

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

ШТОМПЕЛЬ МИКОЛА АНАТОЛІЙОВИЧ



УДК 621.391

**МЕТОДИ ДЕКОДУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ЗАВАДОСТІЙКИХ КОДОВИХ
КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Українському державному університеті залізничного транспорту
Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Приходько Сергій Іванович,
Український державний університет
залізничного транспорту,
проректор з науково-педагогічної роботи

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Климаш Михайло Миколайович,
Національний університет
«Львівська політехніка»,
завідувач кафедри телекомунікацій

доктор технічних наук, професор
Козелков Сергій Вікторович,
Державний університет телекомунікацій,
директор Навчально-наукового інституту
телекомунікацій та інформатизації

доктор технічних наук, доцент
Корчинський Володимир Вікторович,
Одеська національна академія
зв'язку ім. О.С. Попова,
доцент кафедри інформаційної безпеки та
передачі даних

Захист відбудеться «19» жовтня 2018 року о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 64.820.01 в Українському державному університеті залізничного
транспорту за адресою: 61050, м. Харків, площа Фейербаха, 7

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Українського державного
університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків,
площа Фейербаха, 7

Автореферат розісланий «14» вересня 2018 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



К.А. Трубчанінова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з обов'язкових умов розвитку інформаційної спільноти в Україні є постійне удосконалення національної телекомунікаційної інфраструктури. Для цього при побудові телекомунікаційних систем та мереж різних видів необхідно використовувати сучасні телекомунікаційні технології, стандарти та протоколи, які реалізуються за допомогою цифрового обладнання. Телекомунікаційна інфраструктура держави повинна задовольняти ряду вимог, серед яких важливе значення має забезпечення заданої достовірності передачі інформації. Типовим підходом до вирішення даної задачі є застосування завадостійких кодових конструкцій при технічній реалізації телекомунікаційних систем та мереж. Гетерогенність існуючої телекомунікаційної інфраструктури та відмінність у вимогах до достовірності передачі інформації в залежності від виду телекомунікаційної послуги, характеристик каналу зв'язку та інших чинників призводять до необхідності використання різних класів завадостійких кодових конструкцій та методів декодування прийнятої інформації.

Розвиток методів завадостійкого кодування інформації розпочався зі створення двох фундаментальних класів кодових конструкцій: блокових кодів та згорткових кодів. Найбільш важливі завадостійкі коди першого класу (коди БЧХ, коди Ріда-Соломона) характеризуються наявністю в них алгебраїчної структури, що дозволяє достатньо просто реалізувати алгебраїчне жорстке декодування даних кодів. З іншого боку, декодування випадкових згорткових кодів, засноване на імовірнісних процедурах, що дозволяє підвищити достовірність передачі інформації за рахунок обробки м'яких рішень. На базі алгебраїчних блокових кодів та згорткових кодів було синтезовано послідовні каскадні коди, що дозволило значно покращити ефективність та зменшити обчислювальну складність декодування. Теоретичним та методологічним питанням у сферах теорії телекомунікацій та класичної теорії завадостійкого кодування присвячені праці таких вчених: Berlekamp E.R., Reed I.S., Solomon G., Forney G., Бондаренка О.В., Захарченка М.В., Лосева Ю.І. та ін. Суттєвим недоліком блокових кодів є висока складність м'якого декодування, що значно обмежує їх використання у сучасних телекомунікаційних технологіях.

Значним етапом у розвитку теорії завадостійкого кодування було створення паралельних каскадних кодів на основі рекурсивних згорткових кодів (турбокодів) та «перевідкриття» кодів з малою щільністю перевірок на парність, що засновані на ітеративному декодуванні. Найбільш ефективні турбокоди та коди з малою щільністю перевірок на парність мають випадкову структуру, що значно підвищує складність синтезу та декодування даних кодів. У цій галузі теорії завадостійкого кодування можна виділити роботи таких авторів: Berrou C., Gallager R.G., McEliece R.J., MacKay D.J.C., Климаша М.М., Козелкова С.В., Корчинського В.В., Рассомахіна С.Г. та ін. Однак важливим питанням залишається зменшення складності синтезу нерегулярних кодів з малою щільністю перевірок на парність з покращеними властивостями та підвищення ефективності м'якого декодування кодів даного класу.

Також важливим напрямом є створення алгебраїчно заданих згорткових

кодових конструкцій, що засновані на узагальненні положень теорії блокових кодів. Дані коди мають високі конструктивні кодові характеристики та покращені властивості у порівнянні з випадковими згортковими кодами та турбокодами. Було розроблено ряд методів жорсткого декодування даних кодів, що враховують їх алгебраїчну структуру. Проблематиці алгебраїчної теорії згорткових кодів присвячені роботи Massey J. L., Lin S., Costello D. J., Приходька С.І., Кузнецова О.О. та ін. Цьому напрямку теорії завадостійкого кодування також присвячені роботи автора при написанні кандидатської дисертації. Однак у даних роботах не розглядалась можливість м'якого декодування алгебраїчних згорткових кодових конструкцій у каналах зв'язку з випадковими помилками та групуванням помилок.

Наведені вище методи завадостійкого кодування інформації використовуються на фізичному рівні моделі взаємодії відкритих систем. Новим оригінальним підходом до відновлення даних в телекомунікаційних мережах з комутацією пакетів є використання кодів без фіксованої швидкості кодування (фонтанних кодів) спільно з ітеративним декодуванням на верхніх рівнях моделі взаємодії відкритих систем. Найбільш популярними представниками кодів даного класу є коди Лабі та послідовні каскадні фонтанні коди «Raptor». До авторів, що працюють у даному напрямку, відносяться Luby M., Shokrollahi A., Tirronen T. та ін. При цьому підвищення ефективності кодів Лабі при пакетній передачі інформації потребує подальшої оптимізації їх параметрів в залежності від числа інформаційних символів та області застосування.

Вище зазначені чинники призводять до виникнення протиріччя між вимогами до достовірності передачі інформації та необхідності покращення енергетичної ефективності від кодування у телекомунікаційних системах і мережах та існуючими положеннями теорії завадостійкого кодування, а також можливостями щодо технічної реалізації методів завадостійкого кодування інформації.

Таким чином, вирішення важливої науково-прикладної проблеми, яка полягає у підвищенні достовірності передачі інформації та збільшенні енергетичної ефективності від кодування у телекомунікаційних системах і мережах шляхом розробки методів декодування та оптимізації завадостійких кодових конструкцій різних класів, обумовлює актуальність теми дисертаційних досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження в дисертаційній роботі безпосередньо пов'язані з положеннями «Концепції розвитку телекомунікацій в Україні», «Стратегії розвитку інформаційного суспільства в Україні» та рекомендаціями щодо «Реформ галузі інформаційно-комунікаційних технологій та розвитку інформаційного простору України». Дисертаційні дослідження виконувались у відповідності до наукового напрямку кафедри транспортного зв'язку Українського державного університету залізничного транспорту. Результати дисертаційної роботи використані в ході виконання науково-дослідних робіт: «Науково-технічні засади організації та впровадження інтегральної системи технологічного зв'язку для забезпечення високошвидкісного руху поїздів» (№ держреєстрації 0114U004329); «Теоретичні основи організації мережі оперативно-технологічного зв'язку та синтезу систем забезпечення швидкісного руху поїздів» (№ держреєстрації 0115U000280), у яких здобувач виступав виконавцем.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення достовірності передачі інформації та збільшення енергетичної ефективності від кодування у телекомунікаційних системах та мережах на основі розробки та удосконалення методів завадостійкого кодування інформації з використанням принципів біоінспірованої пошукової оптимізації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні наукові завдання:

1. Дослідити проблему підвищення достовірності передачі інформації у телекомунікаційних системах та мережах та обґрунтувати напрями досліджень.

2. Удосконалити методи декодування двійкових лінійних блокових кодів з метою забезпечення меншої обчислювальної складності реалізації декодеру та підвищення енергетичної ефективності від кодування.

3. Забезпечити подальший розвиток методу оптимізації відносно коротких нерегулярних кодів з малою щільністю перевірок на парність для зменшення обчислювальної складності та підвищення ефективності синтезу даних кодових конструкцій.

4. Удосконалити метод ітеративного декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність шляхом застосування узагальнених біоінспірованих процедур для уникнення потрапляння у локальні мінімуми цільової функції.

5. Розробити комбінований метод декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність для збільшення достовірності передачі інформації у телекомунікаційних системах.

6. Забезпечити подальший розвиток методу оптимізації коефіцієнтів нормалізації при декодуванні мінімальної суми кодів з малою щільністю перевірок на парність для обраної моделі каналу зв'язку та параметрів коду.

7. Розробити метод декодування алгебраїчних згорткових кодів з метою зменшення ймовірності помилки декодування при передачі інформації у каналах зв'язку з випадковими помилками.

8. Розробити адаптивний метод декодування алгебраїчних згорткових кодів перемешування для підвищення достовірності передачі інформації у каналах зв'язку з пам'яттю.

9. Забезпечити подальший розвиток методу оптимізації кодів Лабі з метою зменшення обчислювальної складності синтезу даних кодів відповідно до заданих критеріїв для телекомунікаційних мереж з комутацією пакетів.

10. Розробити алгоритми та псевдокоди для програмної реалізації даних методів декодування та оптимізації завадостійких кодових конструкцій і дослідити їх ефективність.

Об'єкт дослідження: процеси підвищення достовірності передачі інформації та збільшення енергетичної ефективності від кодування у телекомунікаційних системах та мережах.

Предмет дослідження: методи декодування та оптимізації лінійних завадостійких кодових конструкцій різних класів для телекомунікаційних систем та мереж.

Методи дослідження. Проведені дослідження ґрунтуються на методах теорії завадостійкого кодування, теорії графів, теорії математичного програмування,

біоінспірованому підході – при розробці комбінованого методу декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність, методу декодування алгебраїчних згорткових кодів та адаптивного методу декодування алгебраїчних згорткових кодів перемежування; методах теорії кінцевих полів, теорії математичного програмування, теорії завадостійкого кодування, біоінспірованому підході – при удосконаленні методів декодування двійкових лінійних блокових кодів та методу ітеративного декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність; методах теорії завадостійкого кодування, теорії графів, теорії оптимізації, біоінспірованому підході – при забезпеченні подальшого розвитку методу оптимізації відносно коротких нерегулярних кодів з малою щільністю перевірок на парність, методу оптимізації коефіцієнтів нормалізації при декодуванні мінімальної суми кодів з малою щільністю перевірок на парність та методу оптимізації кодів Лабі. Основні практичні результати отримано з використанням методів теорії алгоритмів, теорії інформації, теорії телекомунікацій, теорії ймовірності, методів математичного моделювання, математичної статистики, математичного аналізу та синтезу.

Наукова новизна отриманих результатів обумовлена новим вирішенням важливої науково-прикладної проблеми, що полягає у підвищенні достовірності передачі інформації та збільшенні енергетичної ефективності від кодування у телекомунікаційних системах та мережах шляхом розробки удосконалених методів декодування завадостійких кодових конструкцій з прийнятною обчислювальною складністю, а також оптимізації параметрів окремих класів завадостійких кодових конструкцій для різних моделей каналів зв'язку.

Отримано такі наукові результати.

1. **Удосконалено** методи декодування двійкових лінійних блокових кодів, які відрізняються від відомих застосуванням узагальнених біоінспірованих процедур пошукової оптимізації для визначення переданого кодового слова після знаходження найбільш (найменш) надійного базису на основі породжувальної (перевірочної) матриці, що дозволяє зменшити обчислювальну складність декодування та підвищити енергетичну ефективність від кодування.

2. **Отримав подальший розвиток** метод оптимізації відносно коротких нерегулярних кодів з малою щільністю перевірок на парність, який, на відміну від існуючих, заснований на біоінспірованому пошуку розподілу серед зменшеного числа степенів символічних вершин графу Таннера, що відповідає обраному коду, що дозволяє підвищити ефективність синтезу даних кодових конструкцій.

3. **Удосконалено** метод ітеративного декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність, що, на відміну від відомих, застосовує узагальнені біоінспіровані процедури для уникнення потрапляння у локальні мінімуми цільової функції, заснованій на модифікованому правилі кореляційного декодування, що дозволяє підвищити ефективність декодування даних кодів.

4. **Вперше** запропоновано комбінований метод декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність, новизна якого полягає у поєднанні м'якого декодування на основі розповсюдження довіри та декодування на основі біоінспірованих процедур пошукової оптимізації, що дозволяє збільшити достовірність передачі інформації у телекомунікаційних системах.

5. **Отримав подальший розвиток** метод оптимізації коефіцієнтів

нормалізації при декодуванні мінімальної суми кодів з малою щільністю перевірок на парність, який відрізняється від існуючих спільним застосуванням процедури еволюції щільності та біоінспірованих процедур зменшеної складності для обраної моделі каналу зв'язку та параметрів коду, що дозволяє прискорити визначення покращених коефіцієнтів нормалізації.

6. **Вперше** запропоновано метод декодування алгебраїчних згорткових кодів, новизна якого полягає у формуванні найбільш надійного базису породжувальної матриці та застосуванні біоінспірованих процедур пошукової оптимізації для пробних векторів, отриманих у результаті випадкового зміщення, що дозволяє зменшити ймовірність помилки декодування при передачі інформації у каналах зв'язку з випадковими помилками.

7. **Вперше** запропоновано адаптивний метод декодування алгебраїчних згорткових кодів перемежування, новизна якого полягає у ітеративному застосуванні біоінспірованих процедур до модифікованої перевіркової матриці даних кодів, отриманої в результаті адаптивного розповсюдження довіри, що дозволяє підвищити достовірність передачі інформації у каналах зв'язку з пам'яттю.

8. **Одержав подальший розвиток** метод оптимізації кодів Лабі, який, на відміну від відомих, заснований на біоінспірованому пошуку зменшеної складності покращених розподілів степенів кодових вершин графів Таннера, що відповідають даним кодам, відповідно до заданих критеріїв, що дозволяє зменшити обчислювальну складність синтезу кодів Лабі для телекомунікаційних мереж з комутацією пакетів.

Наукове значення роботи. Отримані наукові результати в сукупності є розвитком теорії завадостійкого кодування та спрямовані на підвищення достовірності передачі інформації у телекомунікаційних системах та мережах, а також зменшення обчислювальної складності синтезу та декодування завадостійких кодових конструкцій різних класів.

Достовірність отриманих результатів підтверджується відсутністю протиріч з основними положеннями теорії інформації, теорії завадостійкого кодування, теорії оптимізації, теорії математичного програмування, а також збіжністю отриманих результатів із даними експериментальних досліджень та результатами математичного моделювання.

Практичне значення отриманих результатів досліджень полягає в наступному.

1. Розроблено алгоритми та псевдокоди, що лежать в основі програмної реалізації запропонованих методів декодування та оптимізації завадостійких кодових конструкцій, та досліджено ефективність даних методів для певних моделей каналу зв'язку та умов передачі інформації.

2. В залежності від параметрів алгебраїчного блокового коду БЧХ декодування на основі біоінспірованого підходу забезпечує у порівнянні з двійковою фазовою модуляцією енергетичний вииграш від кодування 3-6 дБ при коефіцієнті помилок 10^{-4} . При цьому у порівнянні з існуючим методом декодування на основі впорядкованих статистик різних порядків можливе отримання додаткового енергетичного виграшу від кодування до 0,6 дБ при меншій обчислювальній складності біоінспірованого методу декодування.

3. Запропонований біоінспірований метод оптимізації дозволяє отримати нерегулярні коди з малою щільністю перевірок на парність, що забезпечують енергетичний вигаєш від кодування близько 0,5 дБ у порівнянні з регулярними кодами такої ж довжини при коефіцієнті помилок 10^{-3} . При цьому у отриманих кодах відсутній ефект «error floor» на відміну від існуючих випадкових нерегулярних кодів.

4. Запропоновані методи дозволяють підвищити ефективність декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність. Біоінспірований метод декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність дозволяє забезпечити меншу ймовірність помилки декодування у порівнянні з існуючим методом декодування на основі градієнтного спуску, наприклад, для регулярного (1008, 504) коду при відношенні сигнал-шум 6 дБ ймовірність помилки декодування становить 10^{-7} (зменшується на порядок), але для нерегулярного коду з такими ж параметрами ефективність декодування знижується. Запропонований комбінований метод декодування даних кодів дозволяє підвищити достовірність передачі інформації в порівнянні зі стандартним методом декодування на основі розповсюдження довіри, зокрема, при відношенні сигнал/шум 2 дБ для (504, 252) коду вигаєш становить більше одного порядку, але при зростанні довжини коду вигаєш знижується. Запропонований метод оптимізації коефіцієнтів нормалізації при декодуванні мінімальної суми забезпечує вигаєш за обчислювальною складністю близько 30% у порівнянні з методом диференційної еволюції, що дозволяє застосувати даний підхід до більш довгих кодів за рахунок прискорення визначення покращених коефіцієнтів нормалізації.

5. Запропоновані біоінспіровані методи декодування алгебраїчних згорткових кодових конструкцій дозволяють підвищити ефективність від кодування для каналу з адитивним білим гауссовим шумом (АБГШ) на 2-3 дБ та для каналу Релея порядку 6 дБ при коефіцієнті помилок 10^{-4} у порівнянні з існуючими алгебраїчними методами декодування.

6. Запропонований біоінспірований метод оптимізації кодів Лабі забезпечує більш швидке знаходження покращених розподілів степенів кодових вершин відповідних графів Таннера у порівнянні з існуючими методами. При цьому характеристики даних кодів (надмірність, частота відмов, ймовірність відмови, обчислювальна складність кодування (декодування) тощо) залишаються на прийнятному з практичної точки зору рівні. Наприклад, погіршення надмірності для кодів Лабі із заданим числом інформаційних символів у порівнянні з відомим розподілом не перевищує 3%, а при багатокритеріальній оптимізації коду Лабі з довжиною інформаційних символів 100 досягнення близьких до оптимальних значень обраних параметрів коду потребує на 50 ітерацій менше у порівнянні з існуючим методом оптимізації.

Отримані в роботі результати знайшли практичне впровадження та використання:

- у ТОВ «НВП «САТЕП» при дослідженні підходів до підвищення достовірності передачі інформації у системах керування та контролю залізничного транспорту, що побудовані на базі провідних та безпроводних

телекомунікаційних технологій;

- при здійсненні професійної, науково-технічної та дослідницько-інноваційної діяльності щодо побудови та впровадження систем керування та оперативно-технологічного зв'язку залізничного транспорту у ТОВ НВП «СТАЛЬЕНЕРГО»;

- у навчальному процесі кафедри транспортного зв'язку та Інституту перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів Українського державного університету залізничного транспорту.

Особистий внесок здобувача. Всі результати, викладені в дисертаційній роботі, отримані автором самостійно. У роботах, виконаних у співавторстві і опублікованих у наукових фахових виданнях України та виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз, особистий внесок автора полягає у наступному: у [1] запропоновано наукове обґрунтування аналітичного виразу для модифікації узагальненого породжувального багаточлену алгебраїчних згорткових кодів; у [2] досліджено процес розподілу згрупованої помилки на незалежні складові при декодуванні алгебраїчних згорткових кодів перемешування; у [3] досліджено властивості завадостійких кодів, що виправляють згруповані помилки; у [4] досліджено особливості формування обмежених кодових слів алгебраїчних згорткових кодів перемешування, заданих породжувальним багаточленом коду Ріда-Соломона; у [8] досліджено принцип розділення кодової послідовності деякого алгебраїчного згорткового коду перемешування на окремі складові; у [9] запропоновано підхід до формування кодових слів несистематичних алгебраїчних згорткових кодів перемешування з довільною швидкістю кодування; у [10] розроблено математичну модель системи передачі інформації для оцінки ефективності алгебраїчних згорткових кодів перемешування; у [11] досліджено характеристики моделей каналів зв'язку шляхом математичного моделювання; у [12] досліджено особливості класичних розподілів ймовірностей при формуванні кодових символів коду Лабі; у [13] запропоновано основні етапи методу декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність на основі модифікованого правила кореляційного декодування; у [14] розроблено програмну реалізацію методу декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність, заснованому на процедурі летучих мишей, та досліджено його характеристики; у [15] науково обґрунтовано вибір цільової функції при м'якому декодуванні лінійних блокових кодів та запропоновано основні етапи відповідного методу декодування; у [16] досліджено особливості реалізації основних етапів методу м'якого декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність на основі розповсюдження довіри; у [28] розроблено алгоритм біоінспірованого м'якого декодування лінійних блокових кодів на основі породжувальної матриці.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися та були схвалені на наступних наукових конференціях: науково-практичні конференції «Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку» (Харків, 2012–2014, 2016, 2017); 67-ма науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів (Одеса, 2012); 75-та Міжнародна науково-технічна конференція кафедр академії, інженерно-технічних працівників залізниць, підприємств та організацій України та інших країн (Харків, 2013); 26-та Міжнародна

науково-практична конференція «Внедрение перспективных микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и средств телекоммуникаций на базе цифровизации» (Алушта, 2013); XLIII науково-практична конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Залізничний транспорт: сучасні проблеми науки» (Київ, 2013); 76-та, 77-ма, 78-ма, 79-та Міжнародні науково-технічні конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (Харків, 2014–2017); 27-ма, 28-ма, 29-та, 30-та Міжнародні науково-практичні конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (Алушта, Харків, 2014–2017); XLIV науково-практична конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми залізничного транспорту» (Київ, 2014); IX, X Міжнародні науково-практичні конференції «Проблеми економіки та управління на залізничному транспорті» (Київ, Одеса, 2014, 2015); Міжнародні науково-практичні конференції молодих учених і студентів «Політ. Сучасні проблеми науки» (Київ, 2015, 2016); I, II Міжнародні науково-технічні конференції «Актуальні проблеми розвитку науки і техніки» (Київ, 2015); Міжнародна науково-технічна конференція «Современные информационно-телекоммуникационные технологии» (Київ, 2015); Міжрегіональні науково-практичні конференції молодих учених «ТАК»: телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології (Красноармійськ, Покровськ, 2015, 2016); XXI Міжнародна науково-технічна конференція «Современные средства связи» (Мінськ, 2016); Міжнародна науково-практична конференція «Прикладні науково-технічні дослідження» (Івано-Франківськ, 2017); восьма та дев'ята Міжнародні науково-технічні конференції «Проблеми інформатизації» (Київ, Полтава, Катовице, Париж, Вільнюс, Харків, Мінськ, 2017).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані у 60 наукових працях (з них 32 одноосібні), у тому числі у 28 наукових статтях у наукових фахових виданнях України та виданнях України, що входять до наукометричних баз, (з них 14 без співавторів, 1 у електронному виданні), у 32 тезах доповідей та матеріалах наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновку та додатків. Повний обсяг дисертації складає 361 сторінку, у тому числі 288 сторінок основного тексту, 87 рисунків, 2 таблиці, список використаних джерел з 210 найменувань на 23 сторінках, 2 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, розкрито зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету і визначено завдання дослідження, об'єкт, предмет і методи дослідження, подано наукову новизну, практичну значимість та відомості про впровадження отриманих результатів, обґрунтовано достовірність отриманих результатів, описано особистий внесок здобувача у роботи, виконані у співавторстві, наведено відомості про апробацію результатів роботи і про публікації за темою роботи, подано короткий опис структури і обсягу дисертації.

У першому розділі проведено аналіз стану проблеми підвищення достовірності передачі інформації у телекомунікаційних системах та мережах. На основі отриманих результатів обґрунтовано напрям досліджень та здійснено постановку завдань досліджень. У даному розділі вирішено перше завдання дослідження.

Проведений аналіз показав, що для задоволення зростаючих вимог до достовірності передачі інформації в сучасних телекомунікаційних технологіях застосовують такі завадостійкі кодові конструкції (рис. 1).

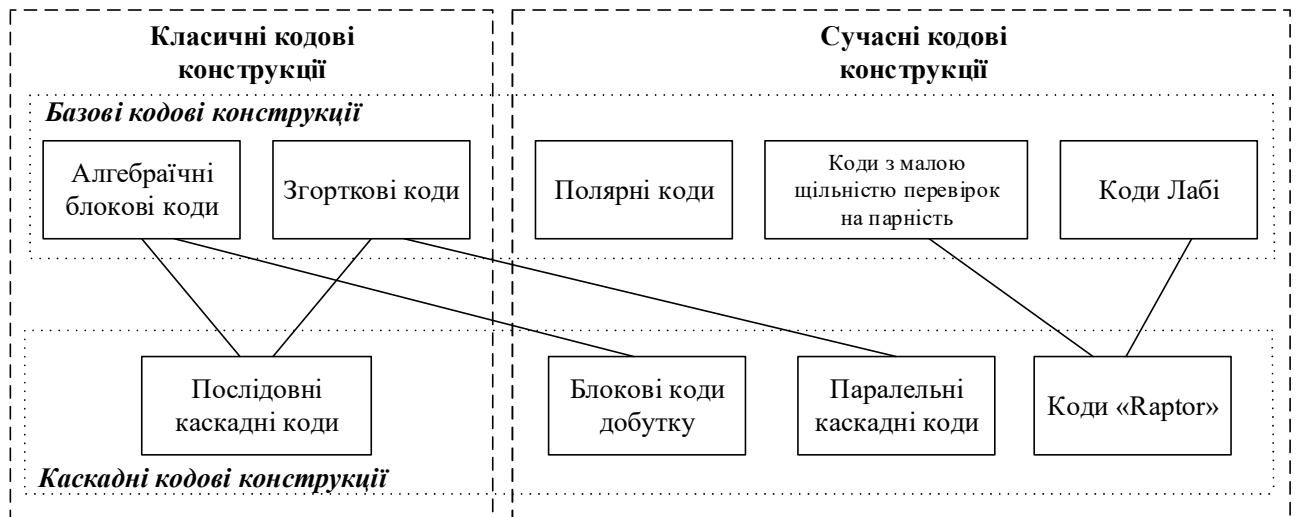


Рис. 1. Класифікація завадостійких кодових конструкцій

З проведених досліджень випливає, що еволюція підходів до декодування кодових конструкцій полягає в переході від алгебраїчного жорсткого декодування та імовірнісного м'якого декодування до ітеративного декодування, яке дозволяє використовувати як жорсткі, так і м'які рішення. При цьому ітеративний принцип обробки інформації можна розглядати як універсальний підхід до декодування різних кодових конструкцій. Показано, що для забезпечення більшого енергетичного виграшу від кодування доцільно застосовувати методи м'якого декодування завадостійких кодових конструкцій.

Визначено, що основними базовими завадостійкими кодовими конструкціями є блокові коди, у тому числі коди з малою щільністю перевірок на парність, та згорткові коди, що відносяться до кодів з фіксованою швидкістю кодування, а також фонтанні коди, зокрема, коди Лабі, які є кодами без фіксованої швидкості кодування. Встановлено, що важливим питанням є оптимізація кодів з малою щільністю перевірок на парність та кодів Лабі, у зв'язку з їх випадковою структурою.

Проведені дослідження показали, що формально проблему декодування або оптимізації деякого завадостійкого коду можна представити наступним чином:

$$f(\bar{x}^*) = \min_{\bar{x} \in X} f(\bar{x}), \quad (1)$$

$$f(\bar{x}) = f \quad (2)$$

$$A(\bar{x}) = 0, \quad (3)$$

$$B(\bar{x}) \geq 0, \quad (4)$$

де $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{|\bar{x}|})$ – вектор параметрів розмірності $|\bar{x}|$;

X – множина допустимих значень вектору параметрів (рішень), що належить $|\bar{x}|$ -мірному арифметичному простору $R^{|\bar{x}|}$;

\bar{x}^* – глобальний (локальний) мінімум («найкращий» вектор параметрів (рішень));

$f(\bar{x})$ – цільова функція, що має вид f ;

$A(\bar{x})$ – вектор-функція обмежень типу «рівність» розмірності $|A|$, що складається з компонентів $a_1(\bar{x}), a_2(\bar{x}), \dots, a_{|A|}(\bar{x})$;

$B(\bar{x})$ – вектор-функція обмежень типу «нерівність» розмірності $|B|$, що складається з компонентів $b_1(\bar{x}), b_2(\bar{x}), \dots, b_{|B|}(\bar{x})$.

У загальному випадку функція (2) та/або обмеження (3), (4) можуть бути нелінійними, тому оптимізаційна задача (1) є задачею нелінійного програмування.

Встановлено, що, враховуючи наявні обмеження існуючих методів декодування та оптимізації заводостійких кодових конструкцій та виходячи з особливостей сформульованої оптимізаційної задачі (1), для підвищення ефективності її вирішення доцільно застосовувати різноманітні біоінспіровані процедури, що відносяться до класу методів стохастичної пошукової оптимізації.

Узагальнена схема біоінспірованої процедури пошукової оптимізації для вирішення оптимізаційної задачі (1) має такий вид.

Етап 1. Ініціалізація популяції.

Задається початкове значення лічильника числа ітерацій $t=0$, початкові положення агентів $s_i^0 = \bar{x}_i^0$, $i \in [1:|S|]$, а також значення вільних параметрів процедури NP , $\alpha_1, \dots, \alpha_D$, $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_S$.

Етап 2. Визначення якості та міграція агентів популяції.

Здійснюється випробування агентів популяції, що полягає в однократному обчисленні значення цільової функції (фітнес-функції) (2) та обмежень (3), (4) для кожного агента популяції $f(s_i^t = \bar{x}_i^t)$, $A(s_i^t = \bar{x}_i^t)$, $B(s_i^t = \bar{x}_i^t)$, $i \in [1:|S|]$. Застосовуються пошукові (міграційні) оператори, специфічні для даної процедури, до поточних положень агентів $s_i^t = \bar{x}_i^t$, у результаті чого вони приймають нові положення $s_i^{t+1} = \bar{x}_i^{t+1}$, $i \in [1:|S|]$.

Етап 3. Закінчення пошуку.

Якщо умови завершення ітерацій не виконуються, то встановлюється $t = t + 1$ та здійснюється перехід до етапу 2; у противному випадку – найкраще зі знайдених положень агентів $\tilde{s}^* = \tilde{\bar{x}}^*$ обирається у якості приблизного рішення оптимізаційної задачі (1).

Наприклад, якщо в якості такої умови обрано максимальну кількість

ітерацій T , то наближеним рішенням задачі є

$$f(\tilde{s}^* = \tilde{x}^*) = \min_{\bar{x} \in X, t \in [0:T], s \in S, i \in [1:|S|]} f(s_i^t = \bar{x}_i^t).$$

На основі проведеного аналізу, відповідно до мети дисертаційної роботи, були сформульовані завдання дослідження.

В другому розділі запропоновано біоінспіровані методи декодування лінійних блокових кодів з різною швидкістю кодування. У даному розділі вирішено друге завдання дослідження та частково десяте завдання стосовно декодування лінійних блокових кодів; отримано перший науковий результат.

Визначено, що задачу декодування лінійного (n, k) блокового коду формально можна представити у вигляді такої оптимізаційної задачі:

$$f(\tilde{x}'^*) = \max_{\tilde{x}' \in \tilde{X}_B} f(\tilde{x}'), \quad (5)$$

$$f(\tilde{x}') = \sum_{t=1}^k y_t x'_t + \sum_{l=k+1}^n y_l \zeta_l(\tilde{x}'), \quad (6)$$

$$\zeta_l(\tilde{x}') = \prod_{j=1}^n x_j^{p_{l,j}}, \quad l \in [k+1, n], \quad (7)$$

$$k = \text{const}, \quad n = \text{const}, \quad x'_t \in \{1, -1\}, \quad y_j \in [-\infty, +\infty], \quad p_{l,j} \in \{0, 1\}, \quad (8)$$

де \tilde{x}'^* – глобальний (локальний) максимум, що відповідає «найкращій» інформаційній частині біполярного вектору оцінок, що обирається у якості інформаційної частини переданого кодового слова;

\tilde{x}' – інформаційна частина біполярного вектору оцінок;

\tilde{X}_B – множина допустимих рішень, що відповідає групі біполярних векторів довжиною k ;

y_j – j -ий елемент прийнятого вектору м'яких рішень, $j \in [1, n]$;

$p_{l,j}$ – перевірочні елементи, що визначаються з $n - k$ перевірочних добутоків на основі k найбільш надійних незалежних позицій у прийнятому векторі м'яких рішень, $p_{l,j} \in \{0, 1\}$.

Аналіз функції (6) та обмежень (7) та (8) показує, що сформульована задача максимізації (5) відноситься до класу задач цілочислового нелінійного програмування, обчислювальна складність якої визначається довжиною k інформаційної частини біполярного вектору оцінок.

Основні етапи пропонованого методу м'якого декодування лінійних блокових кодів з низькою швидкістю кодування, спрямованого на вирішення задачі (5), представлено нижче.

Етап 1. Жорстке декодування прийнятого вектору м'яких рішень \bar{y} .

Крок 1. Формування біполярного вектору жорстких рішень для прийнятого

вектору м'яких рішень \bar{y} . Нехай $x_j = \text{sign}(y_j)$, $j \in [1, n]$, де $x_j = +1$, якщо $y_j \geq 0$, та $x_j = -1$ – в протилежному випадку, тоді отримуємо вектор $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Крок 2. Обчислення перевіркової умови $\tilde{s}_i = \prod_{j=1}^n x_j^{h_{i,j}} = +1$, $i \in [1, n-k]$. Якщо

перевірочна умова виконується, то біполярний вектор $\bar{x} \in$ переданим біполярним кодовим словом та процес декодування завершується, в протилежному випадку – перехід до етапу 2.

Етап 2. Знаходження найбільш надійного базису (визначення найбільш надійних позицій у прийнятому векторі м'яких рішень \bar{y}), що обчислюється за допомогою двох перестановок елементів породжувальної матриці лінійного блокового коду G , що відповідає перевіркої матриці H .

Крок 1. Розміщення елементів прийнятого вектору y_j у порядку зменшення їх надійності $|y_j|$, що визначає перестановку стовпців π_1 породжувальної матриці G .

Крок 2. Впорядковування стовпців породжувальної матриці G відповідно до перестановки π_1 , тобто отримання модифікованої породжувальної матриці $G' = \pi_1(G)$.

Крок 3. Формування зміненої породжувальної матриці G'' таким чином, щоб її перші k стовпців були першими k незалежними стовпцями матриці G' , що визначає перестановку стовпців π_2 матриці G' .

Крок 4. Впорядковування стовпців матриці G' відповідно до перестановки π_2 , тобто отримання модифікованої матриці $G'' = \pi_2(G')$, що у систематичній формі задає найбільш надійний базис G_s .

Етап 3. Пошук з використанням узагальнених біоінспірованих процедур біполярного вектору \tilde{x}'^* , що забезпечує максимальне значення функції (6).

Крок 1. Ініціалізація популяції. У області пошуку деяким чином створюється задане число початкових наближень до шуканого рішення оптимізаційної задачі (5). Наприклад, шляхом формування вектору \tilde{x}' , що складається з k найбільш надійних незалежних позицій у прийнятому векторі м'яких рішень \bar{y} , та заданого числа випадкових біполярних векторів довжиною k .

Крок 2. Міграція агентів популяції. За допомогою деякого набору міграційних операторів, специфічних для кожної з біоінспірованих процедур, агенти переміщуються у області пошуку таким чином, щоб у кінцевому рахунку наблизитися до шуканого екстремуму функції (6).

Крок 3. Закінчення пошуку. Якщо число ітерацій менше, ніж максимальне число ітерацій L_{\max} , то повертаємося до кроку 2, у протилежному випадку – поточний вектор \tilde{x}' є найбільш ймовірною інформаційною частиною \tilde{x}'^* , яка відповідає біполярному кодовому слову \bar{x}_s , сформованому з використанням найбільш надійного базису G_s .

Етап 4. Формування оцінки переданого біполярного кодового слова за допомогою зворотного відображення $\hat{x} = \pi_1^{-1}[\pi_2^{-1}(\bar{x}_s)]$ та завершення процесу

декодування.

Показано, що при швидкості коду $R > \frac{1}{2}$ кодування за допомогою перевірконої матриці H потребує меншого числа обчислювальних операцій.

Нехай $E(\bar{s})$ буде набором усіх двійкових векторів помилок для деякого синдрому \bar{s} , тоді задачу м'якого декодування деякого лінійного блокового коду можна представити як пошук вектору двійкових помилок $\bar{e} \in E(\bar{s})$, що мінімізує функцію невідповідності кореляції між прийнятим вектором \bar{y} та деяким вектором помилок, що формально можна записати у вигляді оптимізаційної задачі:

$$f(\bar{e}^*) = \min_{\bar{e} \in E(\bar{s})} f(\bar{e}), \quad (9)$$

$$f(\bar{e}) = \sum_{j=1}^n e_j |y_j|, \quad (10)$$

$$s_i = \sum_{j=1}^n h_{i,j} r_j \equiv 0 \pmod{2}, \quad i \in [1, n-k], \quad (11)$$

$$k = \text{const}, \quad n = \text{const}, \quad e_j \in \{0, 1\}, \quad y_j \in [-\infty, +\infty], \quad r_i \in \{0, 1\}, \quad h_{i,j} \in \{0, 1\}, \quad (12)$$

де \bar{e}^* – глобальний (локальний) мінімум, що відповідає «найкращому» двійковому вектору помилок, що обирається у якості вектору помилок для переданого кодового слова;

s_i – i -та складова синдрому (перевірочна умова), $i \in [1, n-k]$;

r_j – j -ий елемент двійкового прийнятого вектору, $j \in [1, n]$;

h_{ij} – ij -ий елемент перевірконої матриці H , $i \in [1, n-k]$, $j \in [1, n]$.

З аналізу функції (10) та обмежень (11) та (12) випливає, що сформульована задача мінімізації (9) є задачею цілочислового нелінійного програмування (обмеження (11) представляє собою нелінійну функцію через виконання операцій у кінцевому полі).

Розглянемо основні етапи пропонованого методу м'якого декодування високошвидкісних лінійних блокових кодів на основі перевірконої матриці, спрямованого на вирішення оптимізаційної задачі (9).

Етап 1. Жорстке декодування прийнятого вектору м'яких рішень \bar{y} .

Крок 1. Формування двійкового вектору жорстких рішень. Нехай $r_j = \text{sign}(y_j)$, $j \in [1, n]$, де $r_j = 0$, якщо $y_j \geq 0$, та $r_j = 1$ – в протилежному випадку, тоді отримаємо вектор $\bar{r} = (r_1, r_2, \dots, r_n)$.

Крок 2. Обчислення синдрому для сформованого вектору жорстких рішень r_j . Якщо синдром дорівнює нулю, то двійковий вектор \bar{r} є переданим кодовим словом та процес декодування завершується, в протилежному випадку – перехід до етапу 2.

Етап 2. Знаходження найменш надійного базису (визначення найменш надійних позицій у прийнятому векторі м'яких рішень \bar{y}), що обчислюється за

допомогою перестановок елементів перевірконої матриці H лінійного блокового коду.

Крок 1. Розміщення елементів прийнятого вектору y_j у порядку зменшення їх надійності $|y_j|$, $j \in [1, n]$. При цьому елемент y_i є більш надійним, ніж елемент y_j , якщо $|y_i| > |y_j|$.

Крок 2. Перестановка позицій вектору \bar{y} таким чином, щоб останні $n-k$ позицій даного вектору були найменш надійними лінійно незалежними позиціями, тобто формування вектору $\tilde{y} = \pi(\bar{y})$.

Крок 3. Упорядковування стовпців перевірконої матриці H відповідно до перестановки π , тобто отримання у систематичній формі перевірконої матриці, що задає найменш надійний базис H'_s .

Етап 3. Пошук з використанням узагальнених біоінспірованих процедур пошукової оптимізації передбачуваного двійкового вектору помилок $\tilde{e} = (e_1, e_2, \dots, e_n)$, що забезпечує мінімальне значення цільової функції (10), що водночас виступає у якості фітнес-функції.

Крок 1. Ініціалізація популяції. У області пошуку деяким чином створюється задане число початкових наближень до шуканого рішення оптимізаційної задачі (9). Наприклад, шляхом формування нульового вектору $e' = (e_1, e_2, \dots, e_k)$ та заданого числа випадкових двійкових векторів довжиною k .

Крок 2. Міграція агентів популяції. За допомогою заданого набору міграційних операторів, що визначаються особливостями конкретної біоінспірованої процедури, агенти переміщуються у області пошуку таким чином, щоб наприкінці пошуку наблизитися до мінімуму функції (10).

Розглянемо процес формування передбачуваного двійкового вектору помилок \tilde{e} . Нехай \tilde{r} – двійковий вектор, що формується шляхом виконання жорстких рішень для елементів вектору \tilde{y} , тоді можна обчислити синдром \bar{s} для даного вектору та матриці H'_s . Також нехай \bar{s}_1 – послідовність довжиною $n-k$ така, що $\bar{s}_1 = \bar{e}' P'^T$, де P'^T – транспонована матриця перевірок матриці H'_s ; \bar{s}_2 – послідовність довжиною $n-k$ така, що $\bar{s}_2 = \bar{s} + \bar{s}_1$.

Тоді формування передбачуваного двійкового вектору помилок здійснюється наступним чином:

$$\tilde{e} = (\bar{e}', \bar{e}''),$$

де \bar{e}' – пробний двійковий вектор з популяції (систематична частина передбачуваного вектору помилок);

\bar{e}'' – двійковий вектор, що відповідає послідовності \bar{s}_2 , тобто $\bar{e}'' = \bar{s}_2$.

Крок 3. Закінчення пошуку. Якщо кількість ітерацій менше максимального числа ітерацій L_{\max} , то повертаємося до кроку 2; у протилежному випадку – поточний вектор \tilde{e} є найбільш ймовірним двійковим вектором помилок \tilde{e}^* , що отриманий з використанням найменш надійного базису породжувальної матриці H'_s .

Етап 4. Формування оцінки переданого кодового слова за допомогою зворотного відображення $\hat{r} = \pi^{-1}(\tilde{r} + \tilde{e}^*)$ та завершення процесу декодування.

Таким чином, розглянуті методи декодування є еквівалентними, а доцільність застосування кожного з них визначається швидкістю кодування конкретного коду.

Проведені дослідження показали, що розроблені методи декодування лінійних блокових кодів забезпечують більший енергетичний вигравш від кодування у порівнянні з методом декодування на основі впорядкованих статистик та характеризуються меншою обчислювальною складністю.

Наприклад, порівняння результатів моделювання у каналі з АБГШ розробленого біоінспірованого методу декодування та методу декодування на основі впорядкованих статистик для (128, 64) БЧХ коду наведено на рис. 2.

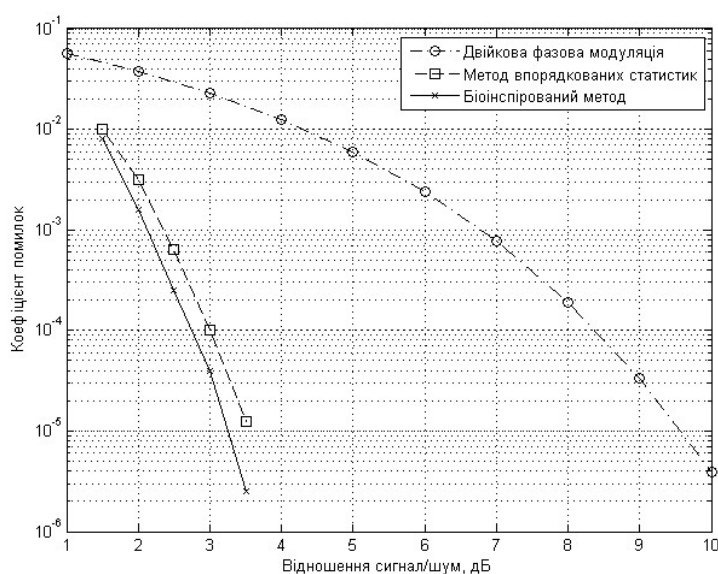


Рис. 2. Залежність коефіцієнту помилок від відношення сигнал/шум для (128, 64) БЧХ коду

З рис. 2 випливає, що запропонований метод декодування забезпечує вигравш від кодування близько 0,3 дБ порівняно з методом декодування на основі впорядкованих статистик та близько 6 дБ у порівнянні з двійковою фазовою модуляцією при коефіцієнті помилок 10^{-4} , а також потребує обробки не більше 2500 кодових слів замість 43740 кодових слів при використанні відомого методу.

У третьому розділі запропоновано методи оптимізації та декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність на основі біоінспірованого пошуку. У даному розділі вирішено з третього по шосте завдання дослідження, а також частково десяте завдання стосовно декодування та оптимізації кодів з малою щільністю перевірок на парність; отримано з другого по п'ятий наукові результати.

Встановлено, що пошук «хороших» нерегулярних кодів з малою щільністю перевірок на парність із заданими параметрами для деякої моделі каналу зв'язку формально можна представити у вигляді такої оптимізаційної задачі:

$$f(\bar{\Lambda}^*) = \min_{\bar{\Lambda} \in \bar{\Lambda}'} f(\bar{\Lambda}), \quad (13)$$

$$f(\bar{\Lambda}) = BER, \quad (14)$$

$$SNR = const, R = const, \quad (15)$$

$$\bar{\Lambda}' = \left\{ \bar{\Lambda} \left| \begin{array}{l} \sum_{i=1}^l \Lambda_i = 1 \\ \Lambda_l = 1 - \sum_{i=1}^{l-1} \Lambda_i \\ 0 < \Lambda_i < 1 \end{array} \right. \right\}, \quad (16)$$

де $\bar{\Lambda}^*$ – глобальний (локальний) мінімум, що відповідає «найкращому» вектору, що складається з коефіцієнтів розподілу степенів символічних вершин графу Таннера;

$\bar{\Lambda}$ – пробний вектор, що складається з $l-1$ попередньо обраних коефіцієнтів розподілу степенів символічних вершин графу Таннера;

$\bar{\Lambda}'$ – множина допустимих рішень, що відповідає групі векторів, які складаються з коефіцієнтів розподілу степенів символічних вершин графу Таннера;

BER – ймовірність помилки декодування (коефіцієнт помилок);

SNR – відношення сигнал/шум, дБ;

R – швидкість кодування нерегулярного коду з малою щільністю перевірок на парність, що задається відповідним графом Таннера.

З аналізу функції (14) та обмежень (15), (16) випливає, що сформульована задача мінімізації (13) є задачею нелінійного програмування, тому що цільова функція представляє собою коефіцієнт помилок, який обчислюється у результаті комп'ютерного моделювання на основі методу Монте-Карло.

Розглянемо основні етапи біоінспірованого методу оптимізації нерегулярних кодів з малою щільністю перевірок на парність кінцевої довжини, що спрямований на вирішення задачі (13).

Етап 1. Вибір параметрів коду та характеристик моделі каналу зв'язку.

На даному етапі обирається значення швидкості кодування R , а також встановлюється величина відношення сигнал/шум SNR , яка повинна бути достатньо малою для досягнення попередньо визначеного значення ймовірності помилки декодування за прийнятний час моделювання.

Етап 2. Біоінспірована оптимізація розподілу степенів символічних вершин графу Таннера для заданих параметрів коду.

Даний етап заснований на спільному використанні узагальнених біоінспірованих процедур, методу REG для побудови графу Таннера та комп'ютерного моделювання із застосуванням методу Монте-Карло.

Спочатку відбувається створення групи початкових векторів $\bar{\Lambda}$, елементи яких формуються відповідно до рівномірного розподілу з нормалізацією. Далі для

кожного з отриманих векторів $\bar{\Lambda}$ та відповідного розподілу степенів перевірочних вершин, що визначається з урахуванням швидкості кодування, з використанням методу PEG будується граф Таннера, що повністю характеризує конкретний код. Після цього здійснюється комп'ютерне моделювання процесу передачі інформації через канал зв'язку з використанням кожного з отриманих нерегулярних кодів з малою щільністю перевірок на парність. При цьому число кодових слів, що передається, не обмежується, а процес моделювання завершується при досягненні попередньо визначеного значення коефіцієнту помилок при використанні методу ітеративного декодування на основі розповсюдження довіри. Далі на основі отриманих результатів за допомогою набору міграційних операторів, що визначається конкретною біоінспірованою процедурою, здійснюється формування групи нових «покращених» векторів $\bar{\Lambda}$, для яких наведений вище процес повторюється. Генерування векторів $\bar{\Lambda}$ завершується при досягненні заданої кількості ітерацій.

Етап 3. Отримання ансамблю нерегулярних кодів з малою щільністю перевірок на парність.

На даному етапі здійснюється формування «найкращого» вектору $\bar{\Lambda}^*$ за результатами виконання етапу 2, тобто відбувається отримання розподілу степенів символічних вершин графу Таннера близького до оптимального для заданих параметрів коду та характеристик моделі каналу зв'язку.

Проведені дослідження показали, що характеристики отриманих нерегулярних кодів з малою щільністю перевірок на парність з оптимізованим розподілом символічних вершин забезпечують більший енергетичний виграш від кодування у порівнянні з відповідними регулярними кодами та випадковими нерегулярними кодами. Крім того, відсутність ефекту «error floor» дозволяє отримати значно менший коефіцієнт помилок у області високих значень відношення сигнал/шум. При цьому обчислювальна складність запропонованого біоінспірованого методу оптимізації нерегулярних кодів з малою щільністю перевірок на парність менша, ніж при спільному використанні процедури еволюції щільності та методу диференційної еволюції, та може регулюватися шляхом заміни типу та/або параметрів біоінспірованої процедури.

Наприклад, знайдений розподіл степенів символічних вершин графу Таннера виду $\Lambda(x) = 0,481x^2 + 0,274x^3 + 0,063x^4 + 0,095x^5 + 0,087x^{15}$ був використаний для побудови нерегулярного (1008, 504) коду з малою щільністю перевірок на парність, порівняння характеристик якого з іншими кодами представлено на рис. 3, з аналізу якого слідує, що обраний нерегулярний код з малою щільністю перевірок на парність з оптимізованим розподілом символічних вершин графу Таннера забезпечує енергетичний виграш від кодування понад 0,5 дБ у порівнянні з регулярним кодом при коефіцієнті помилок 10^{-3} .

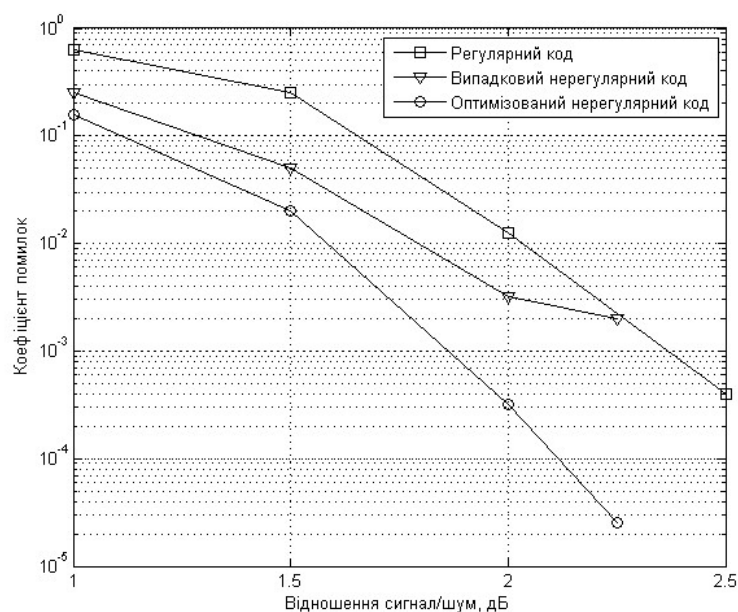


Рис. 3. Залежність коефіцієнту помилок від відношення сигнал/шум для (1008, 504) кодів з малою щільністю перевірок на парність

Аналіз обчислювальної складності існуючих методів кодування та декодування кодами з малою щільністю перевірок на парність показав, що необхідне подальше підвищення ефективності м'якого декодування даних кодів.

Нехай H позначає перевірочну матрицю коду з малою щільністю перевірок на парність розмірністю $m \times n$, де $n > m \geq 1$. Тоді символічні вершини $N(i)$ і перевірочні вершини $M(j)$ відповідного графу Таннера, де $(i \in [1, m], j \in [1, n])$, визначаються як $N(i) \equiv \{j \in [1, n] : h_{ij} = 1\}$ і $M(j) \equiv \{i \in [1, m] : h_{ij} = 1\}$, де h_{ij} є ij -елементом перевірочної матриці H .

Визначено, що формально задачу декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність на підставі модифікованого правила кореляційного декодування можна представити наступним чином:

$$f(\bar{x}^*) = \max_{\bar{x} \in C} f(\bar{x}), \quad (17)$$

$$f(\bar{x}) = \sum_{j=1}^n x_j y_j + \sum_{i=1}^m \prod_{j \in N(i)} x_j, \quad (18)$$

$$m = \text{const}, n = \text{const}, x_j \in \{1, -1\}, y_j \in [-\infty, +\infty], \quad (19)$$

де \bar{x}^* – глобальний (локальний) максимум, що відповідає «найкращому» біполярному вектору оцінок, що обирається у якості переданого біполярного кодового слова.

Сформульована задача максимізації (17) представляє собою задачу цілочислового нелінійного програмування, тому що цільова функція (18) є нелінійною функцією, а обмеження (19) задають параметри коду з малою щільністю перевірок на парність та прийнятої з каналу зв'язку інформації.

Для вирішення оптимізаційної задачі (17) запропоновано ітеративний метод декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність на основі узагальнених біоінспірованих процедур, заданий наступними етапами.

Етап 1. Нехай $x_j = \text{sign}(y_j)$, де $x_j = +1$, якщо $y_j \geq 0$, та $x_j = -1$ – в іншому випадку; для $j \in [1, n]$. В результаті отримуємо вектор $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Етап 2. Якщо перевірна умова $\prod_{j \in N(i)} x_j = +1$ виконується для всіх $i \in [1, m]$, то вектор \bar{x} є кодовим словом та процес декодування завершується.

Етап 3. Пошук з використанням узагальнених біоінспірованих процедур вектору \bar{x} , що забезпечує максимальне значення цільової функції (18).

Етап 4. Якщо число ітерацій менше максимального числа ітерацій L_{\max} , тоді повертаємося до етапу 2, в іншому випадку – поточний вектор \bar{x} є кодовим словом та процес декодування завершується.

З проведених досліджень слідує, що запропонований метод декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність має прийнятну обчислювальну складність та перевершує за енергетичною ефективністю метод декодування на основі градієнтного спуску, але уступає за цим параметром методу мінімальної суми.

Порівняння результатів моделювання у каналі з АБГШ запропонованого методу декодування та відомих методів декодування для регулярного (1008, 504) коду з малою щільністю перевірок на парність наведено на рис. 4.

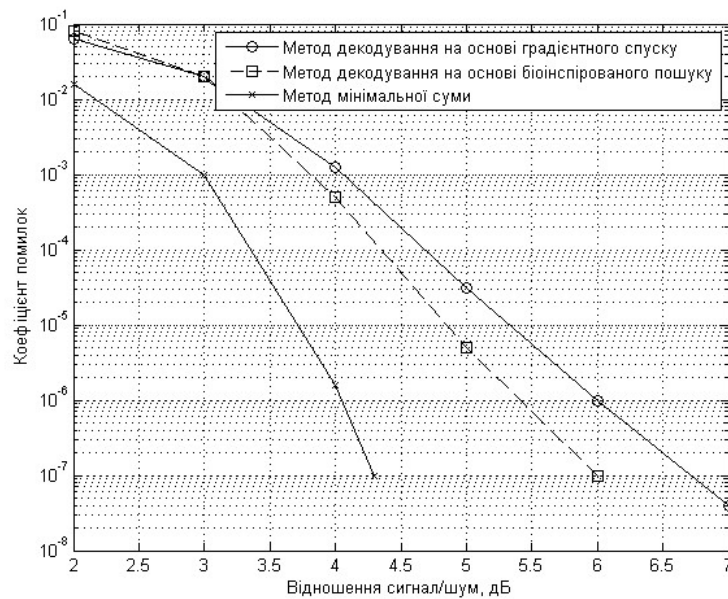


Рис. 4. Залежність коефіцієнту помилок від відношення сигнал/шум для регулярного (1008, 504) коду з малою щільністю перевірок на парність

З аналізу рис. 4 випливає, що при застосуванні регулярного коду у діапазоні низького відношення сигнал/шум при ймовірності помилки декодування 10^{-3} запропонований метод декодування забезпечує енергетичний вигравш від кодування у порівнянні з методом декодування на основі градієнтного спуску порядку 0,5 дБ, а при відношенні сигнал/шум понад 5 дБ та при ймовірності помилки декодування

10^{-7} енергетичний виграш від кодування становить близько 0,8 дБ. Водночас, метод декодування на основі біоінспірованого пошуку суттєво програє за енергетичною ефективністю методу мінімальної суми: при ймовірності помилки декодування 10^{-3} – на 0,7 дБ, а при ймовірності помилки декодування 10^{-7} – на 1,7 дБ. Слід зазначити, що у випадку декодування нерегулярних кодів з малою щільністю перевірок на парність характеристики запропонованого методу погіршуються.

Встановлено, що для підвищення ефективності декодування відносно довгих кодів з малою щільністю перевірок на парність доцільно використовувати таку цільову функцію:

$$f(\tilde{c}) = \sum_{j=1}^n y_j c_j = y_1 c_1 + y_2 c_2 + \dots + y_k c_k + y_{k+1} \pi_{k+1}(\tilde{c}) + \dots + y_n \pi_n(\tilde{c}), \quad (20)$$

де $c_i = \pi_i(\tilde{c}) = \prod_{j=1}^n c_j^{p_{i,j}}$, $i = k+1, k+2, \dots, n$ – залежні елементи передбачуваного

кодового слова;

$p_{i,j} \in \{0, 1\}$ – елементи, які визначаються з $n-k$ перевірочних умов на підставі k найбільш надійних незалежних прийнятих символів.

Основні етапи запропонованого комбінованого методу декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність представлені нижче.

Стадія 1. Жорстке декодування на основі синдрому (перевірочної умови).

Крок 1. Нехай $c'_j = \text{sign}(y_j)$, де $c'_j = 0$, якщо $y_j \geq 0$, і $c'_j = 1$ – в іншому випадку; для $j = 1, 2, \dots, n$. В результаті отримуємо вектор $c' = (c'_1, c'_2, \dots, c'_n)$.

Крок 2. Якщо перевірочна умова виконується для всіх $i = 1, 2, \dots, n-k$, тоді вектор c' є двійковим кодовим словом і процес декодування завершується, в протилежному випадку здійснюється перехід до стадії 2.

Стадія 2. М'яке декодування на основі розповсюдження довіри.

Етап 1. Ініціалізація.

Встановлення для символної вершини V_j , що з'єднана ребром з перевірочною вершиною P_i , наступних значень ймовірностей:

$$p_j^1 = \frac{1}{1 + e^{\frac{2y_j}{\sigma^2}}}, \quad p_j^0 = 1 - p_j^1, \quad (21)$$

$$P_{ij}^1 = p_j^1, \quad P_{ij}^0 = 1 - P_{ij}^1, \quad (22)$$

де p_j^1, p_j^0 – ймовірності того, що j -ий елемент прийнятого вектору $c'_j = 1$ або $c'_j = 0$ відповідно;

y_j – j -ий елемент прийнятого вектору м'яких рішень;

σ^2 – дисперсія каналу з АБГШ;

P_{ij}^1, P_{ij}^0 – ймовірності того, що j -ий елемент прийнятого вектору $c'_j = 1$ або $c'_j = 0$, які визначаються на основі інформації, отриманої з усіх перевірочних умов, окрім умови s'_i , відповідно.

Етап 2. Передача повідомлень від перевірочних вершин до символічних вершин.

Крок 1. Обчислення для кожної перевірочної вершини P_i , що пов'язана ребром з символічною вершиною V_j , різниці між значеннями ймовірностей (22) та допоміжної величини:

$$\begin{aligned}\Delta P_{ij} &= P_{ij}^0 - P_{ij}^1, \\ \Delta Q_{ij} &= \prod_{j'} \Delta P_{ij'},\end{aligned}$$

де $j' \in N(i) \setminus \{n\}$.

Крок 2. Визначення ймовірності того, що перевірочна умова s'_i виконується, якщо j -ий елемент прийнятого вектору $c'_j = 1$ або $c'_j = 0$ відповідно:

$$Q_{ij}^1 = \frac{1}{2}(1 - \Delta Q_{ij}), \quad Q_{ij}^0 = \frac{1}{2}(1 + \Delta Q_{ij}). \quad (23)$$

Етап 3. Передача повідомлень від символічних вершин до перевірочних вершин.

Крок 1. Обчислення ймовірностей (22) для кожної символічної вершини V_j , що з'єднана ребром з перевірочною вершиною P_i , з урахуванням умови нормування $P_{ij}^0 + P_{ij}^1 = 1$:

$$P_{ij}^1 = p_j^1 \prod_{i'} Q_{ij}^1, \quad P_{ij}^0 = p_j^0 \prod_{i'} Q_{ij}^0,$$

де $i' \in M(j) \setminus \{n - k\}$.

Крок 2. Визначення апостеріорних ймовірностей, що уточнюють значення ймовірностей (21), з урахуванням (23) та умови нормування $P_j^0 + P_j^1 = 1$:

$$P_j^1 = p_j^1 \prod_i Q_{ij}^1, \quad P_j^0 = p_j^0 \prod_i Q_{ij}^0. \quad (24)$$

Етап 4. Перевірка умови закінчення декодування.

Крок 1. Визначення значення j -ого елемента передбачуваного двійкового кодового слова \hat{c}' на основі значень ймовірностей, що отримані за допомогою (24):

$$\hat{c}'_j = \begin{cases} 0, & \text{при } \phi_j = \ln(P_j^1/P_j^0) \geq 0, \\ 1, & \text{при } \phi_j = \ln(P_j^1/P_j^0) < 0, \end{cases} \quad (25)$$

де ϕ_j – елемент вектору правдоподібності.

Крок 2. Якщо для передбачуваного двійкового кодового слова \hat{c}' виконується перевірна умова, то процес декодування завершується, в противному випадку – перехід до стадії 3.

Стадія 3. Декодування на основі біоінспірованих процедур пошукової оптимізації.

Етап 1. Знаходження найбільш надійного базису з використанням імовірностей (24), які обчислюються за допомогою двох перестановок породжувальної матриці G .

Крок 1. Розміщення елементів вектору правдоподібності ϕ_j в порядку зменшення їх надійності $|\phi_j|$, що визначає перестановку стовпців π_1 матриці G .

Крок 2. Упорядкування стовпців матриці G у відповідності з перестановкою π_1 , тобто отримання матриці $G' = \pi_1(G)$.

Крок 3. Формування матриці G'' таким чином, щоб її перші k стовпців були першими k незалежними стовпцями матриці G' , що визначає перестановку стовпців π_2 матриці G' .

Крок 4. Упорядкування стовпців матриці G' у відповідності з перестановкою π_2 , тобто отримання матриці $G'' = \pi_2(G')$, яка в систематичній формі задає найбільш надійний базис G_s .

Етап 2. Пошук з використанням біоінспірованих процедур пошукової оптимізації вектору \tilde{c} , який забезпечує максимальне значення функції (20).

Крок 1. Ініціалізація популяції. В області пошуку створюється задане число пробних векторів шляхом формування біполярного вектору \tilde{c} , у відповідності з k «найбільш надійними» незалежними позиціями у векторі правдоподібності $\bar{\phi}$, та випадкових біполярних векторів довжиною k .

Крок 2. Міграція агентів популяції. За допомогою деякого набору міграційних операторів, специфічних для кожної з біоінспірованих процедур, агенти переміщуються в області пошуку таким чином, щоб в підсумку наблизитися до шуканого екстремуму цільової функції (20).

Крок 3. Закінчення пошуку. Якщо число ітерацій менше максимального числа ітерацій L_{\max} , тоді повертаємось до кроку 2, в противному випадку – поточний вектор \tilde{c} є найбільш імовірною інформаційною частиною кодового слова \bar{c}_s , яке можна сформувати з використанням надійного базису G_s .

Етап 3. Перевірка умови закінчення декодування.

Крок 1. Формування оцінки передбачуваного біполярного кодового слова за допомогою зворотного відображення $\hat{c}_s = \pi_1^{-1}[\pi_2^{-1}(\bar{c}_s)]$.

Крок 2. Якщо для передбачуваного біполярного кодового слова \hat{c}

виконуються перевірочні умови, тоді процес декодування завершується; в протилежному випадку, якщо не досягнуто максимальне число ітерацій, – перехід до стадії 2 з використанням в якості початкових значень отриманих імовірностей (24).

З проведених досліджень випливає, що розроблений метод декодування можна використовувати для відносно довгих кодів з малою щільністю перевірок на парність, однак його ефективність знижується при збільшенні довжини коду, а більш висока обчислювальна складність обумовлена застосуванням додаткової стадії при декодуванні.

Оцінка ефективності комбінованого методу декодування, отримана за результатами моделювання (в логарифмічному масштабі) для (504, 252) коду з малою щільністю перевірок на парність, представлена на рис. 5, з якого слідує, що запропонований метод декодування дозволяє підвищити достовірність передачі інформації в порівнянні з методом декодування на основі розповсюдження довіри кодів з малою щільністю перевірок на парність, зокрема, при відношенні сигнал/шум 2 дБ вираш становить більше одного порядку.

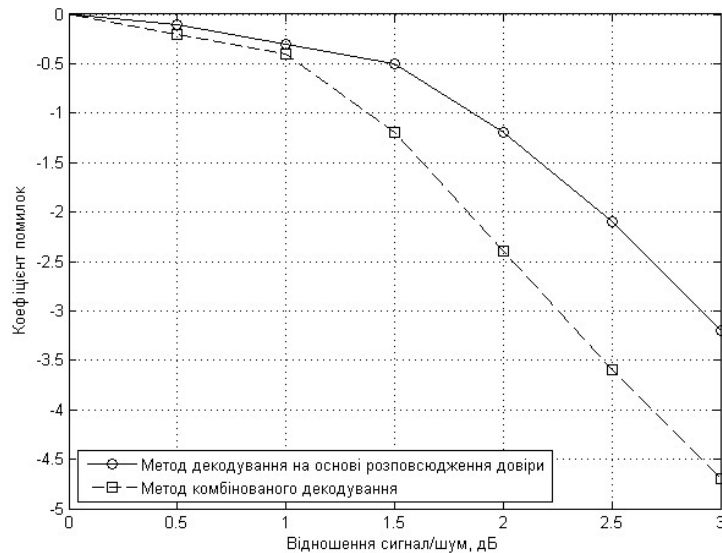


Рис. 5. Залежність коефіцієнту помилок від відношення сигнал/шум для (504, 252) коду з малою щільністю перевірок на парність

Визначено, що формально знаходження коефіцієнтів нормалізації при декодуванні мінімальної суми нерегулярних кодів з малою щільністю перевірок на парність можна представити наступним чином:

$$f(\bar{\alpha}^*, \bar{\beta}^*) = \min_{\bar{\alpha} \in \bar{\alpha}', \bar{\beta} \in \bar{\beta}'} f(\bar{\alpha}, \bar{\beta}) \quad (26)$$

$$f(\bar{\alpha}, \bar{\beta}) = SNR \quad (27)$$

$$n = const, k = const, \lambda(x) = const, \rho(x) = const, \quad (28)$$

$$\bar{\alpha}' = \left\{ \bar{\alpha} \left| \begin{array}{l} 0 < \alpha_l \leq 1, \\ l = 1, 2, \dots, d_{p_{\max}} \end{array} \right. \right\}, \quad \bar{\beta}' = \left\{ \bar{\beta} \left| \begin{array}{l} 0 < \beta_l \leq 1, \\ l = 1, 2, \dots, d_{v_{\max}} \end{array} \right. \right\}, \quad (29)$$

де $\bar{\alpha}^*, \bar{\beta}^*$ – глобальний (локальний) мінімум, що відповідає «кращим» векторам, які складаються з коефіцієнтів нормалізації для перевірочних і символічних вершин графу Таннера відповідно;

$\bar{\alpha}, \bar{\beta}$ – пробні вектори, що містять коефіцієнти нормалізації для перевірочних і символічних вершин графу Таннера відповідно;

$\bar{\alpha}', \bar{\beta}'$ – безліч допустимих рішень, що відповідає групі векторів, які складаються з коефіцієнтів нормалізації для перевірочних і символічних вершин відповідно;

$\rho(x), \lambda(x)$ – розподіли степенів символічних і перевірочних вершин графу Таннера з максимальними степенями $d_{P_{\max}}$ та $d_{V_{\max}}$ відповідно;

SNR – відношення сигнал/шум, дБ.

Основні етапи пропонованого підходу до оптимізації двомірного декодування мінімальної суми на основі задачі мінімізації (26) з урахуванням властивостей нелінійної функції (27) та обмежень (28) і (29) наведені нижче.

Етап 1. Завдання параметрів коду і процедури «density evolution».

На цьому етапі встановлюються значення довжини інформаційної частини k , довжини кодового слова n , розподілів степенів символічних і перевірочних вершин графу Таннера $\lambda(x)$ та $\rho(x)$ заданого коду, а також обираються параметри процедури «density evolution» в залежності від моделі каналу зв'язку та методу ітеративного декодування.

Етап 2. Біоінспірований пошук коефіцієнтів нормалізації для перевірочних і символічних вершин графу Таннера.

На даному етапі здійснюється оптимізація значень векторів $\bar{\alpha}$ та $\bar{\beta}$ шляхом послідовного застосування процедури «density evolution» для групи даних векторів, які формуються з використанням узагальнених біоінспірованих процедур.

Етап 3. Отримання оптимізованих значень коефіцієнтів нормалізації.

На цьому етапі відбувається формування «кращих» векторів $\bar{\alpha}^*$ і $\bar{\beta}^*$ на основі виконання етапу 2, тобто отримання значень коефіцієнтів нормалізації близьких до оптимальних для заданих параметрів коду та моделі каналу зв'язку.

Зокрема, у результаті проведених досліджень для нерегулярного коду з малою щільністю перевірок на парність з параметрами $n = 100000$, $k = 50000$ та заданими розподілами степенів вершин графу Таннера були знайдені такі коефіцієнти нормалізації: (1; 0,92) – для перевірочних вершин графу Таннера; (1; 0,97; 0,95; 0,88; 0,85; 0,84; 0,83; 0,81; 0,77; 0,75) – для символічних вершин графу Таннера.

Порівняння ефективності декодування нерегулярного (100000, 50000) коду з малою щільністю перевірок на парність з використанням методу на основі розповсюдження довіри та методу мінімальної суми з оптимізованими коефіцієнтами нормалізації наведено на рис. 6.

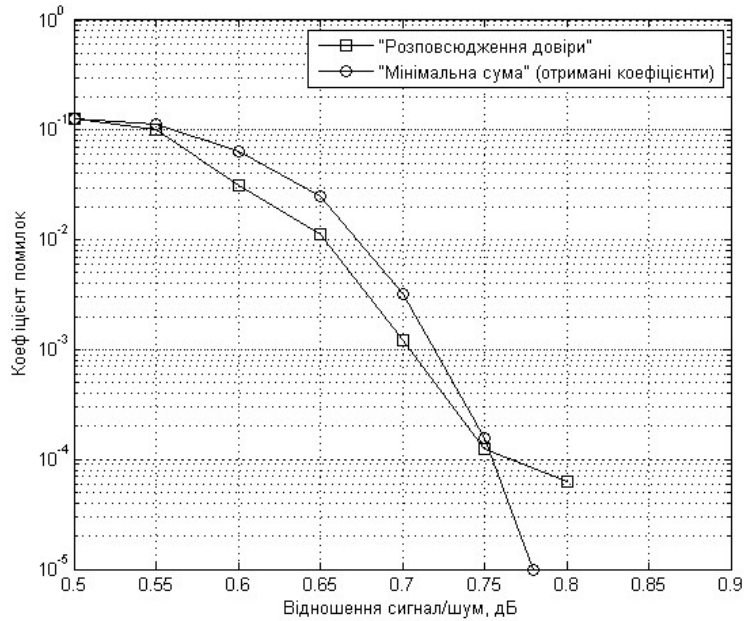


Рис. 6. Залежність коефіцієнту помилок від відношення сигнал/шум для нерегулярного (100000, 50000) коду з малою щільністю перевірок на парність

З рис. 6 слідує, що для даного коду при коефіцієнті помилок 10^{-2} енергетична ефективність методу мінімальної суми приблизно на 0,5 дБ гірша, ніж для методу декодування на основі розповсюдження довіри, але при коефіцієнті помилок менше 10^{-4} ефективність декодування за методом мінімальної суми з оптимізованими коефіцієнтами зростає за рахунок відсутності ефекту «error floor». При цьому для обраної біоінспірованої процедури вигреш за обчислювальною складністю при пошуку коефіцієнтів нормалізації становить близько 30% у порівнянні з методом диференційної еволюції.

У четвертому розділі розроблено біоінспіровані методи м'якого декодування алгебраїчних згорткових кодових конструкцій. У даному розділі вирішено сьоме та восьме завдання дослідження, а також частково десяте завдання стосовно декодування алгебраїчних згорткових кодових конструкцій; отримано шостий та сьомий наукові результати.

Нехай заданий несистематичний (n_0, k_0, V) згортковий код над полем $GF(q)$, який визначається узагальненим породжувальним багаточленом, що фактично є породжувальним багаточленом (N, K, D) коду Ріда-Соломона, з такими параметрами: довжина інформаційного кадру $k_0 = \log_q(H)$ ($H \subseteq GF(q^m)$); довжина кадру кодової послідовності $n_0 = m$; пам'ять коду u ; довжина кодового обмеження $V = uk_0$; довжина інформаційного блоку $k = (u + 1)k_0$; довжина кодового блоку $n = (u + 1)n_0 = kn_0 / k_0$; вільна кодова відстань $d_\infty \geq D$.

Встановлено, що задачу м'якого декодування даного коду, що фактично є довгим двійковим $(N' = Nn_0, K' = Kn_0)$ блоковим кодом, можна представити у вигляді пошуку біполярної кодової послідовності, для якої забезпечується мінімальне значення функції невідповідності кореляції:

$$E(r, v) = \sum_{i: r_i \cdot v_{i,k} < 0} |r_i|, \quad (30)$$

де $|r_i|$ – «надійність» прийнятих символів, яка визначається абсолютним значенням (амплітудою) символів;

$v_{i,k}$ – біполярні кодові символи, об'єднані в кадри по n_0 елементів, $v_{i,k} \in \{1, -1\}$, $k = 1, 2, \dots, n_0$.

Основні етапи запропонованого методу м'якого декодування алгебраїчних згорткових кодів полягають в наступному.

Етап 1. Ініціалізація.

Визначення максимального числа ітерацій $L = L_{\max}$, початкової ітерації $l = 0$, прийнятої послідовності $q = (q_0, q_1, \dots, q_{N'-1})$, де $q_i = |r_i|$.

Етап 2. Впорядковування прийнятої послідовності на основі інформації про надійність символів.

Розташування позицій прийнятої послідовності за зменшенням надійності елементів, що визначає перестановку π_1 при $l = 0$ та перестановку π'_1 при $l > 0$.

Етап 3. Знаходження найбільш надійного базису.

Упорядкування стовбців породжувальної матриці G на основі π_1 при $l = 0$ або π'_1 при $l > 0$. Визначення найбільш надійного базису з використанням методу виключення Гаусса. Перетворення отриманої матриці в систематичну форму G_s при $l = 0$ або G'_s при $l > 0$. Додаткове перетворення може знадобитися для отримання систематичної форми матриці, яка визначається перестановкою π_2 при $l = 0$ або π'_2 при $l > 0$.

Етап 4. Пошук передбачуваної кодової послідовності з використанням узагальнених біоінспірованих процедур, що забезпечує мінімальне значення функції (30).

Спочатку формується жорстке рішення для перших K' символів упорядкованої послідовності q , яке відповідає найбільш надійній інформаційній послідовності i . Після цього відбувається генерація заданого числа випадкових пробних інформаційних послідовностей, тобто відбувається ініціалізація популяції. Далі здійснюється кодування даних інформаційних послідовностей з використанням модифікованої породжувальної матриці алгебраїчного згорткового коду G_s (або G'_s) та оцінка якості отриманих кодових послідовностей шляхом обчислення функції невідповідності кореляції (30). Найкращими є кодові послідовності алгебраїчного згорткового коду, що забезпечують найменші значення даної функції. Потім відбувається міграція агентів популяції (пробних інформаційних послідовностей), що визначається операторами відповідної біоінспірованої процедури, та обчислюється оцінка якості нових кодових послідовностей. Завершується пошук при задоволенні деякого критерію (наприклад, досягненні заданого числа ітерацій) знаходженням «найкращої» інформаційної послідовності та відповідної кодової послідовності.

Етап 5. Застосування випадкового зміщення до елементів прийнятої

послідовності.

Якщо число ітерацій $l \leq L_{\max}$, то відбувається додавання випадкового зміщення θ до прийнятої послідовності у відповідності з $r'_i = r_i + \theta$, де θ – двійкова випадкова величина, яка приймає з рівною імовірністю значення $\pm a$, де a – деяке дійсне число, та здійснюється перехід до етапу 2.

Етап 6. Формування оцінки переданої кодової послідовності за допомогою зворотного відображення $y' = (y'_0, y'_1, \dots, y'_{N'-1}) = \pi'_2[\pi'_1[r]]$ і завершення процесу декодування.

Порівняння результатів моделювання у каналі з АБГШ запропонованого біоінспірованого методу декодування з випадковим зміщенням та алгебраїчного методу декодування для алгебраїчного (3, 1, 3) згорткового коду наведено на рис. 7, з аналізу якого випливає, що запропонований метод декодування у порівнянні з алгебраїчним методом декодування забезпечує енергетичний вииграш від кодування у діапазоні від 1,6 дБ до 3 дБ в залежності від необхідного коефіцієнту помилок.

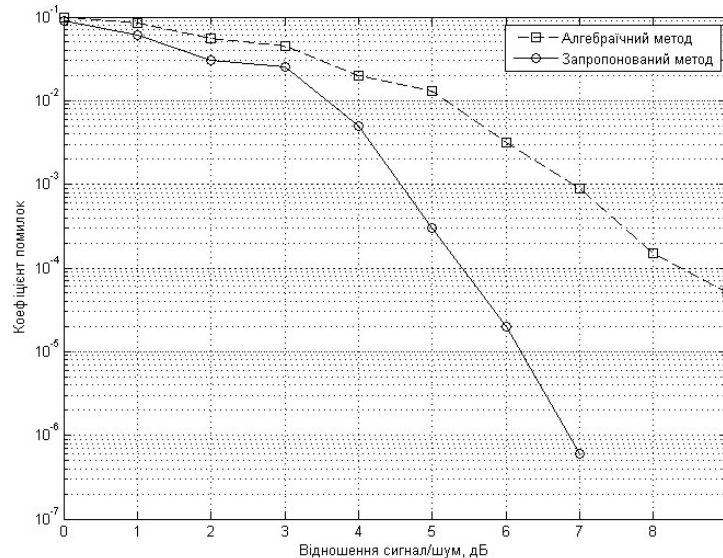


Рис. 7. Залежність коефіцієнту помилок від відношення сигнал/шум для алгебраїчного (3, 1, 3) згорткового коду

Доведено, що для виправлення пакетів помилок, які виникають в каналах з пам'яттю, доцільно застосовувати алгебраїчні несистематичні (n_0, k_0, V, M) згорткові коди перемежування зі швидкістю кодування $R = k_0 / n_0$, параметри яких повністю визначаються модифікованим узагальненим породжувальним багаточленом, що фактично представляє собою змінений породжувальний багаточлен (N, K, D) коду Ріда-Соломона. Дані коди мають такі параметри: глибина перемежування M ; довжина інформаційного кадру $k'_0 = Mk_0 = M \log_q(H)$; довжина кадру кодової послідовності $n'_0 = Mn_0 = Mt$; швидкість кодування $R = k'_0 / n'_0 = k_0 / n_0$; пам'ять коду $u' = Mu$; довжина кодового обмеження $V' = u'k'$; довжина інформаційного блоку $k' = (u'+1)k'_0$; довжина кодового блоку

$n' = (u'+1)n'_0 = k'n'_0 / k'_0$; вільна кодова відстань $d_\infty \geq D$.

Показано, що при обмеженій інформаційній послідовності алгебраїчні згорткові коди перемежування можуть бути представлені як довгі двійкові ($N'' = NMn_0, K'' = KMn_0$) блокові коди, які можна задати як за допомогою породжувальної матриці, так і перевіркою матриці.

Позначимо надійність кожного символу на ітерації w , представлену у вигляді відповідного логарифмічного відношення правдоподібності, як $L^w(c_{u,l,k})$. Відмітимо, що спочатку надійність кожного символу ініціалізується як апіорна інформація, що прийнята з каналу.

На першій стадії спочатку здійснюється формування найбільш надійного базису з використанням методу виключення Гаусса, а потім відбувається пошук передбачуваної кодової послідовності з використанням узагальнених біоінспірованих процедур, що забезпечує мінімальне значення відповідної цільової функції. При цьому основними етапами біоінспірованих процедур є ініціалізація популяції, міграція агентів популяції та завершення пошуку. Крім того, для підвищення ефективності пошуку передбачуваної кодової послідовності додатково можна застосувати випадкове зміщення для формування різноманітних пробних векторів. Особливості реалізації даної стадії декодування представлені вище.

На другій стадії на початку кожної ітерації w процедури адаптивного розповсюдження довіри перевірна матриця коду H' перетворюється в матрицю H'^w , так що стовбці даної матриці, що відповідають найменш надійним символам (у відповідності з інформацією про надійність символів, отриманої на попередній ітерації, $L^{w-1}(c_{u,l,k})$) мають одиничну вагу. Відмітимо, що завжди можна сформувати $N'' - K''$ стовбців матриці H' , які мають одиничну вагу, навіть, якщо дані $N'' - K''$ символи не будуть найменш надійними. Нехай $i_1, i_2, \dots, i_{N''}$ позначають індекси символів, що відповідають упорядкованим в порядку зростання елементам $|L^w(c_{u,l,k})|$. При цьому перевірна матриця перетворюється починаючи з i_1 -ого стовбця й обробляється послідовно для кожного індексу, поки $N'' - K''$ стовбців не будуть мати одиничну вагу. Дане перетворення збільшує правдоподібність помилкових символів шляхом переміщення ребр в графі Таннера, який відповідає перевірочній матриці. Таким чином, зменшується імовірність того, що помилковий символ бере участь в будь-якому циклі графу Таннера – в результаті чого обмежується розповсюдження помилок. Потім здійснюється ітерація декодування на основі розповсюдження довіри з використанням отриманої перевіркою матриці.

Таким чином, w -ую ітерацію запропонованого методу декодування алгебраїчних згорткових кодів перемежування можна представити наступним чином.

Стадія 1. Декодування на основі узагальнених біоінспірованих процедур.

З використанням логарифмічного відношення правдоподібності для кожного символу $L^{w-1}(c_{u,l,k})$ формується найбільш надійний базис. Далі здійснюється пошук передбачуваної кодової послідовності з використанням узагальнених біоінспірованих процедур. Якщо отриманий вектор є передбачуваною кодовою послідовністю, то процес декодування завершується, в противному випадку

здійснюється перехід до стадії 2.

Стадія 2. Декодування на основі процедур адаптивного розповсюдження довіри.

На основі логарифмічного відношення правдоподібності для кожного символу $L^{w-1}(c_{u,l,k})$ будується оновлена перевірна матриця H'^w . Потім з використанням даної матриці та зовнішньої інформації $L_{ext}^{w-1}(c_{u,l,k})$ формується нова зовнішня інформація $L_{ext}^w(c_{u,l,k})$ та оновлена інформація про надійність символів $L^w(c_{u,l,k})$, яка застосовується на наступній ітерації декодування на основі узагальнених біоінспірованих процедур для знаходження нової кодової послідовності для оновленого найбільш надійного базису.

Отже, запропонований підхід можна розглядати як адаптивну версію комбінованого декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність. При цьому застосування процедур адаптивного розповсюдження довіри дозволяє здійснювати ітеративне декодування алгебраїчних згорткових кодів перемешування, графі Таннера яких мають багато коротких циклів, що призводить до розповсюдження помилок при використанні класичного методу декодування на основі розповсюдження довіри.

На рис. 8 представлено порівняння результатів моделювання у каналі Релея розробленого адаптивного методу декодування та алгебраїчного методу декодування для алгебраїчного (4, 1, 8, 15) згорткового коду перемешування.

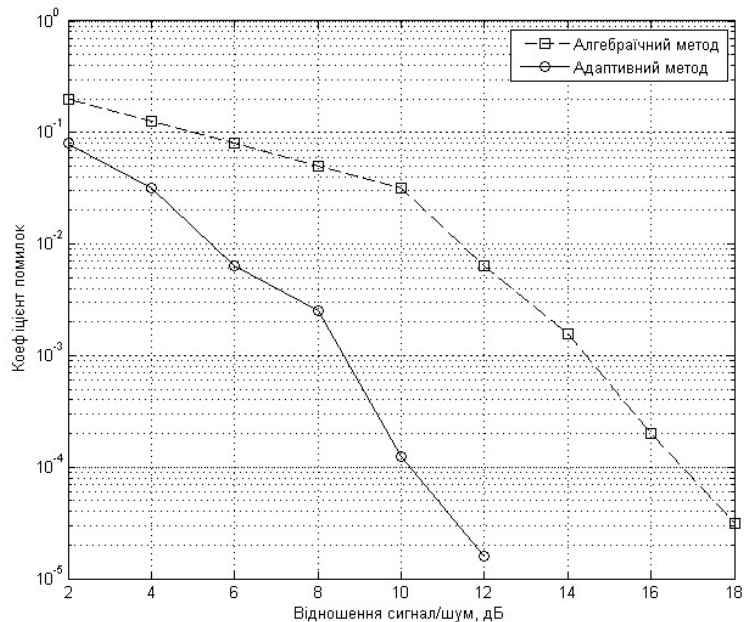


Рис. 8. Залежність коефіцієнту помилок від відношення сигнал/шум для алгебраїчного (4, 1, 8, 15) згорткового коду перемешування

З аналізу рис. 8 слідує, що представлений метод декодування у порівнянні з алгебраїчним методом декодування забезпечує енергетичний виграш від кодування від 5,8 до 6,5 дБ в залежності від необхідного коефіцієнту помилок.

Проведені експериментальні дослідження показали, що запропоновані методи

декодування забезпечують значний енергетичний вигаш від кодування у порівнянні з існуючими методами алгебраїчного декодування як для каналів з випадковими помилками, так і для каналів з пам'яттю.

У п'ятому розділі запропоновано біоінспірований метод оптимізації кодів Лабі для моделі каналу зі стиранням за заданими критеріями. У даному розділі вирішено дев'яте завдання дослідження, а також частково десяте завдання стосовно оптимізації кодів Лабі; отримано восьмий науковий результат.

Встановлено, що для забезпечення високої ефективності декодування кодів Лабі на основі розповсюдження довіри необхідне використання «хорошого» розподілу степенів кодових вершин графу Таннера. При цьому в залежності від області застосування кодів Лабі із заданим числом інформаційних символів k основними критеріями оптимізації можуть бути: надмірність ε , частота відмов r , імовірність відмови p , обчислювальна складність кодування (декодування) ν .

Шуканий розподіл степенів кодових вершин графу Таннера (фактично щільність розподілу імовірностей) можна представити у вигляді вектору, елементами якого є нормалізовані дійсні числа. Для зменшення розмірності оптимізаційної задачі для відносно довгих кодів Лабі доцільно заздалегідь вибрати позиції d з безлічі D з ненульовими значеннями імовірностей у вихідному векторі. Тоді розподіл степенів кодових вершин графу Таннера, що підлягає оптимізації, можна представити наступним чином:

$$\omega(d) = \begin{cases} \omega_1, d = 1, \\ \omega_d, d \in D, \\ 0, d \notin D. \end{cases} \quad (31)$$

Показано, що з практичної точки зору бажано використовувати єдиний розподіл степенів кодових вершин (31) для кодів Лабі різного призначення. Для отримання такого «універсального» розподілу доцільно використовувати підхід на основі багатокритеріальної оптимізації, тоді відповідну оптимізаційну задачу можна представити наступним чином:

$$f(\bar{\omega}^*) = \min_{\bar{\omega} \in \bar{\omega}'} (f_1(\bar{\omega}), f_2(\bar{\omega}), f_3(\bar{\omega}), f_4(\bar{\omega})), \quad (32)$$

$$f_1(\bar{\omega}) = \varepsilon, f_2(\bar{\omega}) = r, f_3(\bar{\omega}) = p, f_4(\bar{\omega}) = \nu, \quad (33)$$

$$k = \text{const}, \quad (34)$$

$$\bar{\omega}' = \left\{ \bar{\omega} \left[\begin{array}{l} 0 < \omega_1 < 1, \\ 0 < \omega_d < 1 \\ \sum_{d=1}^k \omega(d) = 1 \\ 1 \leq d \leq k \\ d = 1, d \in D \end{array} \right. \right\}, \quad (35)$$

де $\bar{\omega}$ – деяке рішення, що відповідає вектору, який складається з елементів розподілу степенів кодових вершин;

$\bar{\omega}'$ – безліч припустимих рішень, що відповідає групі векторів $\bar{\omega}$;

$\bar{\omega}^*$ – глобальний (локальний) мінімум, що відповідає «кращому» вектору, який складається з елементів розподілу степенів кодових вершин.

З аналізу функцій (33) та обмежень (34) та (35) слідує, що сформульована задача мінімізації (32) є багатокритеріальною задачею нелінійного програмування, для вирішення якої, запропоновано метод оптимізації кодів Лабі, що складається з таких етапів

Етап 1. Вибір параметрів коду Лабі та характеристик моделі каналу зв'язку зі стиранням.

На даному етапі здійснюється вибір числа інформаційних символів k , формування множини D з ненульовими значеннями імовірностей у розподілі ймовірностей $\omega(d)$, завдання ймовірності стирання у каналі зв'язку.

Етап 2. Встановлення критеріїв оптимізації коду Лабі (надмірності, частоти відмов, імовірності відмови, обчислювальної складності кодування (декодування)).

Етап 3. Біоінспірована оптимізація розподілу кодових вершин коду Лабі з використанням заданої процедури пошукової оптимізації.

Крок 1. Формування групи пробних векторів рішень.

Крок 2. Перетворення пробних векторів рішень у відповідні пробні розподіли ймовірностей.

Крок 3. Моделювання процесу передачі інформації через стираючий канал зв'язку з використанням кодів Лабі, що включає кодування інформаційних символів та декодування прийнятих символів на основі методу розповсюдження довіри.

Крок 4. Обчислення обраних параметрів (критеріїв оптимізації) коду Лабі, заданого кожним з розподілів ймовірностей.

Крок 5. Модифікація пробних векторів рішень шляхом застосування міграційних операторів заданої біоінспірованої процедури пошукової оптимізації.

Етап 4. Формування «найкращого» розподілу кодових вершин для коду Лабі для заданих умов.

Зокрема, у результаті моделювання за критерієм мінімальної надмірності отримано такі оптимізовані розподіли кодових вершин графу Таннера, що відповідають коду Лабі із заданим числом інформаційних символів, у поліноміальному представленні:

- при $k = 100$ – $\omega(x) = 0,084x + 0,345x^2 + 0,376x^3 + 0,113x^{11} + 0,082x^{33}$;

- при $k = 500$ –

$\omega(x) = 0,132x + 0,261x^2 + 0,389x^3 + 0,091x^{18} + 0,073x^{55} + 0,054x^{166}$;

- при $k = 1000$ –

$\omega(x) = 0,147x + 0,258x^2 + 0,332x^3 + 0,121x^{12} + 0,083x^{37} + 0,037x^{111} + 0,022x^{333}$.

Порівняння «найкращих» значень надмірності коду Лабі для заданого числа інформаційних символів, отриманих для різних розподілів степенів кодових вершин графу Таннера, наведено на рис. 9.

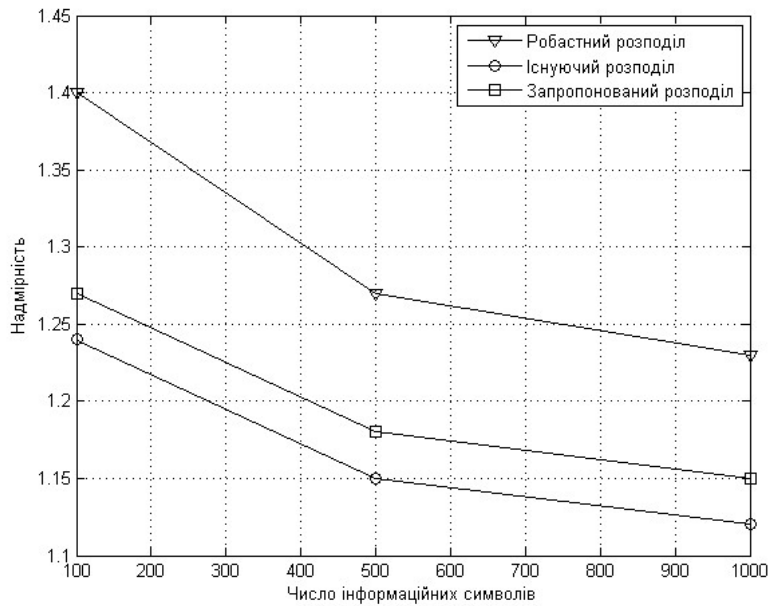


Рис. 9. Залежність надмірності коду Лабі від числа інформаційних символів

Проведені дослідження показали, що запропонований метод оптимізації дозволяє зменшити обчислювальну складність синтезу кодів Лабі для телекомунікаційних мереж з комутацією пакетів та забезпечує більш швидке знаходження покращених розподілів степенів кодових вершин відповідних графів Таннера у порівнянні з існуючими методами. При цьому характеристики даних кодів залишаються на прийнятному з практичної точки зору рівні.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-прикладна проблема підвищення достовірності передачі інформації та збільшення енергетичної ефективності від кодування у телекомунікаційних системах і мережах шляхом розробки методів декодування та оптимізації завадостійких кодових конструкцій різних класів.

Найбільш важливі наукові та практичні результати, що отримані в дисертації, такі.

1. Проведені дослідження показали, що існуючі методи завадостійкого кодування не забезпечують постійно зростаючі вимоги щодо достовірності передачі інформації у телекомунікаційних системах та мережах. Наприклад, м'яке декодування лінійних блокових кодів, зокрема кодів БЧХ, характеризується значною обчислювальною складністю, а застосування жорсткого декодування призводить до зниження енергетичної ефективності від кодування. Необхідне подальше удосконалення методів синтезу коротких нерегулярних кодів з малою щільністю перевірок на парність та методів м'якого декодування кодів даного класу. Для підвищення достовірності передачі інформації при застосуванні алгебраїчних згорткових кодових конструкцій у каналах зв'язку з випадковими помилками та

групуванням помилок необхідний перехід до м'якого декодування. Також подальшого розвитку потребують підходи щодо підвищення ефективності кодів Лабі при пакетній передачі інформації. Показано, що проблему декодування (оптимізації) завадостійких кодових конструкцій різних класів для заданих умов передачі інформації доцільно формально представити у вигляді оптимізаційної задачі, що визначається відповідною цільовою функцією та обмеженнями, та науково обґрунтовано застосування узагальненого біоінспірованого підходу для вирішення даної задачі.

2. Удосконалено методи декодування двійкових лінійних блокових кодів, що засновані на використанні узагальнених біоінспірованих процедур пошукової оптимізації для визначення переданого кодового слова після знаходження найбільш (найменш) надійного базису на основі породжувальної (перевірочної) матриці, що враховує інформацію про надійність прийнятих з каналу зв'язку символів. На прикладі алгебраїчних блокових кодів БЧХ з різними параметрами доведено, що декодування на основі біоінспірованого підходу забезпечує у порівнянні з двійковою фазовою модуляцією енергетичний вигравш від кодування 3-6 дБ при коефіцієнті помилок 10^{-4} , а у порівнянні з існуючим методом декодування на основі впорядкованих статистик різних порядків – до 0,6 дБ в залежності від необхідного коефіцієнту помилок. При цьому обчислювальна складність біоінспірованого декодування менша, ніж у декодування на основі впорядкованих статистик високих порядків, наприклад, для (128, 120) БЧХ коду запропонований метод декодування потребує обробки 2500 кодових слів замість 7260 кодових слів при використанні методу декодування на основі впорядкованих статистик другого порядку.

3. Отримав подальший розвиток метод оптимізації відносно коротких нерегулярних кодів з малою щільністю перевірок на парність, який заснований на біоінспірованому пошуку розподілу серед зменшеного числа степенів символних вершин графу Таннера, що відповідає обраному коду. При цьому побудова графу Таннера здійснювалась на основі методу PEG, а оцінка ефективності отриманого нерегулярного коду з малою щільністю перевірок на парність, заснована на обчисленні коефіцієнту помилок під час комп'ютерного моделювання передачі інформації для обраної моделі каналу зв'язку. Застосування запропонованого методу оптимізації дозволяє підвищити ефективність синтезу кодів даного класу та забезпечити енергетичний вигравш від кодування близько 0,5 дБ у порівнянні з регулярними кодами такої ж довжини при коефіцієнті помилок 10^{-3} . При цьому у отриманих кодах відсутній ефект «error floor» на відміну від існуючих випадкових нерегулярних кодів, що дозволяє отримати значно менший коефіцієнт помилок в області високих значень відношення сигнал/шум.

4. Удосконалено метод ітеративного декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність, що використовує у якості цільової функції модифіковане правило кореляційного декодування. Через наявність значного числа локальних мінімумів у обраній цільовій функції для підвищення ефективності знаходження екстремуму даної функції науково обґрунтовано застосування узагальнених

біоінспірованих процедур пошукової оптимізації. Запропонований метод декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність дозволяє забезпечити меншу ймовірність помилки декодування у порівнянні з існуючим методом декодування на основі градієнтного спуску, наприклад, для регулярного (1008, 504) коду при відношенні сигнал/шум 6 дБ ймовірність помилки декодування становить 10^{-7} (зменшується на порядок), хоча для нерегулярного коду з такими ж параметрами ефективність декодування знижується. Крім того, запропонований метод декодування має більшу обчислювальну складність у порівнянні з методом на основі градієнтного спуску. Наприклад, при відношенні сигнал/шум на рівні 4 дБ метод декодування на основі біоінспірованого пошуку потребує порядку 100 ітерацій, а існуючий метод декодування з інвертуванням одного біту – близько 60 ітерацій.

5. Вперше запропоновано комбінований метод декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність, в основі якого лежить поєднання класичного м'якого декодування на основі розповсюдження довіри та декодування на основі узагальнених біоінспірованих процедур пошукової оптимізації з використанням інформації про найбільш надійний базис породжувальної матриці обраного коду. Запропонований метод декодування даних кодів дозволяє підвищити достовірність передачі інформації в порівнянні зі стандартним методом декодування на основі розповсюдження довіри, зокрема, при відношенні сигнал/шум 2 дБ для (504, 252) коду виграш становить більше одного порядку, але при зростанні довжини коду виграш знижується. При цьому даний метод декодування забезпечує більшу ефективність у діапазоні високого відношення сигнал/шум, що пояснюється зростанням точності знаходження близького до оптимального рішення за допомогою біоінспірованого пошуку на основі «більш надійного» вектору правдоподібності, але має більш високу обчислювальну складність за рахунок застосування додаткової стадії при декодуванні.

6. Отримав подальший розвиток метод оптимізації коефіцієнтів нормалізації при декодуванні мінімальної суми кодів з малою щільністю перевірок на парність, що заснований на використанні процедури еволюції щільності та біоінспірованих процедур зменшеної складності для обраної моделі каналу зв'язку та параметрів коду. Запропонований метод оптимізації коефіцієнтів нормалізації дозволяє отримати виграш за обчислювальною складністю близько 30% у порівнянні з методом диференційної еволюції, що призводить до прискорення визначення покращених коефіцієнтів нормалізації. Це дозволило застосувати даний підхід до більш довгих кодів, наприклад, для (100000, 50000) коду при коефіцієнті помилок менше 10^{-4} ефективність декодування за методом мінімальної суми з оптимізованими коефіцієнтами значно зростає у порівнянні з методом декодування на основі розповсюдження довіри за рахунок відсутності ефекту «error floor».

7. Вперше запропоновано метод декодування алгебраїчних згорткових кодів для каналів зв'язку з випадковими помилками, в основі якого лежить формування найбільш надійного базису породжувальної матриці для зменшення області

біоінспірованого пошуку серед пробних векторів, отриманих у результаті застосування механізму випадкового зміщення. В залежності від параметрів обраних кодів запропонований біоінспірований метод декодування у порівнянні з існуючим алгебраїчним методом декодування дозволяє підвищити ефективність від кодування для каналу з адитивним білим гауссовим шумом від 1,6 дБ до 3 дБ.

8. Вперше запропоновано адаптивний метод декодування алгебраїчних згорткових кодів перемежування для каналів зв'язку з пам'яттю, який заснований на ітеративному застосуванні біоінспірованих процедур до модифікованої перевірконої матриці даних кодів, отриманої в результаті адаптивного розповсюдження довіри. Для обраних алгебраїчних згорткових кодів перемежування та каналу Релея енергетичний виграш від кодування при застосуванні запропонованого методу декодування у порівнянні з алгебраїчним методом декодування складає від 4,1 дБ до 6,5 дБ.

9. Одержав подальший розвиток метод оптимізації кодів Лабі, який заснований на біоінспірованому пошуку зменшеної складності покращених розподілів степенів кодових вершин графів Таннера, що відповідають даним кодам, відповідно до таких критеріїв як надмірність, частота відмов, імовірність відмови, обчислювальна складність кодування (декодування) тощо. Запропонований метод оптимізації дозволяє отримати коди Лабі з прийнятними характеристиками за рахунок прискорення знаходження покращених розподілів степенів кодових вершин відповідних графів Таннера. Наприклад, погіршення надмірності для кодів Лабі із заданим числом інформаційних символів у порівнянні з відомим розподілом не перевищує 3%, а при багатокритеріальній оптимізації коду Лабі з довжиною інформаційних символів 100 досягнення близьких до оптимальних значень обраних параметрів коду потребує на 50 ітерацій менше у порівнянні з існуючим методом оптимізації.

10. На основі запропонованих методів декодування та оптимізації завадостійких кодових конструкцій різних класів розроблено відповідні алгоритми та псевдокоди, що лежать в основі їх програмної реалізації, а також досліджено ефективність даних методів для певних моделей каналу зв'язку та умов передачі інформації шляхом порівняння з існуючими методами.

11. Достовірність та наукова обґрунтованість отриманих результатів підтверджується відсутністю протиріч з основними положеннями теорії інформації, теорії завадостійкого кодування, теорії оптимізації, теорії математичного програмування, а також збіжністю отриманих результатів із даними експериментальних досліджень та результатами математичного моделювання. Основні результати, отримані у дисертаційній роботі, впроваджено.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в наукових фахових виданнях України та виданнях України, що входять до наукометричних баз:

1. Приходько С. И., Бабаев М. М., Волков А. С., Штомпель Н. А., Боцул А. В. Метод модификации обобщенного порождающего многочлена алгебраических сверточных кодов. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2012. №6. С. 30–35.
2. Боцул А. В., Волков А. С., Приходько С. И., Штомпель Н. А. Метод декодирования алгебраических сверточных кодов перемещения. *Системи обробки інформації*. 2012. Вип. 7 (105). С. 172–176.
3. Боцул А. В., Зубенко В. А., Волков А. С., Штомпель Н. А. Свойства алгебраических сверточных кодов перемещения. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2013. Вип. 5 (102). С. 16–22.
4. Боцул А. В., Волков А. С., Приходько С. И., Штомпель Н. А. Метод построения алгебраических сверточных кодов перемещения. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2013. № 136. С. 232–235.
5. Штомпель Н. А. Методы мягкого декодирования кодов с малой плотностью проверок на четность. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. 2013. № 27 (1000). С. 163–168.
6. Штомпель Н. А. Оценка вычислительной сложности методов кодирования кодами с малой плотностью проверок на четность. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2013. Вип. 4 (101). С. 69–71.
7. Штомпель Н. А. Вычислительная сложность методов декодирования кодов с малой плотностью проверок на четность. *Системи обробки інформації*. 2013. Вип. 6 (113). С. 177–180.
8. Боцул А. В., Волков А. С., Приходько С. И., Штомпель Н. А., Билал Хамзе Особенности метода декодирования алгебраических сверточных кодов перемещения. *Системи обробки інформації*. 2013. Вип. 2 (109). С. 146–149.
9. Боцул А. В., Волков А. С., Приходько С. И., Штомпель Н. А. Метод построения алгебраических несистематических сверточных кодов перемещения с произвольной скоростью кодирования. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2014. Вип. 2 (105). С. 8–11.
10. Волков А. С., Зубенко В. А., Приходько С. И., Штомпель Н. А. Исследование характеристик алгебраических несистематических сверточных кодов перемещения. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2014. Вип. 6 (109). С. 13–19.
11. Асауленко І. О., Штомпель М. А. Дослідження характеристик телекомунікаційних систем з використанням програмних реалізацій каналів зв'язку. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2015. № 1. С. 34–41.
12. Асауленко І. О., Приходько С. І., Штомпель М. А. Аналіз методів відновлення даних у телекомунікаційних мережах з комутацією пакетів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2015. Вип. 4 (113).

С. 27–38.

13. Асауленко І. О., Приходько С. І., Штомпель М. А. Метод декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність на основі стохастичної оптимізації. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2015. Вип. 5 (114). С. 61–65.

14. Асауленко І. О., Жученко О. С., Приходько С. І., Штомпель М. А. Дослідження характеристик методу декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність на основі стохастичної оптимізації. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2016. Вип. 1 (116). С. 33–40.

15. Жученко А. С., Панченко Н. Г., Панченко С. В., Штомпель Н. А. Метод декодирования линейных блоковых кодов на основе популяционных процедур поисковой оптимизации. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2016. Вип. 2 (117). С. 25–29.

16. Приходько С. І., Штомпель М. А. Методи ітеративного декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2016. Вип. 3 (118). С. 11–14.

17. Штомпель Н. А. Мягкое декодирование высокоскоростных блоковых кодов на основе популяционных процедур поисковой оптимизации. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2016. Вип. 4 (119). С. 15–19.

18. Штомпель Н. А. Метод комбинированного декодирования кодов с малой плотностью проверок на четность. *Проблеми телекомунікацій*. 2016. № 2 (19). С. 35–43. URL: http://pt.journal.kh.ua/2016/2/1/162_shtompel_decoding.pdf.

19. Штомпель Н. А. Мягкое декодирование алгебраических сверточных кодов на основе природных вычислений. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2016. Вип. 5 (120). С. 14–18.

20. Штомпель Н. А. Оптимизация нерегулярных кодов с малой плотностью проверок на четность на основе природных вычислений. *Радіотехніка: всеукр. міжвід. наук.-техн. зб.* 2016. Вип. 186. С. 207–210.

21. Штомпель Н. А. Биоинспирированный метод оптимизации кодов на основе преобразования Лаби. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка*. 2016. № 2 (23). С. 153–157.

22. Штомпель Н. А. Адаптивное декодирование алгебраических сверточных кодов перемежения. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2016. Вип. 6 (121). С. 18–22.

23. Штомпель Н. А. Биоинспирированный подход к оптимизации декодирования кодов с малой плотностью проверок на четность. *Радіотехніка: всеукр. міжвід. наук.-техн. зб.* 2016. Вип. 187. С. 34–37.

24. Штомпель Н. А. Многокритериальная оптимизация кодов Лаби на основе природных вычислений. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2017. Вип. 1 (122). С. 24–27.

25. Штомпель Н. А. Функциональное представление линейных помехоустойчивых кодов. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2017. № 1. С. 120–122.

26. Штомпель Н. А. Тенденции развития методов помехоустойчивого

кодирования информации в телекоммуникациях. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2017. № 1. С. 35–37.

27. Штомпель М. А. Принципы программной реализации биоинспирированного метода декодирования высокошвидкісних лінійних блокових кодів. *Системи обробки інформації*. 2017. № 3. С. 72–75.

28. Жученко О. С., Приходько С. І., Штомпель М. А. Особенности программной реализации биоинспирированного метода м'якого декодирования лінійних блокових кодів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2017. Вип. 2 (123). С. 26–30.

Тези доповідей у збірниках наукових конференцій:

29. Приходько С. І., Штомпель Н. А., Боцул А. В. Анализ методов помехоустойчивого кодирования информации в каналах с памятью. *Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку: збірник тез доповідей науково-практичної конференції Академії внутрішніх військ МВС України (м. Харків, 21-22 березня 2012 р.)*. Харків, 2012. С. 55.

30. Боцул А. В., Приходько С. І., Штомпель Н. А. Принципы построения алгебраических сверточных кодов перемежения. *67-ма науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів: матеріали, ч. 1 (м. Одеса, 5-7 грудня 2012 р.)*. Одеса, 2012. С. 17–18.

31. Штомпель М. А. Развитие методов завадостійкого кодування у волоконно-оптичних телекомунікаційних системах. *75-та міжнародна науково-технічна конференція кафедр академії, інженерно-технічних працівників залізниць, підприємств та організацій України та інших країн: тези доповідей (м. Харків, 24–25 квітня 2013 р.)*. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2013. № 136. С. 275.

32. Боцул А. В., Приходько С. І., Штомпель Н. А. Особенности построения алгебраических сверточных кодов для каналов с памятью. *Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку: тези доповідей науково-практичної конференції Академії внутрішніх військ МВС України (м. Харків, 20–21 березня 2013 р.)*. Харків, 2013. С. 32–33.

33. Штомпель Н. А. Методы построения проверочных матриц кодов с малой плотностью проверок на четность. *Внедрение перспективных микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и средств телекоммуникаций на базе цифровизации»: матеріали стендових доповідей та виступів учасників 26-ої Міжнародної науково-практичної конференції (м. Алушта, 23–28 вересня 2013 р.)*. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2013. Вип. 4 (101). С. 65–66.

34. Штомпель Н. А. Адаптивный метод мягкого декодирования блоковых кодов. *Залізничний транспорт: сучасні проблеми науки: тези доповідей XLIII науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів, частина 1 (м. Київ, 12 грудня 2013 р.)*. Київ, 2013. С. 178–179.

35. Штомпель Н. А. Комбинированный метод декодирования кодов с малой

плотністю перевірок на четність. *Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку*: збірник тез доповідей науково-практичної конференції (м. Харків, 12–13 березня 2014 р.). Харків, 2014. С. 96–97.

36. Штомпель М. А. Методи кодування кодами з малою щільністю перевірок на парність. *Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті*: тези доповідей 76-ої Міжнародної науково-технічної конференції (м. Харків, квітень 2014 р.). *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2014. № 143. С. 226.

37. Штомпель Н. А. Метод неалгебраического декодирования двоичных кодов БЧХ. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: матеріали стендових доповідей та виступів учасників 27-ої Міжнародної науково-практичної конференції (м. Алушта, вересень 2014 р.). *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: додаток. 2014. №4. С. 47.

38. Штомпель Н. А. Метод мягкого декодирования двоичных линейных блоковых кодов. *Сучасні проблеми залізничного транспорту*: тези доповідей XLIV науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів, частина 1 (м. Київ, 27 листопада 2014 р.). Київ, 2014. С. 182–183.

39. Асауленко І. О., Штомпель М. А. Аналіз підходів до підвищення вірогідності передачі даних у інформаційній інфраструктурі залізничного транспорту. *Проблеми економіки та управління на залізничному транспорті*: матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції (м. Київ, 17 листопада – 14 грудня 2014 р.). Київ, 2014. – С. 164.

40. Штомпель Н. А. Метод оптимизации нерегулярных кодов с малой плотностью проверок на четность. *Політ. Сучасні проблеми науки*: тези доповідей XV Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених і студентів (м. Київ, 8–9 квітня 2015 р.). Київ, 2015. – С. 34.

41. Штомпель М. А. Субоптимальный метод декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність. *Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті*: тези доповідей 77-ої Міжнародної науково-технічної конференції (м. Харків, 21–23 квітня 2015 р.). *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2015. № 151 (1). С. 48.

42. Приходько С. И., Штомпель Н. А. Декодирование двоичных блоковых кодов на основе методов стохастической оптимизации. *Проблеми економіки та управління на залізничному транспорті*: матеріали X ювілейної Міжнародної науково-практичної конференції (м. Одеса, 30 червня–1 липня 2015 р.). Київ, 2015. С. 126.

43. Асауленко И. А., Приходько С. И., Штомпель Н. А. Метод итеративного декодирования линейных блоковых кодов на основе стохастической оптимизации. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: матеріали стендових доповідей та виступів учасників 28-ої Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 24–25 вересня 2015 р.). *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: додаток. 2015. Вип. 4 (113). С. 27–28.

44. Штомпель Н. А. Оптимизация каскадных блоковых кодов на основе популяционных методов. *Актуальні проблеми розвитку науки і техніки*: збірник тез I Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 22 жовтня 2015 р.). Київ,

2015. С. 88–89.

45. Штомпель Н. А. Построение кодов с малой плотностью проверок на четность на основе природных вычислений. *Современные информационно-телекоммуникационные технологии*: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції, том III. Розвиток інформаційних технологій (м. Київ, 17–20 листопада 2015 р.). Київ, 2015. С. 53–54.

46. Асауленко І. О., Штомпель М. А. Декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність на основі природних обчислень. «ТАК»: *телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології*: збірка доповідей Міжрегіональної науково-практичної конференції молодих учених (м. Красноармійськ, 16–17 листопада 2015 р.). Красноармійськ, 2015. С. 9–11.

47. Жученко А. С., Штомпель Н. А. Метод декодування блокових кодів на основі процедур природних вычислений. *Актуальні проблеми розвитку науки і техніки*: збірник тез II Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 20 грудня 2015 р.). Київ, 2015. С. 7.

48. Панченко Н. Г., Штомпель М. А., Жученко О. С. Оптимізація стираючих кодів без фіксованої швидкості на основі природних обчислень. *Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті*: тези доповідей 78-ої Міжнародної науково-технічної конференції (м. Харків, 26–28 квітня 2016 р.). *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*: додаток. 2016. № 160. С. 9–10.

49. Жученко А. С., Панченко С. В., Приходько С. І., Штомпель Н. А. Биоинспирированный подход к построению кодов с малой плотностью проверок на четность. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: матеріали стендових доповідей та виступів учасників 29-ої Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 27–29 вересня 2016 р.). *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: додаток. 2016. Вип. 4 (119). С. 5–6.

50. Штомпель Н. А. Повышение эффективности кодов без фиксированной скорости на основе природных вычислений. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: матеріали стендових доповідей та виступів учасників 29-ої Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 27–29 вересня 2016 р.). *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: додаток. 2016. Вип. 4 (119). С. 26.

51. Штомпель Н. А. Декодирование блоковых кодов на основе биоинспирированных процедур оптимизации. *Современные средства связи*: материалы XXI Международной научно-технической конференции (г. Минск, Республика Беларусь, 20–21 октября 2016 года). Минск, 2016. С. 17–18.

52. Асауленко І. О., Приходько С. І., Штомпель М. А. Метод декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність на основі популяційних процедур пошукової оптимізації. *Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку*: збірник тез доповідей науково-практичної конференції (м. Харків, 17–18 березня 2016 р.). Харків, 2016. С. 41–42.

53. Штомпель М. А. Метод оптимізації фонтанних кодів на основі популяційних процедур пошукової оптимізації. *Політ. Сучасні проблеми науки*: тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених і студентів

(м. Київ, 6–8 квітня 2016 р.). Київ, 2016. – С. 126.

54. Штомпель Н. А. Декодирование алгебраических сверточных кодов на основе бионических процедур. *«ТАК»: телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології*: збірка доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених (м. Покровськ, 29–30 листопада 2016 р.). Покровськ, 2016. С. 19–21.

55. Штомпель Н. А. Биоинспирированная многокритериальная оптимизация кодов Лаби. *Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку*: збірник тез доповідей науково-практичної конференції (м. Харків, 15–16 березня 2017 р.). Харків, 2017. С. 76.

56. Штомпель М. А. Напрями розвитку завадостійкого кодування у телекомунікаціях. *Прикладні науково-технічні дослідження*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (м. Івано-Франківськ, 5–7 квітня 2017 р.). Івано-Франківськ, 2017. С. 109.

57. Жученко О. С., Приходько С. І., Штомпель М. А. Біоінспірований метод м'якого декодування лінійних блокових кодів. *Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті*: тези доповідей 79-ої Міжнародної науково-технічної конференції (м. Харків, 25–27 квітня 2017 р.). *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*: додаток. 2017. № 169. С. 14–16.

58. Приходько С. І., Жученко О. С., Штомпель М. А. Біоінспірований метод оптимізації кодів Лаби. *Проблеми інформатизації*: тези доповідей восьмої Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 11–12 квітня 2017 р.). Київ, 2017. С. 198.

59. Жученко А. С., Панченко С. В., Приходько С. І., Штомпель Н. А. Биоинспирированные методы декодирования помехоустойчивых кодов. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: матеріали стендових доповідей та виступів учасників 30-ої Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 26–27 жовтня 2017 р.). *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: додаток. 2017. Вип. 4. С. 3–4.

60. Штомпель М. А. Біоінспіровані методи оптимізації новітніх завадостійких кодів. *Проблеми інформатизації*: тези доповідей дев'ятої Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, м. Полтава, м. Катовице, м. Париж, м. Вільнюс, м. Харків, м. Мінськ, 12–13 грудня 2017 р.). Київ, 2017. С. 44.

АНОТАЦІЯ

Штомпель М.А. Методи декодування та оптимізації завадостійких кодових конструкцій для телекомунікаційних систем. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. – Український державний університет залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України, Харків, 2018.

Дисертаційне дослідження присвячене підвищенню достовірності передачі

інформації та збільшенню енергетичної ефективності від кодування у телекомунікаційних системах та мережах шляхом розробки удосконалених методів декодування завадостійких кодових конструкцій з прийнятною обчислювальною складністю, а також оптимізації параметрів окремих класів завадостійких кодових конструкцій для різних моделей каналів зв'язку.

У роботі проведено аналіз стану проблеми підвищення достовірності передачі інформації у телекомунікаційних системах та мережах. Удосконалено методи декодування двійкових лінійних блокових кодів для моделі каналу зв'язку з адитивним білим гауссовим шумом. Забезпечено подальший розвиток методу оптимізації відносно коротких нерегулярних кодів з малою щільністю перевірок на парність. Удосконалено метод ітеративного декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність. Розроблено комбінований метод декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність. Забезпечено подальший розвиток методу оптимізації коефіцієнтів нормалізації при декодуванні мінімальної суми кодів з малою щільністю перевірок на парність. Запропоновано метод декодування алгебраїчних згорткових кодів для каналів зв'язку з випадковими помилками. Розроблено адаптивний метод декодування алгебраїчних згорткових кодів перемежування для каналів зв'язку з пам'яттю. Забезпечено подальший розвиток методу оптимізації кодів Лабі для телекомунікаційних мереж з комутацією пакетів. Розроблено алгоритми та псевдокоди для програмної реалізації даних методів декодування та оптимізації завадостійких кодів різних класів. Досліджено ефективність запропонованих методів декодування та оптимізації завадостійких кодових конструкцій для певних моделей каналу зв'язку та умов передачі інформації шляхом порівняння з існуючими методами.

Ключові слова: завадостійкі коди, кодові конструкції, кодування, декодування, оптимізація, телекомунікаційні системи, телекомунікаційні мережі, біоінспіровані процедури, нелінійне програмування, цільова функція, канал зв'язку.

ABSTRACT

Shtompel M.A. Methods of decoding and optimization of error-correcting code constructions for telecommunication systems. – On the rights of the manuscript.

A thesis submitted in fulfilment of the doctor of technical sciences degree on specialty 05.12.02 – telecommunication systems and networks. – Ukrainian State University of Railway Transport of Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2018.

The dissertation research is dedicated to increasing the reliability of information transmission and rising the energetic efficiency from encoding in telecommunication systems and networks by developing advanced methods of decoding error-correcting code structures with acceptable computational complexity and optimization the parameters of certain classes of error-correcting code constructions for various communication channel models.

The thesis analyzes the state of the problem of increasing the reliability of

information transmission in telecommunication systems and networks. The trends in the development of methods for error-correcting encoding of information are analyzed. The classification of error-correcting code structures and approaches to their decoding are presented. The ways of development of methods of soft decoding and optimization of error-correcting code structures are determined. The formal representation of basic error-correcting codes and basic mathematical models of communication channels is given and their characteristics are investigated. The generalized representation of the problem of decoding (optimization) of error-correcting code structures in the form of an optimization problem is proposed. The expediency of applying the bio-inspired approach to the solution of this problem is justified. The classification of bio-inspired methods (procedures) of optimization is showed, the generalized scheme of these procedures is presented and the features of realization of each stage are analyzed.

The principles of construction and characteristics of linear block codes are presented, as well as an analysis of their decoding methods. The problems of soft decoding of linear block codes with different coding rates in the form of corresponding optimization problems are formulated. The methods for decoding binary linear block codes for the communication channel model with additive white Gaussian noise are improved. The proposed methods for decoding these codes are based on the bio-inspired approach and finding the most reliable (least) basis of the generator (parity-check) matrix of code.

The principles of construction and features of low density parity-check codes are considered. The optimization problem of searching for "good" irregular low density parity-check codes with given parameters for a certain communication channel model is formulated. The further development of the optimization method for relatively short irregular low density parity-check codes has been ensured. The approaches aimed at reducing the computational complexity of the methods for encoding and decoding low density parity-check codes are presented. The method of iterative decoding of low density parity-check codes has been improved, which takes into account the features of the corresponding optimization problem. To improve the decoding efficiency of relatively long low density parity-check codes, the combined decoding method was developed based on belief propagation procedures and generalized bio-inspired procedures using the reliability information of the received symbols. The further development of the method of optimization the normalization coefficients for minimum sum decoding by joint using the bio-inspired procedures of reduced complexity and the density evolution procedure for calculating the noise threshold for a given communication channel model is provided.

The principles of construction of algebraic convolutional code constructions for various communication channels are given. The features of implementation and limitations of existing methods of hard decoding of these code structures are analyzed. The method for decoding algebraic convolutional codes for communication channels with random errors is proposed which based on finding the most reliable basis of the generator matrix, applying generalized bio-inspired procedures and using the random bias mechanism. The adaptive method of decoding algebraic interleaving convolutional codes for

communication channels with memory is developed which based on the iterative procedure of adaptive belief propagation with a generalized bio-inspired search taking into account the reliability information of the received symbols.

The area of application of rateless codes in packet-switched telecommunication networks is presented. The features of the encoding and decoding methods for Luby codes are analyzed. The features and constraints of the existing distributions of the degrees of code vertices of Tanner graphs corresponding to these codes are investigated. The optimization problems of searching for a "good" code vertices degree distribution of the Luby codes for a certain number of information symbols according to given criteria are formulated. The further development of the method of optimization of relatively long Luby codes for packet-switched telecommunication networks through the using of a generalized bio-inspired search and preliminary selection of a limited number of non-zero elements for the required distribution of the code vertices degrees of the Tanner graph.

The algorithms and pseudocodes for software implementation of the proposed methods of decoding and optimization error-correcting codes of different classes are developed. The efficiency of the developed methods of decoding and optimization error-correcting code structures for certain communication channel models and information transmission conditions by comparing them with existing methods is investigated.

Keywords: error-correcting codes, code constructions, encoding, decoding, optimization, telecommunication systems, telecommunication networks, bio-inspired procedures, nonlinear programming, objective function, communication channel.

АННОТАЦИЯ

Штомпель Н.А. Методы декодирования и оптимизации помехоустойчивых кодовых конструкций для телекоммуникационных систем. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. – Украинский государственный университет железнодорожного транспорта Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2018.

Диссертационное исследование посвящено повышению достоверности передачи информации и увеличению энергетической эффективности от кодирования в телекоммуникационных системах и сетях путем разработки усовершенствованных методов декодирования помехоустойчивых кодовых конструкций с приемлемой вычислительной сложностью, а также оптимизации параметров отдельных классов помехоустойчивых кодовых конструкций для различных моделей каналов связи.

В работе проведен анализ состояния проблемы повышения достоверности передачи информации в телекоммуникационных системах и сетях. Усовершенствованы методы декодирования двоичных линейных блочных кодов для модели канала связи с аддитивным белым гауссовым шумом. Обеспечено дальнейшее развитие метода оптимизации относительно коротких нерегулярных

кодов с малой плотностью проверок на четность. Усовершенствован метод итеративного декодирования кодов с малой плотностью проверок на четность. Разработан комбинированный метод декодирования кодов с малой плотностью проверок на четность. Обеспечено дальнейшее развитие метода оптимизации коэффициентов нормализации при декодировании минимальной суммы кодов с малой плотностью проверок на четность. Предложен метод декодирования алгебраических сверточных кодов для каналов связи со случайными ошибками. Разработан адаптивный метод декодирования алгебраических сверточных кодов перемежения для каналов связи с памятью. Обеспечено дальнейшее развитие метода оптимизации кодов Лаби для телекоммуникационных сетей с коммутацией пакетов. Разработаны алгоритмы и псевдокоды для программной реализации данных методов декодирования и оптимизации помехоустойчивых кодов разных классов. Исследована эффективность предложенных методов декодирования и оптимизации помехоустойчивых кодовых конструкций для определенных моделей канала связи и условий передачи информации путем сравнения с существующими методами.

Ключевые слова: помехоустойчивые коды, кодовые конструкции, кодирование, декодирование, оптимизация, телекоммуникационные системы, телекоммуникационные сети, биоинспирированные процедуры, нелинейное программирование, целевая функция, канал связи.

Підписано до друку 13.09.2018 р.
Формат 60х90 1/16. Папір офсетний.
Друк цифровий. Умовн. друк. арк. 1,9.
Тираж 100 примірників. Зам. 2484

*Надруковано у типографії PrintHouse
ФОП Пісня О. В.
вул. Гіримана, 16А, 61100, Харків
Реєстраційне свідоцтво №248750 від 1.01.2012 р.*