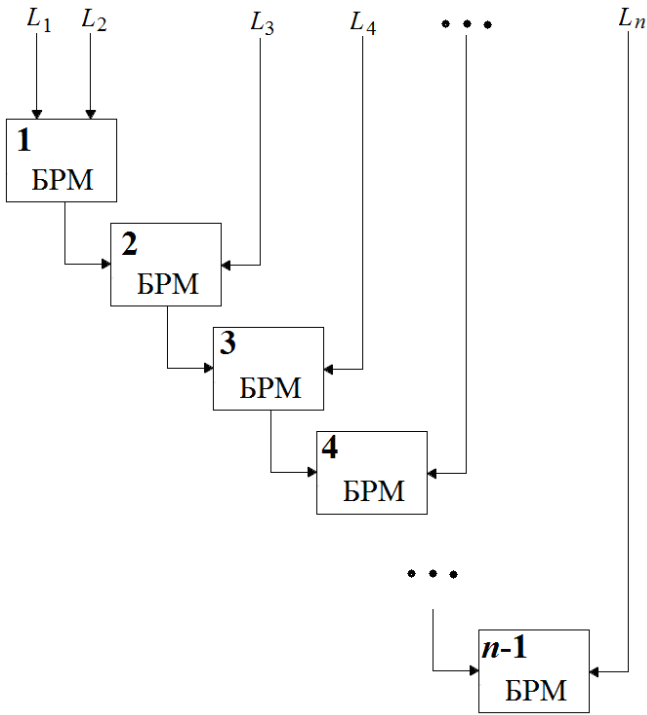


Рисунок 3 – БРАР для модифікованого турбо-декодера

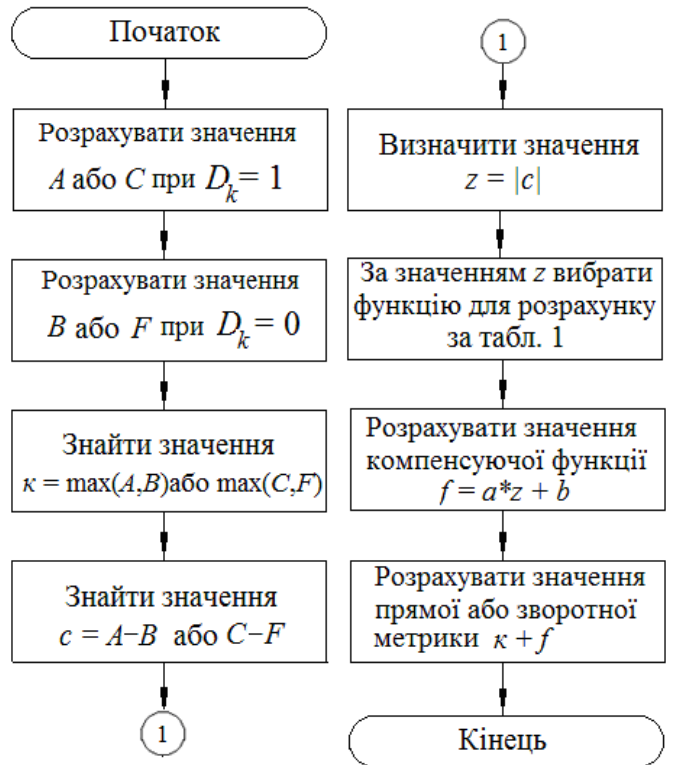


Рисунок 4 – Схема обчислення метрик

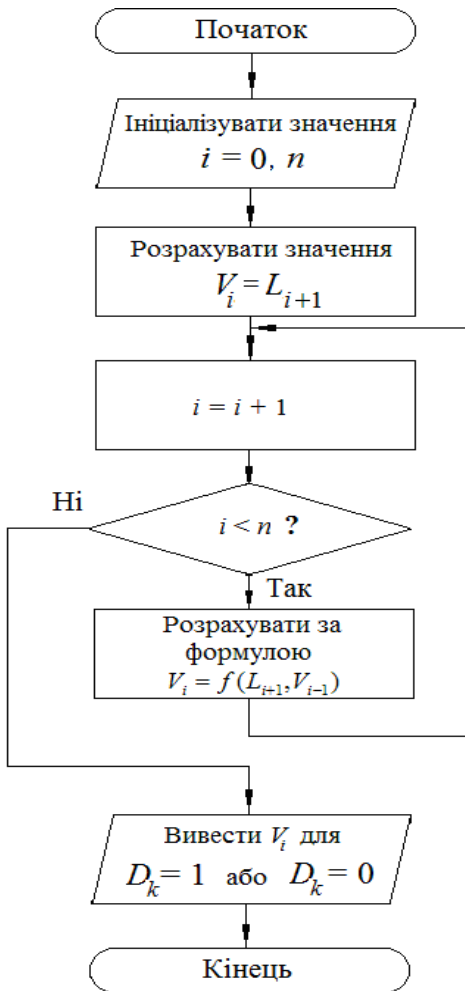


Рисунок 5 – Схема обчислення апостеріорних рішень

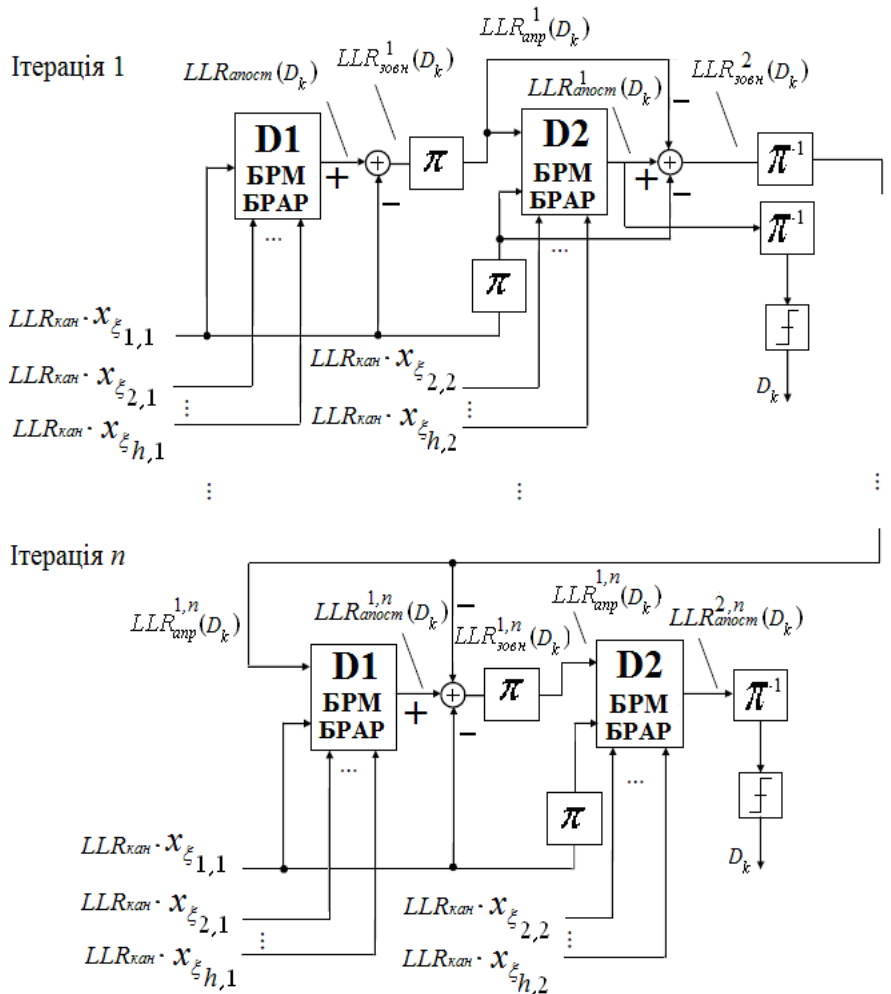


Рисунок 6 – Структурна схема модифікованого турбо-декодера (D1, D2 – декодер 1 та 2 відповідно)

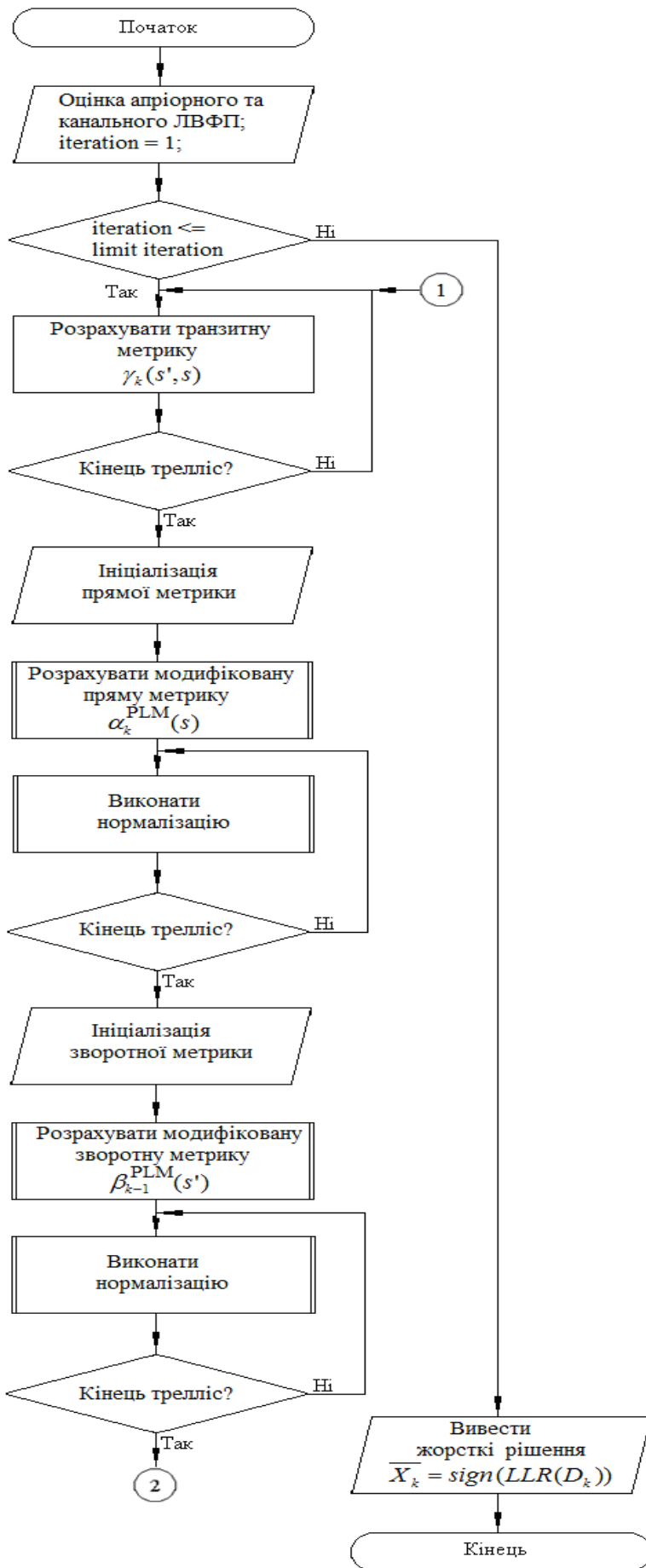


Рисунок 7 – Схема роботи турбо-декодера з PL-log-MAP методом

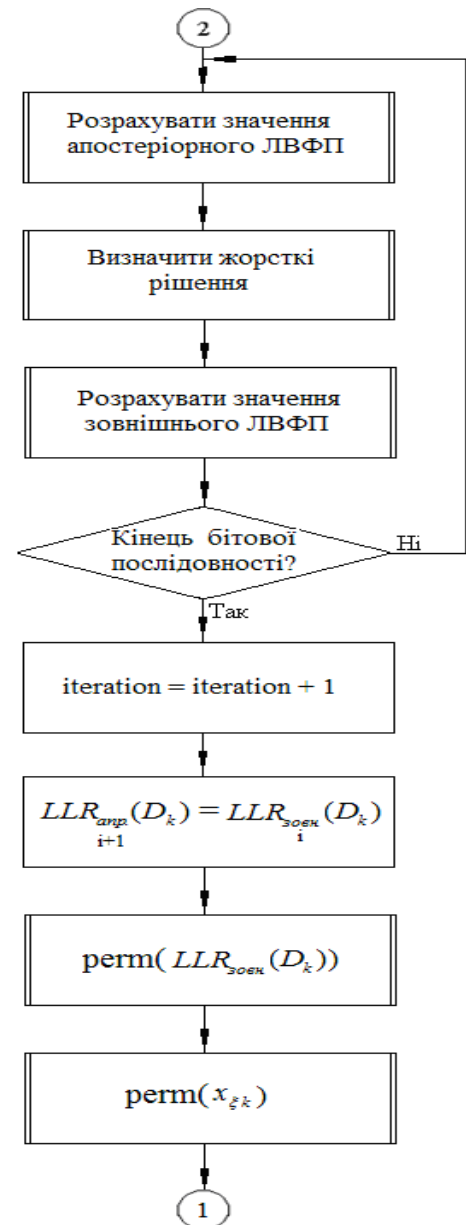


Рисунок 7 – Продовження схеми

Результатом НДР на кафедрі автоматики та інформаційно-вимірювальної техніки ВНТУ стало програмне забезпечення (ПЗ), розроблене у середовищі MatLab, яке дозволяє застосувати турбо-кодек у розподілених комп'ютерних системах різного функціонального призначення. Програма може моделювати процес передавання даних, а також працювати в реальних умовах.

ПЗ дозволяє отримати кінцеву послідовність символів

(текстовий файл, мультимедіа дані); значення BER залежно від E_b/N_0 ; величину часу, впродовж якого передавались дані; швидкість передавання в біт/с; графічні експериментальні залежності $BER = f(E_b/N_0)$ або $BER = f(Q)$, де Q – кількість ітерацій декодування даних. Користувач може взаємодіяти з ПЗ у діалоговому режимі та переглянути результати роботи на екрані комп'ютера у віконному інтерфейсі (рис. 8).

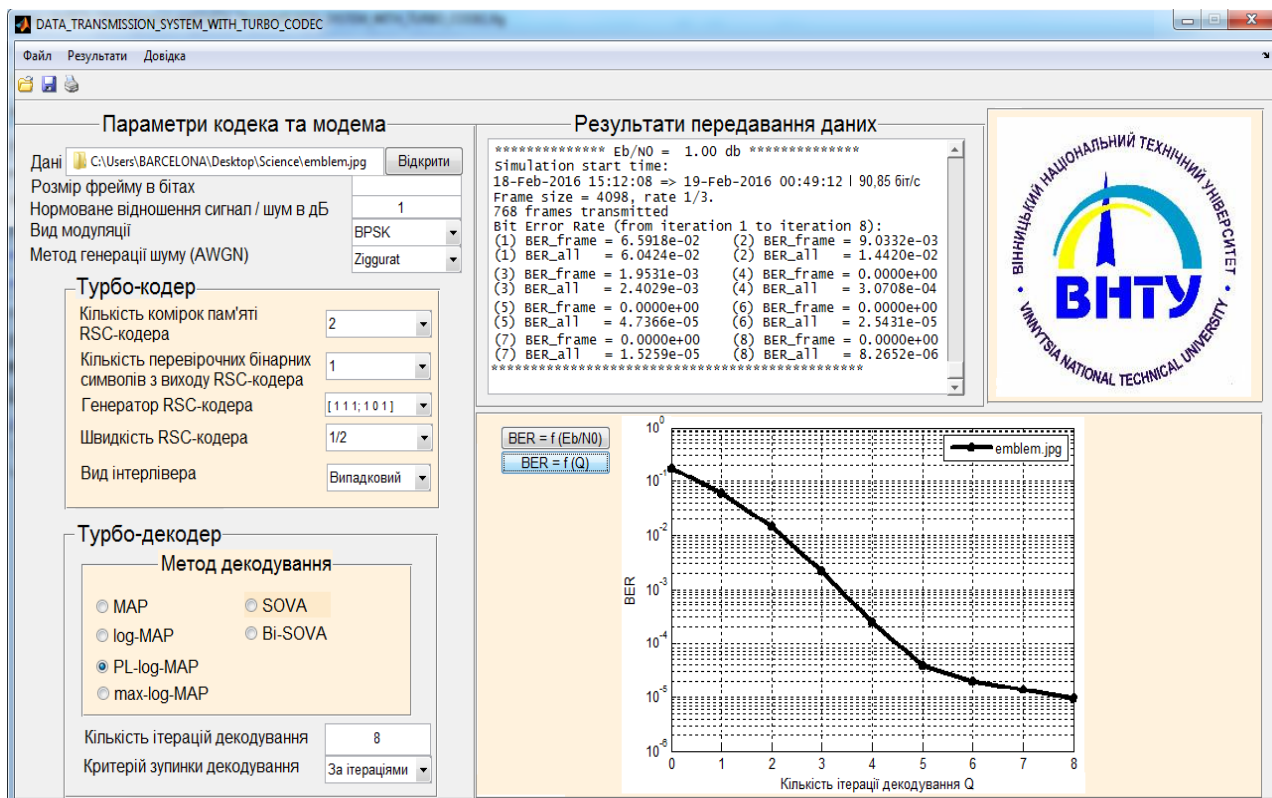


Рисунок 8 – Віконний інтерфейс ПЗ

У четвертому розділі дисертації досліджено метод декодування ТК PL-log-MAP з використанням комп'ютерного імітаційного моделювання (ІМ) методом Монте-Карло, в ході якого отримано певні експериментальні залежності. Після проведення експериментів над мультимедіа даними надано рекомендації щодо використання запропонованого модифікованого методу та відповідних засобів під час роботи розподіленої комп'ютерної системи у реальних умовах.

Використано імітаційну модель системи передавання даних, яка піддається багатократним випробуванням з наступним статистичним обробленням отриманих результатів для оцінювання параметрів досліджуваного процесу, та проведено експерименти. Представлено модель експерименту: BPSK-модем, ТК з двома компонентними RSC-кодерами з генератором $(7, 5)_8$ та швидкістю $R=1/3$, псевдовипадковий інтерлівер з генерацією рівномірно розподілених випадкових величин методом Park-Miller, кодер терміновано за допомогою "хвостовика" $m=2$ бінарних символи, модель каналу з адитивним білим гаусівським шумом (алгоритм Ziggurat); метод декодування PL-log-MAP; моделювання від 0 до 3 дБ з кроком 0,25 дБ; умова закінчення ІМ для кожного значення E_b/N_0 – кількість пакетів, в яких наявні помилки у бінарних символах. Усі проведені експерименти мають аналогічну модель, але з певними змінами та доповненнями.

Експеримент №1. Досліджено робочі характеристики турбо-декодерів з різними методами декодування даних (рис. 9). Використано пакет даних розміром $q=1024$ бінарних символи, максимум 8 ітерацій декодування.

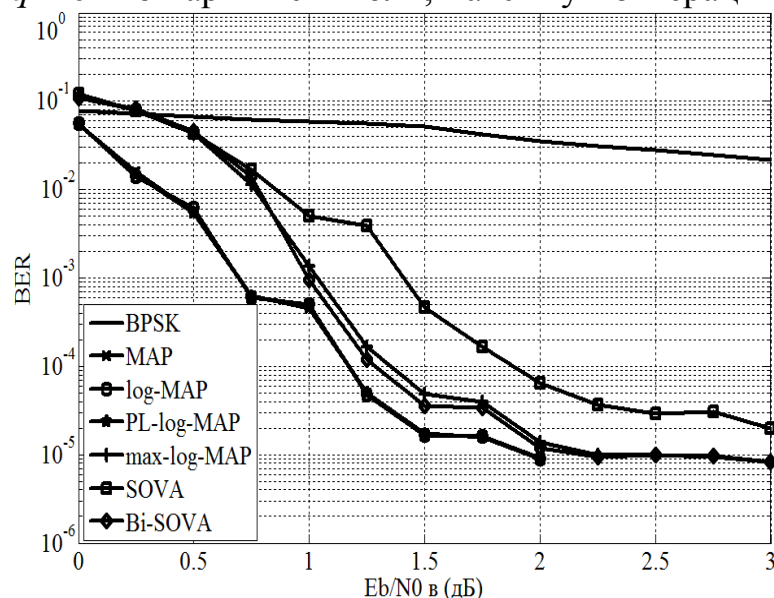


Рисунок 9 – Результати ІМ для експерименту №1

На великих значеннях $E_b/N_0 > 3-4$ дБ показник BER не сильно залежить від компенсуючої функції, тому значення точних методів декодування наближаються до величин BER методу max-log-MAP. Методи MAP, log-MAP, PL-log-MAP дають можливість отримати суттєвий енергетичний вигравш порівняно з SOVA (0,5–0,6 дБ для $BER=10^{-3}-10^{-4}$, $\approx 1,3$ дБ для $BER=10^{-5}$), Bi-SOVA та max-log-MAP (0,1–0,7 дБ), поступово наближаючись до показників останнього.

Експеримент №2. Використано різні значення Q , а саме: від 1 до 8 ітерацій декодування (рис. 10).

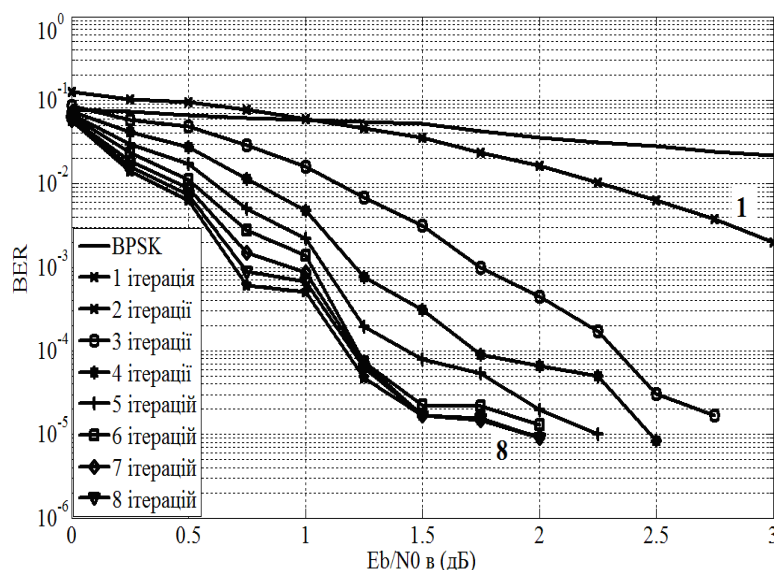


Рисунок 10 – Результати ІМ для експерименту №2

У ході оцінювання статистичних показників класичних методів декодування MAP та log-MAP із запропонованим PL-log-MAP отримано, що останній метод дозволяє досягти значень BER log-MAP ($MAE=2 \cdot 10^{-4}$, $RMSE=0,0005$, $r=0,9998$) та MAP ($MAE=10^{-4}$, $RMSE=0,0004$, $r=0,9997$) методів, але має меншу обчислювальну складність, а відповідно більшу швидкодію декодера. Метод декодування PL-log-MAP краще за існуючі модифікації, особливо на малих показниках E_b/N_0 , до яких log-MAP досить чутливий.

З рис. 10 можна побачити, що результати декодування за методом PL-log-MAP поліпшується при збільшенні Q . Наприклад, при 4 ітераціях роботи турбо-декодера $BER \approx 1,95 \cdot 10^{-5}$ (на 2 дБ), але це ж значення BER досягається для 7 ітерацій декодування даних на показнику $E_b/N_0=1,75$ дБ, тобто енергетичний вигравш від кількості ітерацій складає 0,25 дБ. Зі збільшенням показника E_b/N_0 зменшується кількість ітерацій декодування, які потрібні для досягнення необхідної величини BER.

Крім того, слід зазначити, що при $Q > 8$ можна досягти незначного енергетичного вигравшу при певній величині BER (0,01–0,06 дБ).

Експеримент №3. Застосовано різні швидкості кодування R (0,5, 1/3); 1, 4 та 8 ітерацій декодування; 256, 1024, 4096 бінарних символів у пакеті (рис. 11).

Зменшення швидкості кодування R дозволяє досягти енергетичного виграшу 0,25 дБ для $Q=1$; $\approx 0,5$ дБ для $Q=4$; $\approx 0,75$ дБ для $Q=8$ при $BER \approx 1,4 \cdot 10^{-5}$ (рис. 11а). Аналіз рис. 11б показує, що для пакету розміром 256 бітів енергетичний виграш від застосування $R=1/3$ порівняно з $R=0,5$ складає $\approx 0,5$ дБ; для $q=1024$ біта при $BER \approx 10^{-5} - 1$ дБ; для $q=4096$ бітів при $BER \approx 4 \cdot 10^{-6} - 0,75$ дБ. Великі розміри перемішування дозволяють отримати менші значення BER, тобто існує виграш від інтерлівера. Наприклад, для $R=1/3$ та $q=4096$ бітів величина $BER \approx 9,98 \cdot 10^{-6}$ досягається на показнику $E_b/N_0 = 1$ дБ, близьке значення $BER \approx 8,98 \cdot 10^{-6}$ для 1024 бітів виникає на 2 дБ (виграш ≈ 1 дБ), а для 256 бітів відповідне $BER \approx 8,04 \cdot 10^{-6}$ – на 3 дБ (виграш ≈ 2 дБ).

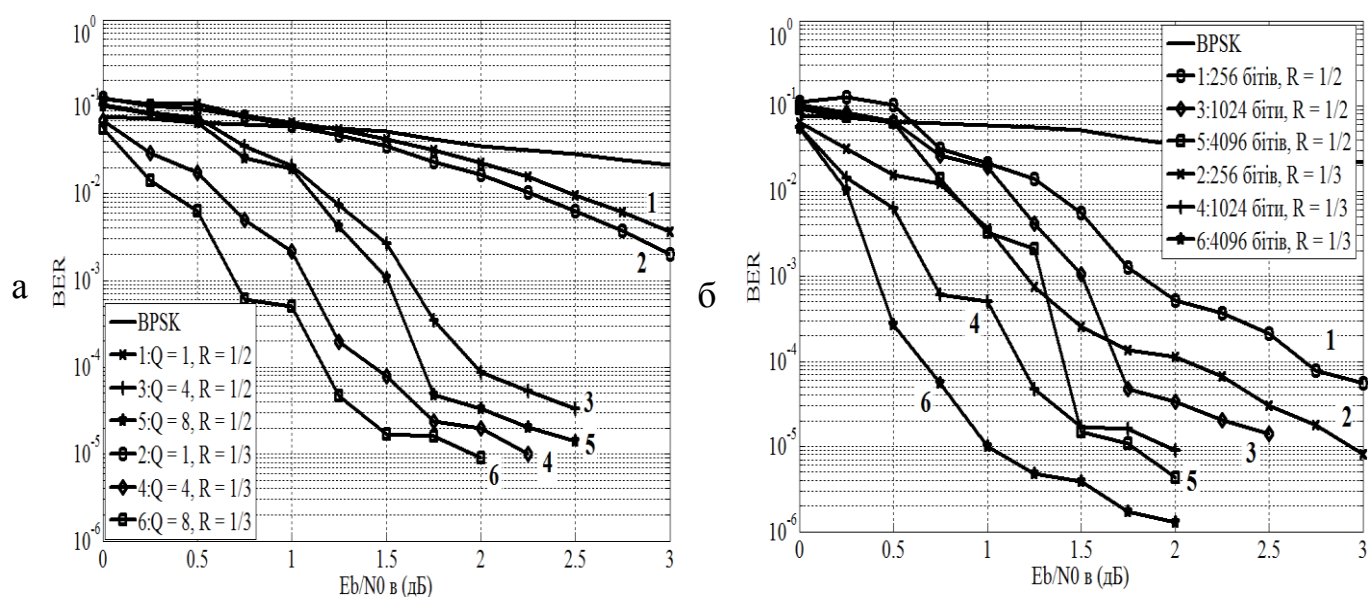


Рисунок 11 – Результати ІМ для експерименту №3

Експеримент №4. Застосовано різні кількості комірок пам'яті кодера (“хвостовики” $m = 2, 3, 4$) та поліноміальні генератори коду ($g_{зв}/g_{np}$), а саме: $(7, 5)_8$, $(15, 17)_8$, $(37, 21)_8$. Результати дослідження наведені на рис. 12.

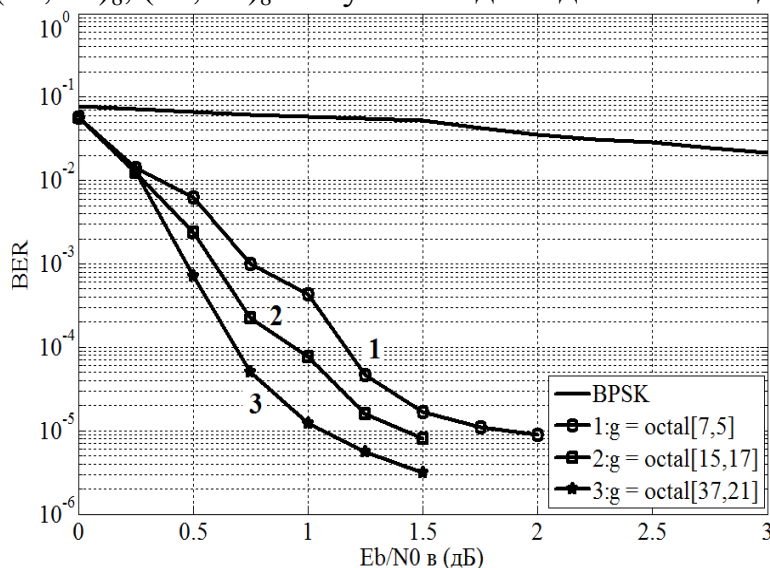


Рисунок 12 – Результати ІМ для експерименту №4

Характеристики роботи методу PL-log-MAP покращуються зі збільшенням комірок пам'яті кодера. Отже, вибір згорткових кодів не лише визначає складність реалізації декодерів, але і впливає на завадостійкість ТК. В асимптотичній області кращим є ТК з більшим показником m компонентного кода. Аналіз рис. 12 на значенні $E_b/N_0 = 1$ дБ показує, що виграш від збільшення m складає $\approx 0,25$ дБ на показнику $BER \approx 10^{-5}$.

Слід зазначити, що зі збільшенням значень Q , q та m відбу-

вається суттєве зростання часових затримок, які пов'язані з обробкою даних.

Наступним етапом було *впровадження* розробленого ПЗ для турбо-декодера та *тестування* системи передавання даних, яке проводилося на комп'ютерних зображеннях в умовах високих значень потужностей шумів ($E_b/N_0=1$ дБ). У процесі роботи використано 3 зображення ((а) – 768 пакетів, $q=4096$ біта; (б) – 681 пакет, $q=3632$ біта; (в) – 768 пакетів, $q=4096$ біта), застосовано метод декодування PL-log-MAP з 1-єю, 4-ма, 8-ма ітераціями декодування. Результати дослідів в мультимедійному вигляді показані на рис. 13, де в правому верхньому куті вказано показник Q , знизу перша цифра вказує на кількість бітових, а цифра в дужках – на кількість символних помилок (SER). Експериментальні залежності наведені на рис. 14.

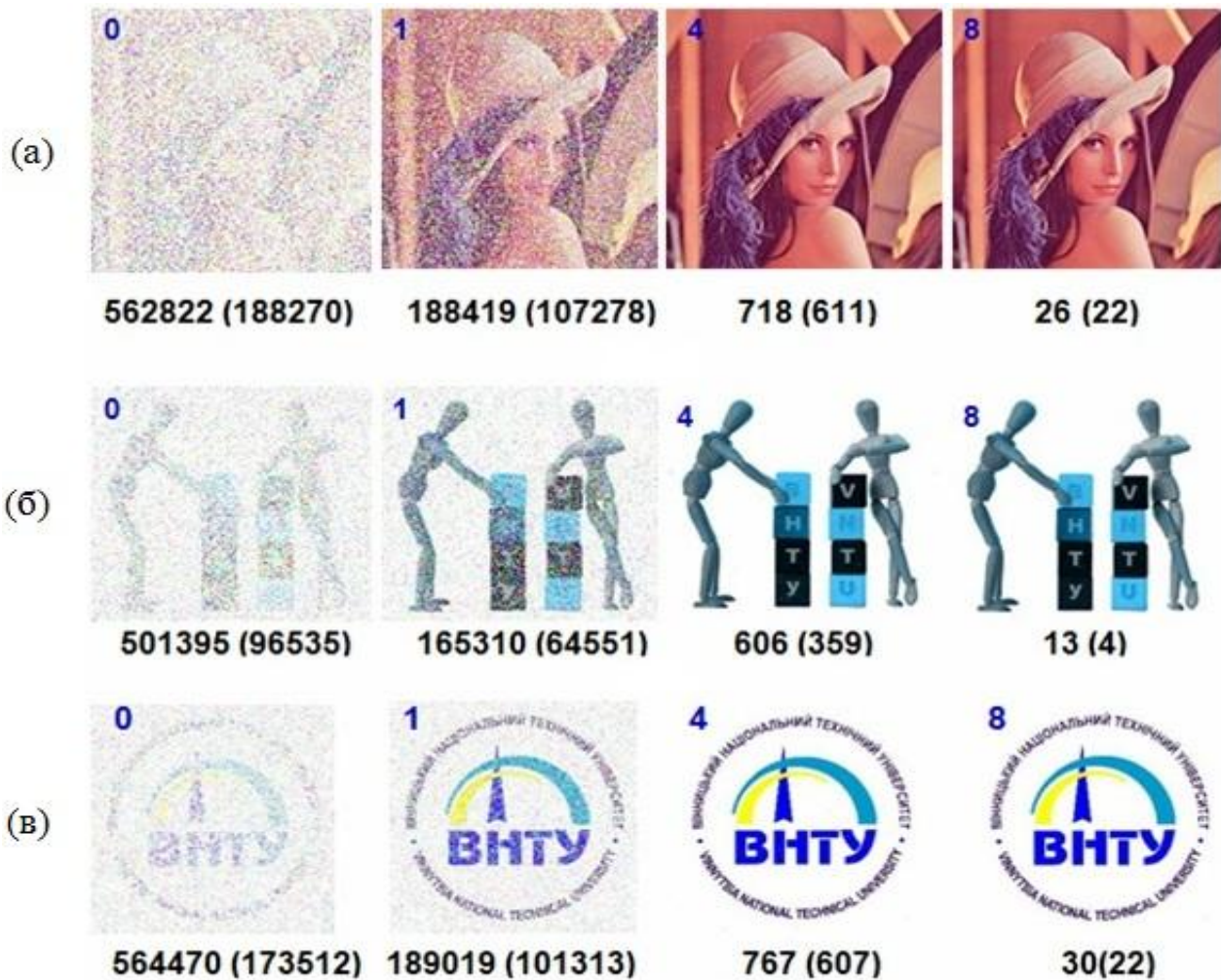


Рисунок 13 – Результати тестування турбо-декодера на мультимедіа даних

З кожною подальшою ітерацією якість переданого зображення покращується, кількість помилок зменшується, причому на $Q=4..8$ зображення суттєво не змінилося, але кількість помилок значно зменшилась. Для зображення lena (а) на 8 ітераціях $BER \approx 8,26 \cdot 10^{-6}$ ($SER \approx 1,12 \cdot 10^{-4}$); для VNTU (б) – $BER \approx 4,66 \cdot 10^{-6}$ ($SER \approx 2,29 \cdot 10^{-5}$); для emblem (в) – $BER \approx 9,54 \cdot 10^{-6}$ ($SER \approx 1,12 \cdot 10^{-4}$). Таким чином, найкращі результати показали експерименти над зображенням (б), що при однакових експериментальних умовах може пояснюватись кращою роботою псевдовипадкового інтерлівера, який дозволив досягти кращого розсіювання пакетних помилок та збільшення ваги кодівих слів на виході другого RSC-кодера.

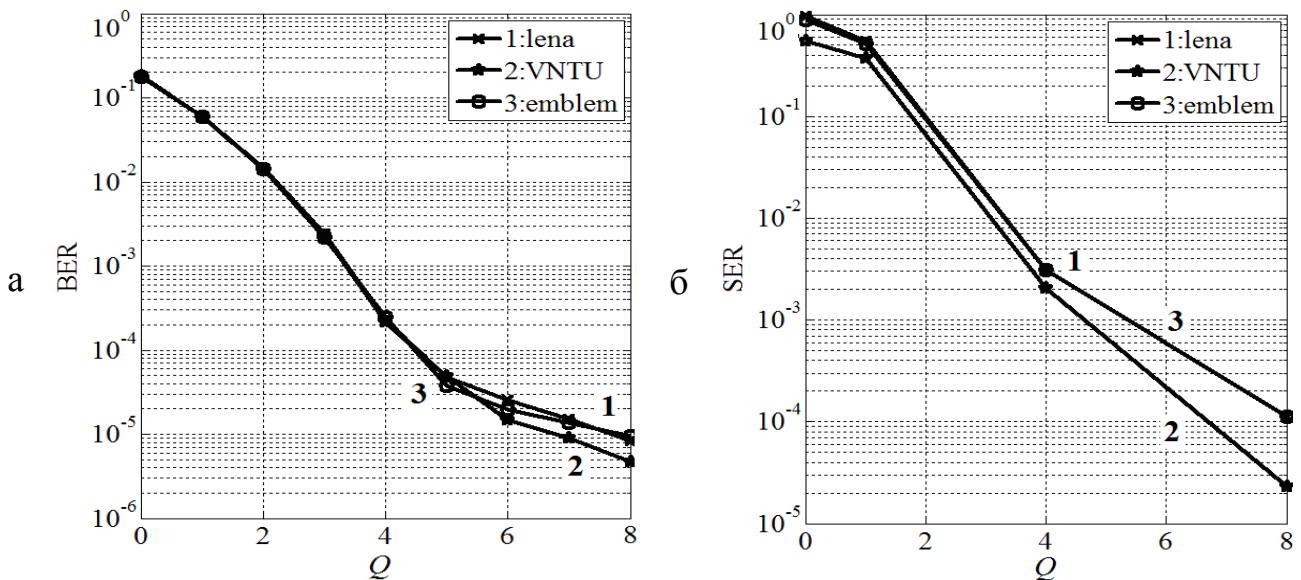


Рисунок 14 – Експериментальні залежності $BER = f(Q)$ (а) та $SER = f(Q)$ (б)

Таким чином, результати експериментів підтвердили високу ефективність ТК, а також коректність теоретичних обґрунтувань для запропонованого методу декодування PL-log-MAP. Їх можна використати для вибору параметрів ТК в процесі планування його експлуатації у розподілених комп'ютерних системах різного функціонального призначення.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-практичну задачу підвищення вірогідності передавання даних і зниження обчислювальної складності декодування шляхом удосконалення каскадної конструкції ТК у розподілених комп'ютерних системах різного функціонального призначення.

1. Проведений аналіз існуючих методів завадостійкого кодування для підвищення вірогідності переданих даних показав, що найбільш перспективною для досліджень є паралельна конкатенація згорткових кодів або ТК, оскільки дозволяє працювати в умовах малого відношення сигнал/шум, дозволяючи досягти показників $BER=10^{-5}-10^{-7}$ (мале відношення E_b/N_0 , від 0 до 3 дБ). На практиці при високих значеннях BER ТК дозволяє досягти енергетичного виграшу близько 5–9 дБ. Але для ТК виникає проблема складності реалізації декодерів, причому потрібно застосовувати методи декодування з м'яким виходом. Використання завадостійких ТК також вимагає ефективної реалізації відповідних обчислювальних методів декодування (MAP, log-MAP, max-log-MAP, SOVA, Bi-SOVA). Особливу цікавість викликає зниження обчислювальної складності без значного зниження характеристик системи передавання даних під час декодування. У ході аналізу також розглянуто сфери застосування ТК.

2. Розглянуто методи декодування MAP та SOVA, а також модифікації log-MAP, max-log-MAP, Bi-SOVA. Запропоновано компенсуючу функцію у складі логарифма Якобіана ($RMSE$ від 0,0013 до 0,0108, коефіцієнт кореляції r змінюється в межах від 0,991 до 0,999), що дозволяє застосовувати логарифм Якобіана в спрощеному вигляді, уникнути обчислення суми експоненціальних складових та логарифмів, зменшивши кількість ЕМО без втрати ефективності турбо-декодування, порівняно з

іншими апроксимаціями компенсуючої функції. Запропонована кусково-лінійна апроксимація функції $f_{кор}$ досить точно корелює з оригіналом ($r=0,9994$) та має похибку апроксимації меншу, ніж подібні аналоги. Показник Θ показує перевагу запропонованої функції над дробовою (на 0,11 %), квадратичною (на 0,2 %), комбінованою гібридною (на 0,37 %), таблицею пошуку Robertson-Wang (на 0,54 %), лінійною Зайцева (на 0,65 %), гібридною (на 0,69 %), лінійною (на 1,34 %), багатокроковою (на 2,38 %), лінійною з рядом С. MacLaurin (на 6,43 %), константною (на 10,53 %) компенсуючими функціями.

3. Запропоновано та теоретично обґрунтовано модифікацію методу турбо-декодування за максимумом апостеріорної імовірності PL-log-MAP з використанням нової процедури обчислення метрик та апостеріорних рішень з виходу декодера, що дозволяє зменшити кількість ЕМО для декодування ТК та досягти значень BER оригінального MAP ($RMSE=0,0004$, $r=0,9997$) та log-MAP ($RMSE=0,0005$, $r=0,9998$) методів, не використовуючи складних для обчислення функцій, таких як логарифм та сума експоненціальних складових. Відносна складність O_i розробленого методу декодування при порівнянні з MAP знаходиться в межах від $f(9;6)=3,68$ до $f(1;2)=7,67$, що свідчить про те, що метод PL-log-MAP простіший для реалізації і використовує меншу кількість ЕМО. Представлено математичну модель модифікованого турбо-декодера.

4. Під час дослідження отримано аналітичні вирази $f(m,h)$, що визначають кількість ЕМО, які необхідно виконати для реалізації декодування бінарного інформаційного символу на DSP при використанні різних методів турбо-декодування, враховуючи PL-log-MAP, SOVA та Bi-SOVA, з урахуванням кількості комірок пам'яті $m \in [1;9]$ для RSC-кодера і загальної кількості символів $h \in [2;6]$ з виходу RSC-кодера.

5. Визначено, що найбільш зручним є програмно-апаратний режим обміну даними з використанням турбо-кодека на базі мікропроцесорної структури. Запропоновано алгоритми та розроблено структурні схеми для блоків обчислення метрик та апостеріорних рішень з виходу декодера. Представлено алгоритм декодування PL-log-MAP та наведено відповідну структурну схему.

6. Побудовано імітаційну модель системи передавання даних з турбо-кодеком. Залежно від основних критеріїв обґрунтовано вибір мови програмування та середовища розробки. Середовище MatLab (мова M-language) вибрано головним інструментом для розробки програмних модулів у ході розв'язання поставленої науково-практичної задачі.

7. Розроблені програмні засоби для забезпечення потрібної вірогідності передавання при певному рівні E_b/N_0 у каналах передавання даних і подальшого оцінювання ймовірнісно-енергетичних характеристик ТК з використанням різних методів декодування. Виконано експериментальне дослідження передавання зображень різних типів, отримані чисельні характеристики і надані рекомендації щодо використання розробленого модифікованого методу в реальних умовах. Аналітичні вирази для оцінки складності роботи декодера використані для аналізу складності ТК при його програмно-апаратній реалізації. Результати дисертаційного дослідження впроваджені на ПП "ТВА-Сервіс", ТОВ "Медичний центр "Альтамедіка плюс", ВНМУ імені М.І. Пирогова та застосовувались у навчальному процесі ВНТУ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кулик А.Я. Турбо-код: властивості та застосування для завадостійкого кодування / А.Я. Кулик, С.Г. Кривогубченко, Ю.Ю. Іванов // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2011. – № 2(22). – С. 25-32.
2. Кулик А.Я. Декодування та реалізація алгоритму ВСJR для турбо-коду стандартизованого в DVB-RCS / А.Я. Кулик, Д.С. Кривогубченко, Ю.Ю. Іванов // Вісник Сумського державного університету. Серія: Технічні науки. – 2012. – Т. 4. – № 1. – С. 84-94.
3. Кулик А.Я. Апаратна реалізація декодера SOVA з "м'яким" 3-бітовим квантованим виходом / А.Я. Кулик, Ю.Ю. Іванов // Цифрові технології. – 2012. – № 12. – С. 15-22.
4. Кулик А.Я. Апаратна реалізація MAP декодера для турбо-кодів / А.Я. Кулик, С.Г. Кривогубченко, Ю.Ю. Іванов // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2012. – № 2. – С. 48-53.
5. Кулик А.Я. Апаратна реалізація log-MAP декодера для турбо-кодів [Електронний ресурс] / А.Я. Кулик, С.Г. Кривогубченко, Ю.Ю. Іванов // Вісник НУК. – 2012. – № 4. – С. 288-292. – Режим доступу: <http://ev.nuos.edu.ua/ru/publication?publicationId=19560>.
6. Васюра А.С. Застосування завадостійкого ітеративного турбо-коду в стандарті цифрового супутникового телебачення DVB-S / А.С. Васюра, А.Я. Кулик, Ю.Ю. Іванов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2012. – № 3. – С. 64-68.
7. Кулик А.Я. Порівняльний аналіз складності реалізації методів декодування турбо-кодів / А.Я. Кулик, С.Г. Кривогубченко, Ю.Ю. Іванов // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2013. – № 1(26). – С. 26-31.
8. Кулик А.Я. Концепція роботи систем мобільного зв'язку 3G із застосуванням алгебри логарифма функції правдоподібності для алгоритму декодування Vi-SOVA / А.Я. Кулик, Ю.Ю. Іванов // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. – 2013. – № 2(18). – С. 84-91.
9. Модифікації для зниження вичислельної складності алгоритма декодування ВСJR MAP в турбо-кодових конструкціях / О.В. Стукач, А.Н. Романюк, А.Я. Кулик, Ю.Ю. Іванов // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. – 2015. – № 1(20). – С. 107-112.
10. Іванов Ю.Ю. Особливості апаратно-програмної реалізації турбо-кодів: порівняльний аналіз складності реалізації на цифровому сигнальному процесорі / Ю.Ю. Іванов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 3(126). – С. 94-101.
11. Ivanov Y. A Viterbi Algorithm as a Key to Decoding Turbo-Code / Y. Ivanov, A. Kulyk, S. Krivogubchenko // Nauka i studia. – 2012. – № 11(56). – P. 60-65.
12. Ivanov Y. Using Gudermannian to Improve the Turbo-Code Mathematical Principles in 3G Communication Systems / Y. Ivanov, A. Kulyk, A. Romanyuk // Proceedings on X IEEE International Siberian Conference on Control and Communications. – 2013. – P. 1-3. – Access mode: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=6693580>.

13. A Novel Suboptimal Piecewise-Linear-log-MAP Algorithm for Turbo Decoding / Yu.Yu. Ivanov, A.N. Romanyuk, A.Ia. Kulyk, O.V. Stukach // Proceedings on XI IEEE International Siberian Conference on Control and Communications. – 2015. – P. 1-8. – Access mode: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84941086462&origin=inward&txGid=0>.

14. Програмна реалізація турбо-декодера з обробленням метрик за допомогою алгоритму MAP / А.Я. Кулик, С.Г. Кривогубченко, Д.С. Кривогубченко, Ю.Ю. Іванов // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической интернет-конференции “Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании”: технические науки. – Т. 12. – № 4. – 2012. – С. 35-40.

15. Кулик А.Я. Застосування гіперболічних функцій для роботи з турбо-кодами у розподілених комп'ютерних системах різного функціонального призначення / А.Я. Кулик, Ю.Ю. Іванов // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции “Современные информационные и электронные технологии”. – Одеса, 2013. – С. 190-192.

16. Кулик А.Я. Перспективи застосування турбо-коду в інформаційно-вимірjuвальних системах та системах контролю / А.Я. Кулик, Ю.Ю. Іванов // Матер. І міжнародної наукової конференції “Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах”: тези доповідей. – Вінниця, 2011. – С. 189.

17. Кулик А.Я. Перспективи застосування турбо-кодів у системах передавання даних [Електронний ресурс] / А.Я. Кулик, Ю.Ю. Іванов // Матер. ХЛІ науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету за участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області: тези доповідей. – Вінниця, 2012. – Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2012/inaeksu/txt/ivanov.pdf>.

18. Кулик А.Я. Декодування турбо-коду в розподілених комп'ютерних системах різного функціонального призначення з використанням SOVA / А.Я. Кулик, С.Г. Кривогубченко, Ю.Ю. Іванов // Матер. міжнародної науково-технічної конференції “Информационные системы и технологии”: тези доповідей. – Морське (АР Крим)-Харків, 2012. – С. 45.

19. Іванов Ю.Ю. Застосування турбо-кодів у розподілених комп'ютерних системах різного функціонального призначення / Ю.Ю. Іванов, А.Я. Кулик // Матер. VI міжнародної конференції з оптико-електронних інформаційних технологій “Photonics-ODS”: тези доповідей. – Вінниця, 2012. – С. 31.

20. Кулик А.Я. Методи та засоби декодування турбо-кодів у розподілених комп'ютерних системах різного функціонального призначення [Електронний ресурс] / А.Я. Кулик, Ю.Ю. Іванов // Матер. ХЛІІ науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету за участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області: тези доповідей. – Вінниця, 2013. – Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2013/inaeksu/txt/ivanov.pdf>.

21. Ivanov Y.Y. Expansion for the Mathematical Apparatus of the Algebra Logarithm of the Likelihood Function for the Turbo-Codes in Distributed Computer Systems of

Different Functional Purposes / Y.Y. Ivanov // Materials of the international scientific and practical conference “News of the Advanced Science”: abstracts. – Sofia (Bulgary), 2013. – P. 34-37.

22. Алгоритми моделювання шуму у каналах зв'язку Гауса та Релея для аналізу роботи турбо-кодових конструкцій у системах цифрового передавання інформації / Ю.Ю. Іванов, А.Я. Кулик, С.Г. Кривогубченко, Д.С. Кривогубченко // Матер. II міжнародної наукової конференції “Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах”: тези доповідей. – Вінниця, 2013. – С. 68-70.

23. Іванов Ю.Ю. О некоторых аспектах итеративной стратегии декодирования турбо-кодов: ретроспектива и ”турбо”-принцип / Ю.Ю. Іванов, А.Я. Кулик // Матер. IV международной научно-практической конференции “Информационные технологии и компьютерная инженерия”: тезисы докладов. – Винница, 2014. – С. 157-160.

24. Кулик А.Я. Види інтерліверів у турбо-кодових конструкціях для цифрових систем зв'язку різного функціонального призначення / А.Я. Кулик, Ю.Ю. Іванов // Матер. XIII міжнародної науково-технічної конференції “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах”: тези доповідей. – Одеса-Хмельницький, 2014. – С. 124.

25. Кулик А.Я. Методи оцінювання ефективності інтерліверів у турбо-кодовій конструкції / А.Я. Кулик, Ю.Ю. Іванов // Матер. III науково-технічної конференції “Обчислювальні методи і системи перетворення інформації”: тези доповідей. – Львів, 2014. – С. 161-164.

26. Задача оцінювання ефективності роботи турбо-декодера з використанням метрики циклічної кореляційної суми / А.Я. Кулик, С.Г. Кривогубченко, Д.С. Кривогубченко, Ю.Ю. Іванов // Матер. XII міжнародної конф. “Контроль і управління в складних системах”: тези доповідей. – Вінниця, 2014. – С. 41.

27. Kulyk A.Ya. The Turbo-codes Application in Telemedicine Systems with the Wireless Body Area Sensor Networks / A.Ya. Kulyk, Yu.Yu. Ivanov, I.Yu. Ivanov // Матер. XII міжнародної конференції “Контроль і управління в складних системах”: тези доповідей. – Вінниця, 2014. – С. 206.

28. Іванов Ю.Ю. Система передавання даних з використанням турбокоду в медичному телеметричному комплексі / Ю.Ю. Іванов, А.Я. Кулик, І.Ю. Іванов // Матер. VII міжнародної конференції з оптико-електронних інформаційних технологій ”Photonics-ODS”: тези доповідей. – Вінниця, 2015. – С. 65.

29. Ivanov Yu. Principles and Comparison of Stopping Rules for Turbo Decoders / Yu. Ivanov, A. Kulyk // Матер. V міжнародної науково-практичної конференції “Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія”: тези доповідей. – Івано-Франківськ–Вінниця, 2015. – С. 87-88.

30. Алгоритм турбо-декодування PL-log-MAP для цифрової системи передавання даних у складі телемедичного комплексу / А.Я. Кулик, С.Г. Кривогубченко, Ю.Ю. Іванов, І.Ю. Іванов // Матер. III міжнародної наукової конференції “Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах”: тези доповідей. – Вінниця, 2015. – С. 118.

31. Іванов Ю.Ю. Новий кусково-лінійний алгоритм log-MAP для турбо-декодування в цифрових системах зв'язку [Електронний ресурс] / Ю.Ю. Іванов, А.Я. Кулик, С.Г. Кривогубченко // Матер. XLV науково-технічної конференції про-

фесорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету за участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області: тези доповідей. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – Режим доступу: <http://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2016/paper/view/128>.

32. А.с. № 45410 України. Комп'ютерна програма "Декодер турбо-коду на основі алгоритму log-MAP для зниження обчислювальної складності з використанням логарифму Якобіана" / Ю.Ю. Іванов. – К.: Державний департамент інтелектуальної власності України. – Опубл. 03.09.2012.

33. А.с. № 45411 України. Комп'ютерна програма "Декодер на основі алгоритму BCJR (MAP) для турбо-коду стандартизованого в мережі DVB-RCS" / Ю.Ю. Іванов. – К.: Державний департамент інтелектуальної власності України. – Опубл. 03.09.2012.

34. А.с. № 45412 України. Комп'ютерна програма "Декодер турбо-коду на основі використання апроксимації за максимумом (max-log-MAP) для застосування в інформаційних системах" / Ю.Ю. Іванов. – К.: Державний департамент інтелектуальної власності України. – Опубл. 03.09.2012.

35. А.с. № 45413 України. Комп'ютерна програма "Клієнт-серверний додаток з використанням ітеративного завадостійкого турбо-коду для передавання інформації у складних комп'ютерних мережах" / Ю.Ю. Іванов. – К.: Державний департамент інтелектуальної власності України. – Опубл. 03.09.2012.

36. А.с. № 45414 України. Комп'ютерна програма "Декодер турбо-кодів на основі SOVA для застосування в розподілених комп'ютерних системах різного функціонального призначення" / Ю.Ю. Іванов. – К.: Державний департамент інтелектуальної власності України. – Опубл. 03.09.2012.

37. А.с. № 45415 України. Комп'ютерна програма "Емулятор роботи завадостійкого дуобінарного турбо-коду для стандарту цифрового супутникового телебачення DVB-S" / Ю.Ю. Іванов. – К.: Державний департамент інтелектуальної власності України. – Опубл. 03.09.2012.

38. А.с. № 60431 України. Комп'ютерна програма "Цифрова система передавання даних з використанням турбо-кодових конструкцій в медичному телеметричному комплексі" / Ю.Ю. Іванов, І.Ю. Іванов. – К.: Державний департамент інтелектуальної власності України. – Опубл. 01.07.2015.

39. А.с. № 60432 України. Комп'ютерна програма "Декодер турбо-кода на основі нового субоптимального кусочно-лінійного алгоритму PL-log-MAP для застосування в інформаційних системах" / Ю.Ю. Іванов. – К.: Державний департамент інтелектуальної власності України. – Опубл. 01.07.2015.

40. А.с. № 60433 України. Комп'ютерна програма "Емулятор роботи цифрової розподіленої комп'ютерної системи зв'язку з використанням турбо-кода та субоптимального кусочно-лінійного алгоритму декодування log-MAP" / Ю.Ю. Іванов. – К.: Державний департамент інтелектуальної власності України. – Опубл. 01.07.2015.

41. А.с. № 60434 України. Комп'ютерна програма "Інтерлівер для турбо-коду на основі алгоритма Simulated Annealing з використанням критерію ефективності за екстремумами функцій дисперсії та метрики циклічної кореляційної суми" /

Ю.Ю. Иванов. – К.: Державний департамент інтелектуальної власності України. – Опубл. 01.07.2015.

42. А.с. № 60435 України. Комп'ютерна програма “Програмний комплекс для роботи телеехографічної системи діагностики з віддаленим доступом” / Ю.Ю. Иванов, І.Ю. Иванов. – К.: Державний департамент інтелектуальної власності України. – Опубл. 01.07.2015.

АНОТАЦІЯ

Іванов Ю.Ю. Завадостійке декодування турбо-кодів у розподілених комп'ютерних системах. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2016.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної науково-практичної задачі підвищення вірогідності передавання даних і зниження обчислювальної складності декодування шляхом удосконалення турбо-кової конструкції у розподілених комп'ютерних системах різного функціонального призначення. Запропоновано метод декодування турбо-кодів PL-log-MAP, який дозволяє знизити обчислювальну складність, а відповідно підвищити швидкодію турбо-декодера, без втрати ефективності декодування даних. Розроблено математичну модель турбо-декодера зі спрощеним розрахунком метрик та апостеріорних значень. Для існуючих методів декодування турбо-кодів отримано функціональні залежності, які дозволяють виконати порівняльний аналіз обчислювальної складності декодування даних. На основі теоретичних положень розроблені апаратні засоби та програмне забезпечення для оцінювання характеристик процесу передавання даних.

Ключові слова: передавання даних, завадостійке кодування / декодування, турбо-код, ітеративні декодери, методи декодування MAP, log-MAP, PL-log-MAP, max-log-MAP, SOVA, Bi-SOVA, обчислювальна складність декодування, коефіцієнт бітових помилок.

АННОТАЦИЯ

Иванов Ю.Ю. Помехоустойчивое декодирование турбо-кодов в распределённых компьютерных системах. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2016.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-практической задачи повышения достоверности передачи данных и снижения вычислительной сложности декодирования путем усовершенствования турбо-кової конструкции в распределённых компьютерных системах различного функционального назначения.

Использование помехоустойчивых турбо-кодов требует эффективной реализации соответствующих вычислительных методов декодирования. Для турбо-кодов разработаны методы минимизации ошибки для бинарного информационного символа (MAP) и для всей последовательности символов (SOVA). Метод декодирования

MAP позволяет достичь меньших значений коэффициента битовых ошибок (BER), но имеет большую вычислительную сложность. Особый интерес вызывает уменьшение его вычислительной сложности без значительного снижения характеристик системы передачи данных. В диссертационной работе предложен метод декодирования турбо-кодов PL-log-MAP, который позволяет снизить вычислительную сложность, а соответственно повысить быстродействие турбо-декодера, без потери эффективности декодирования данных.

В работе разработана математическая модель турбо-декодера с упрощенным вычислением метрик и апостериорных значений с выхода турбо-декодера, в которой не используются логарифмы и суммы экспоненциальных составляющих. Для вычислений логарифма Якобиана предложено использовать кусочно-линейную компенсирующую функцию, значения которой коррелируют со значениями оригинальной функции на 0,11...10,53 % выше по сравнению с известными аналогами.

В ходе исследований нашел дальнейшее развитие метод определения вычислительной сложности турбо-декодирования, особенностью которого является комплексный учет всех элементарных математических операций, необходимых для декодирования с использованием цифровых сигнальных процессоров. Для существующих методов декодирования турбо-кодов получены функциональные зависимости, позволяющие выполнить сравнительный анализ вычислительной сложности декодирования данных, учитывая количество ячеек памяти кодера и символов с выхода сверточного кодера. Причем впервые получены такие аналитические выражения для методов декодирования PL-log-MAP, SOVA и Bi-SOVA. Показано, что при одинаковых исходных условиях наиболее сложный в вычислительном плане метод MAP, далее PL-log-MAP, max-log-MAP, Bi-SOVA и SOVA. Определено, что сложность реализации методов декодирования турбо-кодов растет в виде степенной функции с увеличением памяти сверточного кодера. Метод PL-log-MAP проще MAP в 3,68...7,67 раза для реализации на цифровом сигнальном процессоре, то есть требует меньшего количества элементарных математических операций.

На основе теоретических положений разработаны аппаратные средства, а также программное обеспечение для системы передачи данных с турбо-кодеком, чтобы оценить характеристики процесса передачи данных с использованием разных методов декодирования турбо-кодов. Для решения задач анализа, синтеза и эксплуатации турбо-кодов в распределенных компьютерных системах проведено компьютерное имитационное моделирование методом Монте-Карло. После проведения экспериментов сформулированы рекомендации по применению разных методов турбо-декодирования в соответствии с необходимыми вероятностными и энергетическими характеристиками процесса передачи данных. Результаты исследований были использованы для практического внедрения, что позволило повысить эффективность передачи данных в условиях сильных помех и достичь необходимого показателя BER на определенном уровне нормированного значения сигнал/шум.

Ключевые слова: передача данных, помехоустойчивое кодирование / декодирование, турбо-код, итеративные декодеры, методы декодирования MAP, log-MAP, PL-log-MAP, max-log-MAP, SOVA, Bi-SOVA, вычислительная сложность декодирования, коэффициент битовых ошибок.

ABSTRACT

Ivanov Yu.Yu. Error-correction decoding of turbo-codes in distributed computer systems. – Manuscript.

Thesis for the scientific degree of the Candidate of Technical Sciences (PhD in technical sciences) in speciality 05.13.05 – Computer Systems and Components. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2016.

The thesis is devoted to solving actual scientific and practical task of increasing reliability of the transmitted data and reducing the computational decoding complexity by improving turbo-code design in distributed computer systems of different functional purposes. The method PL-log-MAP for decoding turbo-codes has been proposed, which can reduce the computational complexity, and accordingly improve the performance of turbo-decoder, without loss in the data decoding efficiency. The mathematical model of the turbo-decoder with a simplified calculations for metrics and a posteriori values has been developed. For the existing methods of turbo-codes decoding have been obtained functional relationships, which allow to perform comparative analysis of the computational decoding complexity. On the basis of the theoretical background have been developed hardware and software modules to evaluate the characteristics of the transmission data process.

Keywords: data transmission, error-correction coding / decoding, turbo-code, iterative decoders, MAP, log-MAP, PL-log-MAP, max-log-MAP, SOVA, Bi-SOVA decoding methods, computational decoding complexity, bit error rate.

Підписано до друку 26.10.2016 р. Формат 29.7×42 ¼
Наклад 100 прим. Зам. № 2016-226

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. Тел. 59-81-59
publish.vntu.edu.ua; email: kivc.vntu@gmail.com
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.