

УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Приходько Сергій Іванович

УДК 621.391

**МЕТОДИ СИНТЕЗУ, КОДУВАННЯ ТА ДЕКОДУВАННЯ
ЗГОРТКОВИХ КОДОВИХ КОНСТРУКЦІЙ**

05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат дисертації на здобуття наукового
ступеня доктора технічних наук

Харків – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Українській державній академії залізничного транспорту Міністерства транспорту і зв'язку України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Сорока Леонід Степанович, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, декан факультету комп'ютерних наук.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Захарченко Миколай Васильович, Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, проректор з навчальної роботи;

доктор технічних наук, професор
Лосєв Юрій Іванович, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, професор кафедри теоретичної та прикладної системотехніки;

доктор технічних наук, доцент
Климаш Михайло Миколайович, Національний університет «Львівська політехніка», професор кафедри телекомунікацій.

Захист відбудеться 26.04. 2010 року о 14-30 годин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.01 Українській державній академії залізничного транспорту, 61050, м. Харків, вул. Фейєрбаха 7.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Української державної академії залізничного транспорту, 61050, м. Харків, вул. Фейєрбаха 7.

Автореферат розісланий 22.03. 2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради _____ Г.В. Альошин

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В умовах ринкових відносин одним з важливих завдань є підвищення ефективності функціонування галузей економіки за рахунок необхідної координації роботи всіх управлінських підрозділів. Рішення цього завдання здійснюється шляхом застосування автоматизованих систем керування різного рівня й призначення.

Структурними елементами сучасних автоматизованих систем керування є підсистеми передачі інформації, що здійснюють обмін інформацією між джерелами й споживачами інформації з каналів зв'язку. Одним з основних вимог до підсистеми передачі є забезпечення заданої достовірності переданої інформації, що безпосередньо впливає на ефективність процесу управління.

У зв'язку з ростом вимог до ефективності процесів управління, постійним збільшенням обсягу й швидкості передачі інформації істотно зростають вимоги й до достовірності переданої інформації.

Відповідно до Концепції розвитку зв'язку України сучасний рівень розробки й виробництва технічних засобів зв'язку неможливо забезпечити без проведення випереджальних досліджень. При цьому одними з основних напрямків випереджальних досліджень є розвиток математичного супроводження, аналізу й синтезу нових, структурно складних систем і мереж зв'язку; розробка нових технологій і принципів побудови систем зв'язку, насамперед у сфері обробки й передачі інформації, а також їхніх складових частин. Таким чином, дослідження, спрямовані на розробку засобів підвищення достовірності переданої інформації є актуальними (перспективними).

Основними й найбільш ефективними засобами підвищення достовірності переданої інформації є методи завадостійкого кодування. У теорії завадостійкого кодування можна виділити кілька основних напрямків розвитку.

Перший напрямок базується на блокових кодах й, переважно, алгебраїчних методах подання процесів синтезу, кодування й декодування. Найбільше поширення серед блокових кодів одержав великий клас кодів - циклічні коди. Поряд з високими конструктивними властивостями циклічних кодів цей напрямок дозволяє будувати прості й обчислювально ефективні алгоритми кодування й декодування.

Другий напрямок розвитку базується на безперервних кодах, підкласом яких є згорткові коди. Відмінною рисою згорткових кодів є можливість їхнього простого опису деревом або регулярною гратчастою діаграмою, що дозволяє реалізувати імовірнісне декодування (алгоритми послідовного декодування, алгоритм Вітербі, алгоритм максимуму апостеріорної ймовірності). Кодер згорткового коду являє собою лінійний регістр зсуву, складність якого із-за регулярної гратчастої діаграми не залежить від довжини коду (але залежить від числа станів гратчастої діаграми), що є значною перевагою.

Відповідно до теореми Шенона, найбільшу ефективність мають довгі коди. Циклічні коди при великій довжині кодового слова не дозволяють істотно підвищити енергетичну ефективність, що пояснюється, насамперед, їх незадовільними асимптотичними властивостями. Тому із цього погляду згорткові коди є більш кращими, тому що при їхньому використанні ефективність кодування не погіршується з зростанням довжини кодового слова. Однак конструктивні кодові характеристики згорткових кодів (кодова відстань) залежать від числа станів гратчастої діаграми (яка експоненціально залежить від кількості елементів пам'яті кодера згорткового коду - лінійного регістра зсуву), що призводить до збільшення складності декодування згорткових кодів з високими кодowymi характеристиками, через необхідність аналізу всіх станів кодової решітки у процесі декодування. Крім того, у цей час відсутні обчислювально ефективні методи синтезу згорткових кодів із заданими конструктивними кодowymi характеристиками (як правило, для пошуку згорткових кодів використовуються переборні методи).

Як третій напрямок можна виділити методи каскадного кодування, поява яких пов'язана зі спробами синтезу довгих кодів з високими кодowymi характеристиками на основі досить простих складових кодів (які можуть бути як блоковими, так і згортковими), декодування яких здійснює-

ться окремими декодерами. Перевага каскадних кодів полягає в спрощенні алгоритмів декодування з одночасним підвищенням загальної ефективності кодування. Каскадні коди дозволяють забезпечити високу достовірність в умовах великого рівня шуму при помірній складності декодування. Подальше вдосконалювання методів каскадного кодування призвело до розробки турбокодів - паралельних каскадних рекурсивних згорткових кодів.

Реалізація турбокодування інформації блоками великої довжини не являє собою значних труднощів через використання складових згорткових кодів, оскільки складність згорткового кодування не залежить від довжини інформаційної послідовності, що кодується. У результаті, турбокоди можуть забезпечити ефективність кодування, близьку до теоретично граничного значення, визначеного теоремою Шенона. Недоліком існуючих турбокодів є зменшення ефективності кодування при високому енергетичному відношенні сигнал/шум, що пов'язане з малою мінімальною відстанню складових турбокодів згорткових кодів.

Видимим шляхом усунення недоліків турбокодів є використання в якості складових турбокодів кодів рекурсивних згорткових кодів з високими конструктивними характеристиками, що призведе до підвищення мінімальної відстані турбокоду й дозволить вибирати швидкість турбокодування без обмежень. Однак перешкодою на шляху застосування складових турбокодів згорткових кодів із указаними властивостями є висока складність декодування згорткових кодів з високими конструктивними характеристиками. Крім того, як показано в відомих роботах методи синтезу згорткових кодів не дозволяють ефективно будувати рекурсивні згорткові коди з високими конструктивними властивостями (великою кодовою відстанню), що стримує розробку й впровадження перспективних систем турбокодування.

З вищесказаного можна зробити висновок, що розвинена в цей час алгебраїчна теорія блокового кодування не може бути безпосередньо застосована до згорткових кодів через значну різницю в їхніх властивостях у порівнянні із блоковими кодами. Незважаючи на це відомо, що існує можливість представлення згорткового коду у вигляді блокового коду напівнескінченної довжини і його наступним алгебраїчним описом. Цей напрямок теорії завадостійкого кодування одержав розвиток у роботах автора при написанні кандидатської дисертації. Однак позитивні результати в розглянутих роботах отримані тільки для обмеженого діапазону низьких швидкостей кодування, значення яких не задовольняють сучасним вимогам до параметрів завадостійких кодів (як правило, на практиці потрібні більш високі швидкості кодування). Крім того, у цих роботах не розглядається можливість застосування алгебраїчної теорії для реалізації декодування згорткових кодів.

Таким чином, виникає наукова проблема (суперечлива ситуація), у якій існуючі положення теорії завадостійкого кодування не дозволяють обчислювально реалізуємо вирішувати завдання синтезу, кодування й декодування згорткових кодів з високими конструктивними кодовими характеристиками й з довільними параметрами. Вирішення наукової проблеми (суперечливої ситуації) можливо шляхом розробки на основі єдиного концептуального підходу методів синтезу, кодування й декодування алгебраїчно заданих згорткових кодових конструкцій з необхідними властивостями й характеристиками.

Актуальність теми дисертаційних досліджень визначається необхідністю забезпечення заданої достовірності переданої інформації шляхом застосування процедур синтезу, кодування й декодування алгебраїчно заданих згорткових кодів (кодових конструкцій) з високими конструктивними кодовими характеристиками, що можуть бути обчислювально реалізовані.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження в дисертаційній роботі проводилися у відповідності з наступними нормативними актами.

1. Концепція Національної програми інформатизації, схвалена Законом України «Про Концепцію Національної програми інформатизації» від 4 лютого 1998 р. N 75/98-ВР.

2. Концепція розвитку зв'язку України до 2010 року, затверджена постановою Кабінету Міністрів України «Про Концепцію розвитку зв'язку України до 2010 року» від 9 грудня 1999 р. №2238.

3. Державна науково-технічна програма «Створення перспективних телекомунікаційних систем і технологій».

4. Концепція створення Державної інтегрованої інформаційної системи забезпечення управління рухомими об'єктами (зв'язок, навігація, спостереження), схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 17 липня 2003 р. N 410-р.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка концептуального підходу на основі нових методів синтезу, кодування й декодування згорткових кодових конструкцій з використанням математичного апарату алгебраїчної теорії завадостійкого кодування для підвищення достовірності переданої інформації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні наукові завдання.

1. Розробити й дослідити методи синтезу алгебраїчно заданих згорткових кодових конструкцій для підвищення достовірності переданої інформації:

– розробити (з використанням математичного апарата алгебраїчної теорії завадостійкого кодування) методи синтезу алгебраїчно заданих згорткових кодів, теоретично обґрунтувати аналітичні вирази по оцінці кодових співвідношень синтезованих кодів;

– розробити методи й алгоритми кодування алгебраїчно заданими згортковими кодами, дослідити конструктивні властивості синтезованих згорткових кодових конструкцій.

2. Розробити й дослідити обчислювально ефективні (такі, що можуть бути обчислювально реалізовані) методи й алгоритми декодування алгебраїчно заданих згорткових кодів:

– розробити алгебраїчний метод декодування синтезованих згорткових кодів;

– розробити комбінований метод декодування алгебраїчно заданих згорткових кодів, що поєднує в собі процедури переборного пошуку по кодовій решітці й алгебраїчні процедури локалізації й виправлення помилок;

– розробити алгоритми декодування алгебраїчно заданих згорткових кодів і пропозиції по програмній й апаратній реалізації.

3. Розробити паралельні каскадні згорткові кодові конструкції на основі алгебраїчно заданих рекурсивних згорткових кодів і алгоритмів їхнього декодування, що можуть бути обчислювально реалізовані:

– аналітично формалізувати й розробити методи синтезу турбокодів з використанням алгебраїчно заданих згорткових кодів;

– розробити й дослідити алгоритми ітеративного декодування паралельних каскадних кодових конструкцій з алгебраїчно заданими згортковими кодами;

– розробити й дослідити алгоритми м'якого декодування складових турбокодів алгебраїчно заданих згорткових кодів.

4. Розробити практичні рекомендації з використання алгебраїчних згорткових кодів у телекомунікаційних системах і мережах:

– розробити (з використанням методів математичної статистики й перевірки гіпотез) імітаційну модель системи передачі інформації, методику оцінки й дослідити достовірність переданої інформації в телекомунікаційних системах і мережах з використанням алгебраїчно заданих згорткових кодів і турбокодів на їхній основі;

– обґрунтувати практичні рекомендації з використання алгебраїчних згорткових кодів у телекомунікаційних системах і мережах.

Об'єкт дослідження. Процес підвищення достовірності переданої інформації на основі застосування алгебраїчно заданих згорткових кодових конструкцій.

Предмет дослідження. Методи й алгоритми синтезу, кодування й декодування алгебраїчно заданих згорткових кодових конструкцій.

Методи дослідження. Розробка й дослідження алгебраїчних методів і процедур синтезу, кодування й декодування згорткових кодових конструкцій проведені з використанням методів алге-

браїчної теорії завадостійкого кодування, теорії полів Галуа й теорії чисел. Оцінка достовірності переданої інформації проведена з використанням методів статистичної теорії зв'язку, теорії імовірності й математичної статистики. Розробка рекомендацій з реалізації кодерів алгебраїчно заданих згорткових кодів проведена з використанням методів теорії цифрових автоматів.

Наукова новизна отриманих результатів. Новим науковим результатом дисертації є розвиток теорії завадостійкого кодування в частині синтезу, кодування й декодування алгебраїчно заданих згорткових кодових конструкцій (з довільними кодовими характеристиками й властивостями). У рамках головного нового наукового результату отриманий ряд часткових наукових результатів.

1. Одержав подальший розвиток єдиний концептуальний підхід алгебраїчного представлення згорткових кодів у вигляді недвійкових блокових циклічних кодів (напівнескінченної довжини), що відрізняється від відомого (теоретичним узагальненням на випадок напівнескінченної довжини кодового слова циклічного коду й) використанням породжувальних багаточленів недвійкових циклічних кодів, обмежених на довільне підполе, що дозволяє розглядати з єдиних теоретичних позицій процеси синтезу, кодування й декодування згорткових кодів з довільними властивостями й кодовими характеристиками й теоретично обґрунтувати аналітичні вирази по оцінці кодових співвідношень синтезованих згорткових кодових конструкцій, аналітично зв'язати їхні параметри й виразити через кодові характеристики відповідних циклічних кодів.

2. Одержали подальший розвиток обчислювально ефективні (такі, що можуть бути обчислювально реалізовані) алгебраїчні методи синтезу (алгебраїчно заданих) згорткових кодів, що відрізняються від відомих використанням обмеження недвійкового циклічного коду на довільне підполе, що дозволяє синтезувати (алгебраїчно задані) згорткові коди з довільними властивостями й кодовими характеристиками.

3. Одержали подальший розвиток методи кодування алгебраїчно заданими згортковими кодами, що відрізняються від відомих теоретично обґрунтованими процедурами алгебраїчної побудови рекурсивних і нерекурсивних згорткових кодів через узагальнення циклічних кодів на випадок нескінченної довжини, що дозволяє аналітично формалізувати процес завадостійкого кодування синтезованими згортковими кодами з високими (конструктивними) кодовими характеристиками.

4. Уперше розроблені алгебраїчний і комбінований методи декодування алгебраїчно заданих згорткових кодів, які відрізняються від відомих методів процедурами алгебраїчної локалізації й прискорених процедур (алгоритмами) послідовного пошуку, що дозволяє реалізувати обчислювально ефективне (таке, що може бути обчислювально реалізоване) декодування безперервних кодових конструкцій з великою довжиною кодового обмеження (з більшою кодовою відстанню) для підвищення достовірності переданої інформації.

5. Одержали подальший розвиток методи синтезу паралельних каскадних згорткових конструкцій (методи турбокодування), що відрізняються від відомих використанням алгебраїчно заданих рекурсивних згорткових кодів, що дозволяє аналітично зв'язати параметри турбокодів з параметрами алгебраїчно заданих рекурсивних згорткових кодів і синтезувати паралельні каскадні згорткові конструкції із заданими (конструктивними кодовими) характеристиками.

6. Одержав подальший розвиток метод ітеративного декодування турбокодів з алгебраїчно заданими рекурсивними згортковими кодами, що відрізняється від відомого узагальненим представленням нескінченного кодового слова згорткового коду через нескінченну суму послідовних наборів з кодових слів циклічного коду, що дозволяє за рахунок зведення декодування згорткового коду до декодування послідовності кодових слів циклічного коду декодувати турбокоди на основі алгебраїчно заданих згорткових кодів з великою кількістю елементів пам'яті (з високими кодовими характеристиками, високою кодовою відстанню).

Практичне значення отриманих результатів досліджень полягає в наступному.

1. Розроблені алгоритми синтезу, кодування й декодування алгебраїчно заданих згорткових кодових конструкцій з необхідними (кодовими) характеристиками, такі що можуть бути обчислювально реалізовані.

2. Розроблено методику (емпіричної) оцінки достовірності переданої інформації, що дозволяє для (заданих параметрів математичної моделі) дискретно-безперервного каналу із заданою погіршеністю оцінити ймовірність помилкового прийому біта інформації й відповідний енергетичний виграш від кодування.

3. Розроблено імітаційну модель системи передачі інформації з використанням алгебраїчно заданих згорткових кодових конструкцій, за допомогою якої встановлено, що

– синтезовані згорткові кодові конструкції, отримані за допомогою розроблених алгоритмів, що можуть бути обчислювально реалізовані, не поступаються по енергетичних характеристиках відомим у цей час кодам; їхнє практичне використання дозволяє забезпечити підвищення достовірності переданої інформації в каналах з випадково виникаючими помилками за рахунок відсутності обмежень при виборі необхідних параметрів синтезованих згорткових кодових конструкцій;

– розроблені обчислювально реалізуємі алгоритми декодування згорткових кодових конструкцій з високими конструктивними кодовими характеристиками мають параметри близькі до теоретично граничних значень.

4. Розроблено практичні рекомендації з використання турбокодів із синтезованими алгебраїчно заданими згортковими кодами. Для забезпечення ймовірності помилки на біт $10^{-5} \div 10^{-6}$ при значенні енергетичного відношення сигнал/шум 1,5 – 2 дБ, пропонується використовувати турбокоди з кількістю елементів пам'яті 2 – 4. Для забезпечення ймовірності помилки на біт $10^{-8} \div 10^{-9}$ пропонується використовувати турбокоди з кількістю елементів пам'яті 6 – 8. Швидкість кодування не рекомендується вибирати менш ніж 1/3.

5. Отримані результати використані в науково-дослідних роботах «Мрія», «Алгоритм» (Харківський університет Повітряних Сил, акт реалізації від 12.04.2005), на виробництві при розробці спеціального математичного та програмного забезпечення програмно-апаратного макету заводостійкого кодера (декодера) у ЦККБ «Протон» (акт реалізації від 26.05.2008) і в навчальному процесі Української державної академії залізничного транспорту (акт реалізації від 15.04.2008).

Таким чином, отримані в ході досліджень наукові й практичні результати в сукупності вирішують важливу наукову проблему шляхом розробки на основі нового концептуального підходу методів синтезу, кодування й декодування алгебраїчно заданих згорткових кодових конструкцій з необхідними властивостями й характеристиками, що має велике значення як для розвитку окремого напрямку теорії заводостійкого кодування, так і для рішення прикладних питань, пов'язаних із забезпеченням заданої достовірності переданої інформації в телекомунікаційних системах і мережах.

Особистий внесок здобувача. Всі результати, викладені в дисертаційній роботі, отримані автором самостійно. У роботах, виконаних у співавторстві й опублікованих у виданнях, які ввійшли в перелік ВАК України, автору належать: у роботі [1] запропонований принцип приведення двійкових згорткових кодів до недвійкових звужених циклічних кодів; у роботі [2] пропонується подальший розвиток способу приведення двійкових згорткових кодів до недвійкових звужених циклічних кодів; у роботі [3] розроблений алгоритм приведення двійкових згорткових кодів до недвійкових звужених циклічних кодів; у роботі [4] розроблений метод приведення згорткових кодів до кодів Рида-Соломона; в [5] запропонований підхід приведення ортогоналізованих згорткових кодів до квазіортогональних; у роботі [6] запропонований підхід для приведення ортогональних згорткових кодів до квазіортогональних згорткових кодів; у роботі [7] запропонований метод приведення ортогональних згорткових кодів до квазіортогональних згорткових кодів; в [8] досліджені можливості представлення згорткових кодів за допомогою циклічних кодів; у роботі [9] розроблений принцип послідовного декодування узагальнено заданих згорткових кодів; у роботі [15] запропоновано використовувати породжувальні багаточлени недвійкових циклічних кодів, обмеже-

них на довільне підполе, для алгебраїчної побудови несистематичних згорткових кодів; у роботі [16] розроблений алгебраїчний метод згорткового кодування; у роботі [17] розроблений алгебраїчний метод побудови систематичних згорткових кодів; у роботі [18] розроблений алгебраїчний метод побудови рекурсивних згорткових кодів; у роботі [19] розроблені методи синтезу паралельних каскадних згорткових конструкцій на основі алгебраїчно заданих рекурсивних згорткових кодів; у роботі [20] розроблений метод декодування алгебраїчно заданих згорткових кодів; у роботі [21] розроблені процедури алгебраїчної локалізації й прискорені процедури послідовного пошуку для комбінованого методу декодування алгебраїчно заданих згорткових кодів; у роботі [24] розроблений метод ітеративного декодування турбокодів на основі алгебраїчно заданих рекурсивних згорткових кодів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися й були схвалені на наступних науково-технічних конференціях:

- Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні методи кодування в електронних системах» (Суми, 2002);
- Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні методи кодування в електронних системах» (Суми, 2004);
- Перша науково-технічна конференція Харківського університету Повітряних Сил (Харків, 2005);
- Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні» (Харків, 2007);
- Міжнародна науково-технічна конференція «Стратегії ІТ-технологій в освіті, економіці й екології» (Харків, 2007);
- Сьома міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми інформатики й моделювання» (Харків, 2007);
- Четверта наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил (Харків, 2008);
- Перша Всеукраїнська науково-практична конференція (Львів, 2008);
- 22 міжнародна науково-практична конференція «Перспективні комп'ютерні, керуючі й телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України» (Алушта, 2009).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи викладені в 24 наукових статтях, 3 патентах, 9 тезах доповідей, 2 звітах з НДР.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновку та додатків. Повний обсяг дисертації складає 319 сторінки, у тому числі 2 додатка на 34 сторінках, 77 рисунків, 13 таблиць, перелік використаних літературних джерел складається з 138 найменувань на 14 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність теми, формулюються мета і завдання дослідження, вказується наукова новизна, практичне значення та впровадження отриманих результатів.

У **першому розділі** проведений аналіз загальних положень теорії завадостійкого кодування, представлена модель системи передачі інформації через сукупність формальних операторів, що аналітично описує процедури перетворення інформації, проведені аналіз і порівняльні дослідження відомих методів завадостійкого кодування. Узагальнені й теоретично обґрунтовані шляхи підвищення достовірності переданої інформації на основі використання завадостійких кодів. На основі отриманих результатів обґрунтовується вибір напрямку досліджень, вводяться критерії й показники ефективності, математично формалізується постановка наукової проблеми.

Однієї з найважливіших характеристик системи передачі інформації є достовірність переданої інформації. Основним показником достовірності є ймовірність правильного прийому біта

$P_{п.п.}$. Частіше використовують зворотний показник - імовірність помилкового прийому біта $P_{пом} = 1 - P_{п.п.}$. Очевидно, що показники достовірності залежать тільки від відношення енергії,

що приходиться на один біт до спектральної щільності потужності шуму E_b/N_0 й застосовуваних методів модуляції й кодування.

З достовірністю переданої інформації тісно зв'язана інша характеристика системи передачі інформації – завадостійкість. Кількісною мірою завадостійкості є мінімально необхідне для забезпечення необхідної достовірності співвідношення енергії сигналу до спектральної щільності потужності шуму. Тобто цей показник дозволяє при фіксованому рівні достовірності ($P_{пом}$) оцінити (порівняти між собою) енергетичну ефективність різних систем передачі інформації.

Побудова ефективної системи передачі інформації зв'язана з оптимізацією цілого спектра взаємозалежних і суперечливих вимог: максимізація швидкості передачі інформації й мінімізація ймовірності появи бітової помилки; мінімізація споживаної потужності й/або відношення енергії сигналу до спектральної щільності потужності шуму й мінімізація ширини смуги пропускання; зниження складності практичної реалізації й максимізація числа абонентів мережі зв'язку.

Уведемо два додаткових показники, що характеризують питому складність реалізації застосовуваних процедур кодування й модуляції:

- мінімальне число операцій, які необхідно виконати для реалізації цифрової обробки інформаційних повідомлень, що приходяться на один переданий біт даних S_B , операцій/біт (асимптотична часова складність реалізації);

- мінімальне число елементів пам'яті, необхідне для реалізації цифрової обробки інформаційних повідомлень, що приходяться на один переданий біт даних S_E , елементів/біт (асимптотична ємнісна складність реалізації).

Побудова ефективних завадостійких високошвидкісних систем передачі інформації на рівні сигнально-кодових конструкцій математично формалізуємо у вигляді цільової функції:

(1)

Аналіз виразу (1) показує, що побудова оптимальних сигнально-кодових конструкцій зв'язана з рішенням багатокрітеріального оптимізаційного завдання з обліком розглянутих вище природних теоретичних обмежень на граничну швидкість передачі інформації й мінімально необхідну смугу пропускання. Рішення зазначеного завдання існуючими методами неможливо у зв'язку з її надзвичайно високої складністю.

Розглянемо постановку сформульованого вище завдання в умовах прийнятих у рамках проведення дослідження допущень й обмежень. Припустимо, що для передачі інформації використовуються канали зв'язку з фіксованою смугою пропускання $\Delta F = const$, а швидкість передачі V визначається із граничного теоретичного співвідношення про мінімальну смугу пропускання $V = 2 \cdot \Delta F \cdot \log_2 M$ біт/с, де M - потужність алфавіту сигналів, обумовлена системою модуляції й кодування.

Зафіксуємо величину $P_{пом}$, як величину, задану відповідними нормативними документами, що встановлює вимоги до якості цифрового зв'язку. Мінімально необхідне співвідношення енергії біта до спектральної щільності потужності шуму E_b/N_0 , необхідне для забезпечення заданої ймовірності $P_{пом}$, задає величину завадостійкості системи передачі інформації. Таким чином, завдання побудови ефективних завадостійких високошвидкісних систем передачі з урахуванням прийнятих у рамках проведення досліджень допущень й обмежень запишемо у вигляді:

(2)

тобто для фіксованої смуги частот $\Delta F = \text{const}$ і теоретично граничної швидкості передачі $V = 2 \cdot \Delta F \cdot \log_2 M$ потрібно мінімізувати співвідношення енергії біта до спектральної щільності потужності шуму E_b/N_0 , яке необхідно для забезпечення заданого рівня достовірності $P_{\text{пом}} \leq P_{\text{необх.}}$, де $P_{\text{необх.}}$ - необхідне (максимально припустиме) значення показника достовірності. Крім того, відповідно до постановки завдання виду (2), потрібно мінімізувати питому складність реалізації цифрової обробки інформаційних повідомлень із використанням застосовуваних сигнально-кодових конструкцій.

Завдання побудови ефективної завадостійкої високошвидкісної системи передачі інформації на рівні сигнально-кодових конструкцій будемо вирішувати за допомогою мінімізації E_b/N_0 з урахуванням прийнятих допущень й обмежень $\{\Delta F = \text{const}; V = 2 \cdot \Delta F \cdot \log_2 M; P_{\text{пом}} \leq P_{\text{необх.}}\}$ і вибору з безлічі отриманих рішень оптимального за критерієм мінімізації питомої складності реалізації цифрової обробки повідомлень $(\min(S_B); \min(S_E))$ рішення.

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

В другому розділі на основі єдиного концептуального підходу з використанням методів алгебраїчної теорії блокових кодів, теорії кінцевих полів і поліноміальних методів опису завадостійких кодів розробляються алгебраїчні методи синтезу нерекурсивних згорткових кодів, досліджуються процедури побудови нерекурсивних згорткових кодів, розробляються алгоритми для їхньої реалізації.

В основі існуючого алгебраїчного методу побудови згорткових кодів зі швидкістю $R = 1/m$ лежить обмеження недвійкового циклічного коду над $GF(q^m)$ на підполі $GF(q)$. Для зняття обмеження по швидкості кодування розроблений алгебраїчний метод побудови згорткових кодів, в основі якого лежить обмеження недвійкового циклічного коду над $GF(q^m)$ на довільну підмножину $H \subseteq GF(q^m)$, $|H| \geq |GF(q)|$. Якщо $|H| = |GF(q)|$, то одержимо, як окремий випадок, існуючий метод алгебраїчної побудови згорткових кодів зі швидкістю $R = 1/m$.

Розглянемо несистематичний згортковий (n, k) – код над $GF(q)$ зі швидкістю $R = k^0/m$ (див. рис. 1). Розіб'ємо вхідну інформаційну послідовність на інформаційні кадри по $k^0 \geq 1$ символів, кожен символ яких належить $GF(q)$.

Рис. 1. Схема несистематичного згорткового кодера з $R = k^0/m$

У загальному випадку інформаційна послідовність може бути нескінченної довжини, тобто складатися з нескінченного числа інформаційних кадрів по k^0 символів. Зіставимо кожному інформаційному кадру з k^0 символів один символ з безлічі $H \subseteq GF(q^m)$, $|H| \geq |GF(q)|$. У цьому випадку інформаційний багаточлен можна представити у вигляді

$$I_j \in H, j = 0, \dots, r-1, \log_q |H| = k^0, m \geq k^0, \quad (3)$$

де $I_j \in H, j = 0, \dots, r-1, \log_q |H| = k^0, m \geq k^0$.

Нехай багаточлени $P_1(x), P_2(x), \dots, P_m(x)$ – породжувальні багаточлени представленого на рис. 1 несистематичного згорткового коду. Процес кодування інформації – інформаційна послідовність $I(x)$ виду (3) надходить у кодер (рис. 1), де відбувається її множення на багаточлени $P_1(x)$... $P_m(x)$. Одержимо послідовності $F_1(x) \dots F_m(x)$:

;
;
...
;

де S_{ij} – коефіцієнт багаточлена $F_i(x)$ при x^j у результаті перемножування багаточлена $I(x)$ виду (3) і багаточленів $P_i(x)$.

Кодове слово $C(x)$ формується шляхом послідовного зчитування символів при однакових ступенях багаточленів $F_1(x) \dots F_m(x)$, тобто:

(4)

Якщо на вхід згорткового кодера подати інформаційний вектор виду $\{0, 0, \dots, 1\}$, то інформаційний багаточлен запишеться як $I(x)=1$, а кодове слово (4) запишеться у вигляді породжувального багаточлена циклічного коду, тобто $C(x) = P(x)$. Таким чином породжувальний багаточлен циклічного коду однозначно визначає несистематичне правило згорткового кодування.

Теорема 1. Породжувальний багаточлен ступеня r (N, K, D) циклічного коду над $GF(q^m)$ повністю визначає несистематичний згортковий (n, k, d) код над $GF(q)$ з кодовим обмеженням $v = r \cdot k^0$ і параметрами

Слід зазначити, що оцінка $d_{\infty} \geq D$ у теоремі 1 не точна. Тому пропонується прогнозувати вільну мінімальну відстань d_{Π} несистематичного згорткового (n, k, d) – коду над $GF(q)$, алгебраїчно заданого породжувальним багаточленом (N, K, D) циклічного коду над $GF(q^m)$, як

(5)

Вивід виразу (5) заснований на підрахунку ненульових q -ічних символів у вихідній кодовій послідовності несистематичного згорткового (n, k, d) коду, алгебраїчно заданого за допомогою породжувального багаточлена (N, K, D) циклічного коду над $GF(q^m)$.

Практичне використання результатів доведених у дисертаційній роботі теорем дозволяє зв'язати конструктивні характеристики згорткового (n, k, d) коду над $GF(q)$ з параметрами утворюючого циклічного (N, K, D) коду над $GF(q^m)$ з породжувальним багаточленом ступеня r :

$$k^0 = \log_q |H|; n^0 = m; v = r \cdot k^0; k = (r + 1) \cdot k^0; n = k \cdot n^0 / k^0; d_{\infty} \geq D; \\ R = k^0 / m, m \geq k^0,$$

де $H \subseteq GF(q^m)$.

Алгоритм побудови згорткового (n, k, d) коду над $GF(q)$ визначимо у вигляді послідовності таких кроків.

КРОК 1. Вибір конструктивних параметрів згорткового (n, k, d) коду над $GF(q)$.

КРОК 2. Розрахунок параметрів утворюючого поля $GF(q^m)$. Вибір циклічного коду, розрахунок його конструктивних (N, K, D) параметрів над $GF(q^m)$.

КРОК 3. Вибір породжувального багаточлена циклічного (N, K, D) коду $GF(q^m)$. Розрахунок прогнозованої вільної відстані згорткового коду.

КРОК 4. Визначення породжувальних багаточленів несистематичного згорткового (n, k, d) коду, побудова схеми кодера.

КРОК 5. Уточнення мінімальної кодової відстані й вільної кодової відстані несистематичного згорткового (n, k, d) коду (при необхідності).

Проведені дослідження властивостей синтезованих нерекурсивних згорткових кодів, алгебраїчно заданих породжувальними багаточленами недвійкових циклічних кодів, показали, що отримані коди близькі по своїх характеристиках до оптимальних кодів. Застосування розроблених методів синтезу нерекурсивних згорткових кодів дозволяє за рахунок використання алгебраїчних процедур і поліноміальних методів опису циклічних кодів вирішити важливе наукове завдання пошуку ефективних нерекурсивних згорткових кодів з високими кодовими характеристиками.

У третьому розділі на основі єдиного концептуального підходу одержали подальший розвиток алгебраїчні методи й обчислювально ефективні алгоритми синтезу рекурсивних згорткових кодів, які використовуються в якості складових кодів турбокоду через особливості вагового розподілу кодових слів рекурсивних згорткових кодів.

У дисертаційній роботі доведений зв'язок між параметрами циклічних кодів і рекурсивних згорткових кодів з $R = k^0 / m$.

Теорема 2. Якщо зафіксувати кінцеву безліч H елементів поля $GF(q^m)$, причому $\log_q |H| = k^0$, $m \geq k^0$, то перевірочний багаточлен циклічного (N, K, D) коду над $GF(q^m)$ повністю визначає несистематичний рекурсивний згортковий (n, k, d) код над $GF(q)$ з інформаційним кадром довжини k^0 , довжиною кодового обмеження $v = K \cdot k^0$ і параметрами

Теорема 2 визначає механізм побудови алгебраїчних рекурсивних несистематичних згорткових кодів. Їхні параметри алгебраїчно пов'язані з параметрами недвійкових циклічних кодів, що дозволяє конструктивно будувати рекурсивні згорткові коди з необхідними властивостями. Загальна схема згорткового кодера наведена на рис. 2. Такий кодер реалізує обробку символів з $GF(q^m)$.

Для рішення завдання алгебраїчної побудови рекурсивних систематичних згорткових кодів скористаємося систематичними циклічними кодами. Для реалізації процедури систематичного кодування циклічного коду скористаємося цифровим фільтром з нескінченним імпульсним відкликом (рекурсивним фільтром), що реалізує ланцюг ділення на багаточлен.

Рис. 2. Схема несистематичного кодера алгебраїчного рекурсивного згорткового коду з обробкою елементів з $GF(q)$

Нехай коефіцієнти породжувального багаточлену $g(x) = g_0 + g_1x + g_2x^2 + \dots + g_r x^r$ дорівнюють ваговим множникам у відводах регістра зсуву рекурсивного фільтру. Використаємо таку схему для побудови кодера алгебраїчного систематичного рекурсивного згорткового коду (див. рис. 3).

Рис. 3. Схема систематичного кодера алгебраїчного згорткового коду

Теорема 3. Породжувальний багаточлен $g(x)$ циклічного (N, K, D) коду над $GF(q)$ повністю визначає рекурсивний систематичний згортковий (n, k, d) код над $GF(q)$ з кодовим обмеженням

$$v = (N-K) \cdot K$$

і параметрами

Теорема 4. Якщо зафіксувати $GF(q^m)$ і кінцеву безліч H елементів поля $GF(q^m)$, причому $\log_q |H| = k^0$, $m \geq k^0$, то породжувальний багаточлен $g(x)$ циклічного (N, K, D) коду над $GF(q^m)$ повністю визначає рекурсивний систематичний згортковий (n, k, d) код над $GF(q)$ з кодовим обмеженням

$$v = (N-K) \cdot K \cdot \lfloor \log_q \rfloor$$

і параметрами

Для алгебраїчної побудови рекурсивного згорткового коду з конструктивними (n, k, d) параметрами необхідно й досить задати породжувальний й/або перевірочний багаточлен циклічного (N, K, D) коду. При цьому конструктивні параметри згорткового (n, k, d) коду будуть аналітично пов'язані з параметрами циклічного (N, K, D) коду. Алгоритм побудови рекурсивних згорткових кодів у загальному виді представимо у вигляді послідовності таких кроків.

КРОК 1. Уведення параметрів рекурсивного згорткового (n, k, d) коду й потужності алфавіту кодових символів q .

КРОК 2. Вибір варіанта побудови згорткового коду над $GF(q)$:

- несистематичного рекурсивного згорткового коду;
- систематичного рекурсивного згорткового коду.

КРОК 3. Розрахунок параметрів циклічного (N, K, D) коду над $GF(q^m)$.

КРОК 4. Вибір і формування породжувального й/або перевірочного багаточлена циклічного (N, K, D) коду над $GF(q^m)$.

КРОК 5. Вибір способу обробки кодових символів. Формування породжувальних багаточленів рекурсивного згорткового (n, k, d) коду над $GF(q)$, побудова схеми кодера рекурсивного згорткового (n, k, d) коду над $GF(q)$.

Розроблений алгоритм дозволяє конструктивним способом за кінцеве число кроків побудувати рекурсивний згортковий код з необхідними параметрами.

У четвертому розділі розробляються методи декодування алгебраїчно заданих згорткових кодів, засновані на використанні нескінченної серії синдромів кодових слів циклічного коду. Пропонується спосіб формування нескінченної серії синдромів алгебраїчно заданого згорткового коду. Розробляється підхід комбінованого декодування алгебраїчно заданих згорткових кодів, що складає в сполученні алгебраїчних процедур і процедур послідовного пошуку по кодовій решітці.

Нехай $I(x) = i_0 + i_1x + i_2x^2 + \dots$ - інформаційний багаточлен, можливо нескінченної довжини, з коефіцієнтами з $GF(q)$. Кодова послідовність на виході несистематичного нерекурсивного згорткового кодера буде задаватися виразом:

$$C(x) = I(x) \cdot P(x) = C_0 + C_1x + C_2x^2 + \dots,$$

де C_i - елементи поля $GF(q^m)$, відображувані в набори по m символів з підполя $GF(q)$.

Представимо кодове слово $C(x)$ у поліноміальному виді

(6)

де $\|0, I\|_{N, i:K+N}$ - одинична матриця з доданими ліворуч $i \cdot K$ нульовими стовпцями.

Проаналізуємо отриманий вираз (6). Кожен доданок містить добуток породжувального багаточлена циклічного (N, K, D) коду на інформаційний багаточлен $I_i(x)$ ступеня $\deg I_i(x) \leq K - 1$. Однак, добуток $I_i(x) \cdot P(x)$ - суть кодове слово циклічного (N, K, D) коду, що відповідає інформаційному вектору

$$I_i = (i_{i \cdot K}, i_{i \cdot K + 1}, i_{i \cdot K + 2}, \dots, i_{(i+1) \cdot K - 1}),$$

тобто

(7)

де

$$c_i(x) = c_{i,0} + c_{i,1}x + c_{i,2}x^2 + \dots + c_{i,N-1}x^{N-1} \dots$$

Підставимо (7) в (6), одержимо:

(8)

З виразу (8) випливає, що нескінченне кодове слово нерекурсивного згорткового коду, алгебраїчно заданого через породжувальний багаточлен циклічного коду, складається з нескінченної суми кодових слів циклічного коду, помножених на відповідний оператор затримки $x^{i \cdot K}$. Представимо, для наочності, структуру нескінченного кодового слова алгебраїчного згорткового коду на рис. 4.

Рис. 4. Структура нескінченного кодового слова алгебраїчного нерекурсивного згорткового коду

Як видно з рис. 4 нескінченне кодове слово згорткового коду формується накладенням нескінченного числа кодових слів циклічного коду й підсумовуванням відповідних елементів c_{ij} .

Припустимо тепер, що при передачі нескінченної кодової послідовності вектор $C = (C_0, C_1, \dots)$ спотворився, тобто на приймальній стороні отримане перекручене кодове слово

$$C^*(x) = C(x) + E(x),$$

де $E(x) = e_0 + e_1x + e_2x^2 + \dots$ - нескінченний вектор помилок.

За аналогією з інформаційним вектором розіб'ємо вектор помилок $E = (e_0, e_1, e_2, \dots)$, складений з коефіцієнтів багаточлена помилок $E(x)$, на блоки по K символів з $GF(q)$: $E = (e_0, e_1, e_2, \dots, e_{i-1}) \cup (e_i, e_{i+1}, e_{i+2}, \dots, e_{i+K-1}) \cup \dots$

З урахуванням (8) останній вираз перепишемо у вигляді:

(9)

де $\|e_i, 0\|_N$ - вектор помилок E_i довжиною K символів з доданими праворуч $(N - K)$ нулями.

Проаналізуємо отриманий вираз. Кожен доданок містить суму кодового слова $c_i(x)$ циклічного (N, K, D) коду й багаточлена помилки $E_i(x)$. Розмірність вектора E_i становить K символів, тобто сума $c_i(x) + E_i(x)$ - суть кодове слово циклічного (N, K, D) коду, перевернуто вектором помилки E_i . Отже, запишемо:

(10)

Тоді, з урахуванням (10), вираз (9) перепишемо у вигляді:

(11)

Таким чином, як випливає з виразу (11), нескінченне кодове слово алгебраїчного нерекурсивного згорткового коду, перевернуто нескінченим вектором помилок, складається з нескінченної суми кодів слів циклічного коду, перевернутих вектором помилок кінцевої розмірності, помножених на відповідний оператор затримки $x^{i \cdot K}$.

Представимо, для наочності, структуру перевернутого помилками нескінченного кодового слова алгебраїчного згорткового коду на рис. 5.

Як видно з рис. 5 перевернуто помилками нескінченне кодове слово згорткового коду формується накладенням нескінченного числа перевернутих кодів слів циклічного коду й підсумовуванням відповідних елементів c_{ij}^* .

Рис. 5. Структура перевернутого помилками нескінченного кодового слова алгебраїчного нерекурсивного згорткового коду

Уведемо синдромний багаточлен алгебраїчного згорткового коду:

$$S(x) = s_0 + s_1x + s_2x^2 + \dots,$$

як нескінченну суму синдромних багаточленів циклічного коду, помножених на відповідний оператор затримки $x^{i \cdot K}$, тобто як нескінченну суму залишків від розподілу кодів слів циклічного коду на породжувальний багаточлен $P(x)$:

$$S(x) = \sum_{i=0}^{\infty} x^{i \cdot (N-K)} R_{P(x)}[c_i(x)]$$

і перепишемо його через перевірочний багаточлен

$$S(x) = \sum_{i=0}^{\infty} x^{i \cdot (N-K)} R_{(x^N-1)}[E_i(x) \cdot h(x)]$$

Таким чином, як виходить з отриманого виразу для $S(x)$, нескінченний синдром прийнятого з помилками кодового слова алгебраїчного нерекурсивного згорткового коду складається з нескінченної суми синдромів прийнятих кодів слів циклічного коду, помножених на відповідний оператор затримки $x^{i \cdot (N-K)}$. Отже, запишемо

(12)

де $S_i(x) = s_{iK} + s_{iK+1}x + s_{iK+2}x^2 + \dots + s_{(i+1)K-1}x^{K-1}$ - синдромний багаточлен циклічного (N, K, D) коду, $S_i = (s_{iK}, s_{iK+1}, s_{iK+2}, \dots, s_{(i+1)K-1})$ - відповідний синдромний вектор.

Синдромний багаточлен (вектор) залежить тільки від значення помилок і не залежить від обраного кодового слова. Як видно з рис. 6, нескінченний синдром формується нескінченим підсумовуванням відповідних синдромів циклічного коду $S_i(x)$.

Рис. 6. Структура нескінченного синдромного багаточлена алгебраїчного нерекурсивного згорткового коду

Причому синдроми $S_i(x)$ підсумовуються без накладень, тобто кожен блок з $(N - K)$ синдромних символів залежить винятково від блоку з K помилкових символів. Цей факт дозволяє реалізувати алгебраїчне правило декодування алгебраїчно заданого згорткового коду.

Дійсно, декодування нескінченного кодового слова згорткового коду розпадається на нескінченну послідовність декодувань кодових слів циклічного (N, K, D) коду. Причому кожен синдромний вектор S_i відповідає помилці, що відбулася на блоці з K символів. У випадку неправильного декодування помилка розповсюджується тільки в межах блоку даних з K символів. Отже, незалежність блоків синдромних символів дозволяє уникнути розповсюдження помилок, що властиво деяким відомим способам декодування згорткових кодів. Таким чином, у результаті проведених міркувань удалося звести декодування нескінченного кодового слова до нескінченної серії декодувань циклічного блокового коду.

Для реалізації запропонованого підходу алгебраїчного декодування нескінченних кодових слів алгебраїчного згорткового коду, заданого через породжувальний багаточлен циклічного коду, необхідно й досить обчислити нескінченну суму синдромів відповідних кодових слів циклічного коду, тобто обчислити всі значення $S_i = (S_{i-K}, S_{i-K+1}, S_{i-K+2}, \dots, S_{(i+1)K-1})$ у виразі (12). Для обчислення синдромної послідовності в алгебраїчній теорії блокових кодів використовують множення кодового слова на перевірочну матрицю й/або, що еквівалентно, формують синдромний багаточлен $S_i(x)$ через відповідні операції в кільці багаточленів $GF(q)[x]/(x^n - 1)$. Еквівалентною операцією для безперервних кодів буде добуток кодового слова на напівнескінченну перевірочну матрицю згорткового коду, задану через корінь породжувального багаточлена. Конструктивних способів побудови напівнескінченної перевірочної матриці несистематичного згорткового коду зі збереженням таких алгебраїчних властивостей невідомо. Отже, для реалізації запропонованого вище підходу алгебраїчного декодування згорткових кодів необхідно теоретично обґрунтувати й увести відповідні процедури формування нескінченної серії синдромних послідовностей $S_i = (S_{i-K}, S_{i-K+1}, S_{i-K+2}, \dots, S_{(i+1)K-1})$.

Розглянемо структуру нескінченного кодового слова алгебраїчного згорткового коду на рис. 4. Якщо алгебраїчний згортковий код заданий через породжувальний багаточлен (N, K, D) циклічного коду то нескінченне кодове слово формується підсумовуванням нескінченного числа кодових слів циклічного коду, зрушених на K символів вправо. Отже, i -й блок з N кодових символів нескінченного кодового слова складається із суми i -го кодового слова циклічного коду й відповідних частин $i+j$ -их кодових слів. Схематично структура довільного блоку з N символів нескінченного кодового слова алгебраїчного нерекурсивного згорткового коду представлена на рис. 7.

Рис. 7. Структура довільного блоку з N символів нескінченного кодового слова алгебраїчного нерекурсивного згорткового коду

Формально, запишемо:

$$, \quad (13)$$

де $\|C\|_N$ - блок блоку з N символів нескінченного кодового слова алгебраїчного згорткового коду; $\|c_i\|_N$ - i -е кодове слово циклічного коду; $\|c_{i+j}\|_{N-jK}$ - відповідні підблоки $i+j$ -их кодових слів циклічного коду.

Припустимо, що на розглянутому блоці з N символів відбулося не більше $t = (D - 1)/2$ помилок. Сформуємо із блоку $\|C\|_N$ кодовий багаточлен й обчислимо залишок від ділення його на породжувальний багаточлен циклічного коду. Остання операція еквівалентна множенню на

перевірочний багаточлен C або добутку блоку $\|C\|_N$ на перевірочну матрицю $\|H\|_{N-K,N}$ циклічного коду. Одержимо синдромний вектор S^* :

(14)

де $e_i(x)$ – багаточлен помилок, коефіцієнтами якого є елементи вектора помилок довжини N символів, тобто вектор помилки на i -му кодовому слові циклічного коду; $Z(x)$ – сума багаточленів,

коефіцієнтами яких є елементи векторів $\|C_{i+j}\|_{N-j \cdot K}$ у виразі (13), $j \neq 0$.

Очевидно, що перший доданок у виразі (14) суть залишок від ділення кодового слова циклічного коду на відповідний породжувальний багаточлен. Отже, $R_{g(x)}[C_i(x)] = 0$.

Другий доданок у виразі (14) відповідає залишку від розподілу багаточлена помилок кодового слова циклічного коду на його породжувальний багаточлен. Отже,

$$R_{g(x)}[e_i(x)] = S_i(x) \quad \text{в введених раніше позначеннях.}$$

Третій доданок відповідає залишку від ділення суми багаточленів з виразу (13) на породжувальний багаточлен циклічного коду. Відзначимо, що всі багаточлени, коефіцієнтами яких є

елементи векторів $\|C_{i+j}\|_{N-j \cdot K}$ у виразі (13), $j \neq 0$ мають ступінь $\leq N - K$, а ступінь породжувального багаточлена $\deg g(x) = N - K + 1$. Отже, запишемо $R_{g(x)}[Z(x)] = Z(x)$. Тоді вираз (14) можна переписати в наступному виді

(15)

Очевидно, що при $Z(x) = 0$ виконується рівність $S^*(x) = S_i(x)$. Практично це означає, що

при виконанні рівності нулю суми векторів $\|C_{i+j}\|_{N-j \cdot K}$ у виразі (13), $j \neq 0$ значення синдромів S^* для блоку з N кодових символів збігаються з відповідними синдромами $S_i(x)$ i -их кодових слів циклічного коду. Таким чином, для формування нескінченної серії кінцевих синдромів для алгебраїчного декодування згорткових кодів досить виконання умови $Z(x) = 0$.

Для виконання сформульованої умови розглянемо правило формування багаточлена $Z(x)$. Як показано вище, багаточлен $Z(x)$ формується підсумовуванням багаточленів, коефіцієнтами яких є елементи кодових i -их слів, зсунутих на $j \cdot K$ символів вправо. Припустимо, що нескінченне кодове слово нерекурсивного згорткового коду алгебраїчно заданого через породжувальний багаточлен циклічного коду (див. рис. 4) складається з нескінченної суми кодових слів циклічного коду, помножених оператор затримки $x^{i \cdot N}$. Тоді багаточлен $Z(x)$ буде дорівнювати сумі багаточленів, коефіцієнтами яких є елементи кодових i -их слів, зсунутих на $j \cdot N$ символів вправо. Але по визначенню вектор S^* – це синдромна послідовність, що відповідає блоку з N кодових символів нескінченного кодового слова. Практично це означає, що третій доданок у виразі (14) дорівнює нулю, тобто $Z(x) = 0$, відповідно. Підставивши в (15), одержимо

$$S^*(x) = S_i(x).$$

Останній вираз дозволяє сформувати нескінченну серію кінцевих синдромів нескінченного кодового слова згорткового коду. А це дозволяє реалізувати алгебраїчний алгоритм декодування згорткових кодів.

Таким чином, у результаті проведених досліджень, був розроблений спосіб формування нескінченної серії кінцевих синдромів для алгебраїчного декодування згорткових кодів. При цьому слід зазначити деяке погіршення конструктивних властивостей згорткового коду. Для реалізації запропонованого способу при формуванні кодового слова алгебраїчного згорткового коду оператор затримки $x^{i \cdot K}$ варто замінити на $x^{i \cdot N}$. Практично це означає, що після подачі на вхід кодера K інформаційних символів необхідно подати, додатково, $(N - K)$ нульових символів. У цьому випадку на прийомній стороні виконається умова $Z(x) = 0$ й, відповідно, рівність $S^*(x) = S_i(x)$. У термінах

кодування подача на вхід кодера $(N - K)$ нульових символів відповідає зниженню швидкості кодування в $(N - (N - K))/N = K/N$ раз, тобто зниження швидкості пропорційно швидкості циклічного (N, K, D) коду. Остання обставина знижує завадостійкість алгебраїчних згорткових кодів (з алгебраїчним способом декодування). Однак при відповідному виборі параметрів циклічного (N, K, D) коду це погіршення можна мінімізувати. Дійсно, якщо при побудові згорткового коду використовувати циклічні (N, K, D) коди з $R = K/N \rightarrow 1$, то для реалізації алгебраїчного декодування необхідно внести мізерно малу частку нульових символів й, таким чином, зниження завадостійкості буде мінімальним.

Отримане узагальнене подання нескінченного кодового слова алгебраїчно заданого згорткового коду через нескінченну суму послідовних наборів з M кодових слів (N, K, D) циклічного коду дає потужний механізм комбінованого декодування алгебраїчно заданих згорткових кодів (з використанням запропонованих алгебраїчних процедур і відомих алгоритмів декодування, наприклад, послідовного алгоритму Фано). Застосування запропонованих алгебраїчних процедур декодування дозволяє локалізувати помилки в кодовому слові згорткового коду з точністю до деякого, заздалегідь заданого, періоду. Це дозволяє значно спростити роботу другого алгоритму, наприклад, прискорити послідовний пошук по кодовій решітці.

Алгоритм комбінованого декодування алгебраїчно заданого згорткового коду представимо у вигляді послідовності наступних кроків.

Крок 1. Прийом $(M-1)K + N$ кодових символів з $GF(q^m)$ (або, що еквівалентно, $(M \cdot K + N)m$ кодових символів з $GF(q)$).

Крок 2. Обчислення синдрому.

Крок 3. Рішення систем лінійних рівнянь.

Крок 4. Локалізація помилок з точністю до періоду K символів.

Крок 5. Послідовний пошук по кодовій решітці у вузлах, що відповідають компонентам згрупованої помилки.

Крок 6. Виправлення згрупованої помилки.

Крок 7. Прийом наступних $(M-1)K + N$ кодових символів з $GF(q^m)$ (або, що еквівалентно, $(M \cdot K + N)m$ кодових символів з $GF(q)$). Перехід до кроку 2.

Пошук по кодовій решітці (крок 5) може виконуватися й відразу, після прийому першого кодового символу (як при послідовному декодуванні). Це може бути виправдане при малому числі помилок. Якщо число помилок велике, то складність послідовного декодування швидко зростає й, мабуть, варто очікувати попередньої локалізації помилок (крок 4).

У п'ятому розділі досліджуються методи побудови паралельних каскадних кодових конструкцій і процедури їхнього декодування. Пропонуються схеми турбокодування з використанням рекурсивних згорткових кодів, заданих через породжувальний й/або перевірючий багаточлени недвійкового циклічного коду. Розробляються алгоритми побудови турбокодів з необхідними параметрами.

Теорема 5. Турбокодер, побудований на алгебраїчних несистематичних рекурсивних згорткових кодах, має швидкість кодування:

$$R = \frac{k^0}{2 \cdot m}$$

Якщо $k^0 = 1$, то маємо рекурсивний несистематичний згортковий код з параметрами: $v = K$, $n^0 = m$, $k = K + 1$, $n = (K + 1) \cdot n^0$, $R = 1/m$, $d_\infty \geq D$. Відповідний турбокодер має швидкість кодування $R_{TK} = 1/(2 \cdot m)$. Схема турбокодера, побудованого на алгебраїчних несистематичних рекурсивних згорткових кодах, з обробкою елементів з $GF(q^m)$, представлена на рис. 8.

Зв'язок параметрів турбокоду, побудованого на основі алгебраїчних систематичних рекурсивних згорткових кодів визначається наступною теоремою.

Теорема 6. Турбокодер, побудований на алгебраїчних несистематичних рекурсивних згорткових кодах, має швидкість кодування:

$$R_{TK} = \frac{k^0}{2 \cdot n^0 - k^0} = \frac{K \cdot |\log_q H|}{2 \cdot (N - K) \cdot m + K \cdot |\log_q H|}$$

Рис. 8. Турбокодер на алгебраїчних несистематичних рекурсивних згорткових кодах з обробкою елементів з $GF(q^m)$

Якщо $k^0 = K$, $n^0 = N$, то маємо рекурсивний систематичний згортковий код з параметрами: $v = (N-K) \cdot K$, $k^0 = K$, $n^0 = N$, $k = (N-K+1) \cdot K$, $n = (N-K+1) \cdot N$, $R = K/N$, $d_\infty \geq D$. Відповідний турбокодер має швидкість кодування $R_{TK} = k^0 / (2 \cdot n^0 - k^0) = K / (2 \cdot N - K)$, тобто швидкість турбокода буде визначатися винятково швидкістю циклічного (N, K, D) коду.

Якщо $k^0 = K = 1$, $n^0 = N$, то маємо рекурсивний систематичний згортковий код з параметрами: $v = N-1$, $k^0 = 1$, $n^0 = N$, $k = N$, $n = N^2$, $R = 1/N$, $d_\infty \geq D$. Відповідний турбокодер має швидкість кодування $R_{TK} = k^0 / (2 \cdot n^0 - k^0) = 1 / (2 \cdot N - 1)$.

Схема турбокодера, побудованого на алгебраїчних рекурсивних згорткових кодах, з обробкою елементів з $GF(q^m)$ представлена на рис. 9.

Рис. 9. Загальна схема турбокодера з використанням алгебраїчних систематичних рекурсивних згорткових кодів з обробкою елементів з $GF(q^m)$

Алгоритм побудови турбокодів на алгебраїчних рекурсивних згорткових кодах складається з послідовності наступних кроків.

КРОК 1. Уведення необхідної швидкості турбокода R_{TK} , необхідних k^0 й n^0 параметрів відповідних згорткових кодів, введення потужності алфавіту кодових символів q .

КРОК 2. Розрахунок швидкості R_{CK} рекурсивних згорткових кодів

КРОК 3. Вибір способу обробки кодових символів.

КРОК 4. Вибір варіанта побудови рекурсивних згорткових кодів, розрахунок параметрів відповідного циклічного коду над $GF(q^m)$, формування породжувальних багаточленів і побудова схеми кодера згорткового коду над $GF(q)$.

КРОК 5. Побудова паралельної каскадної схеми з алгебраїчними рекурсивними згортковими кодами.

Для реалізації процедури ітеративного декодування турбокодів необхідні алгоритми м'якого декодування, що дозволяють оцінити апостеріорну ймовірність кожного з інформаційних символів кодового слова, тобто реалізуючі посимвольне правило прийняття рішень із мінімізацією середньої ймовірності помилки символу. Однак існуючі алгоритми м'якого декодування згорткових кодів навіть при сучасному рівні розвитку мікроелектроніки незастосовні для використання в ітеративному декодері турбокодів з великим значенням кодового обмеження. Тому будемо використовувати алгебраїчний підхід для декодування алгебраїчно заданих згорткових кодів.

Зведемо декодування згорткового коду до декодування послідовності кодових слів циклічного коду. Таким чином, м'яке посимвольне декодування згорткового коду можна звести до м'якого посимвольного декодування послідовних наборів кодових слів циклічного коду. Алгоритм ітеративного декодування турбокодів представимо у вигляді послідовності наступних кроків.

Крок 1. Прийом кодового слова турбокоду. Виділення послідовності інформаційних символів і послідовностей перевірючих символів складових згорткових кодів.

Крок 2. Урахування м'яких рішень другого складового декодера на всіх ітераціях, крім першої (на першій ітерації замість послідовності м'яких рішень використовується нульова послідовність). Перетворення кодового слова першого складового згорткового коду в послідовність кодових слів циклічного коду. М'яке декодування послідовності кодових слів циклічного коду (алгоритми Хартмана-Рудольфа, Грінбергера). Перетворення послідовності кодових слів циклічного коду в кодове слово першого складового згорткового коду.

Крок 3. Перемеження м'яких рішень першого складового декодера й інформаційної послідовності.

Крок 4. Урахування м'яких рішень першого складового декодера. Перетворення кодового слова другого складового згорткового коду в послідовність кодових слів циклічного коду. М'яке декодування послідовності кодових слів циклічного коду (алгоритми Хартмана-Рудольфа, Грінбергера). Перетворення послідовності кодових слів циклічного коду в кодове слово другого складового згорткового коду.

Крок 5. Деперемеження м'яких рішень другого складового декодера.

Крок 6. Якщо поточний номер ітерації дорівнює максимальному числу ітерацій, то здійснюється прийняття жорстких рішень, у противному випадку – перехід до Кроку 2.

Таким чином, запропонований алгоритм ітеративного декодування турбокодів на основі узагальненого подання кодових слів складових згорткових кодів дозволяє звести декодування згорткового коду до декодування послідовності кодових слів циклічного коду.

У шостому розділі досліджуються моделі каналів зв'язку, розроблена методика оцінки достовірності переданої інформації, що дозволяє для заданих параметрів моделі каналу зв'язку із заданою погрішністю оцінити ймовірність помилкового прийому біта інформації й відповідний енергетичний виграш від кодування. Аналітично отримані криві залежності ймовірності помилки на біт від енергетичного відношення сигнал/шум E_b/N_0 для різних довжин N , v , R .

Аналіз отриманих результатів показав, що при фіксованому значенні E_b/N_0 ймовірність помилки зменшується з ростом кодового обмеження й зменшенні швидкості згорткового коду. Однак при використанні кодів зі швидкостями менш 1/3 зростання ефективності кодування припиняється. Використання складових згорткових кодів зі швидкостями k/n для збільшення загальної швидкості турбокоду більш ефективно, ніж застосування процедури виколування.

За допомогою розробленої імітаційної моделі були експериментально підтверджені аналітично отримані результати при $E_b/N_0 \geq 1$ дБ, що підтверджує достовірність отриманих результатів. У ході проведених досліджень із використанням розробленої імітаційної моделі системи передачі інформації встановлено, що турбокоди на основі алгебраїчно заданих рекурсивних згорткових кодів не уступають по ефективності відомим у цей час кодам. На основі отриманих результатів проведених досліджень розроблені практичні рекомендації з використання синтезованих алгебраїчно заданих кодових конструкцій для підвищення достовірності переданої інформації.

У додатках представлена програмна реалізація алгоритмів побудови згорткових кодових конструкцій.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива наукова проблема, пов'язана з розробкою на основі єдиного концептуального підходу методів синтезу, кодування й декодування алгебраїчно заданих згорткових кодових конструкцій з необхідними властивостями й характеристиками, що має велике значення як для розвитку окремого напрямку теорії завадостійкого кодування, так і для вирішення прикладних питань, пов'язаних із забезпеченням заданої достовірності переданої інформації в телекомунікаційних системах і мережах.

1. Проведений аналіз показав, що розвинена в цей час алгебраїчна теорія блокового кодування не може бути безпосередньо застосована до згорткових кодів через значне розходження в їхніх властивостях у порівнянні із блоковими кодами. Незважаючи на це відомо, що існує можливість представлення згорткового коду у вигляді блокового коду напівнескінченної довжини і його наступним алгебраїчним описом. Позитивні результати в цьому напрямку отримані тільки для обмеженого діапазону низьких швидкостей кодування, значення яких не задовольняють сучасним вимогам, пропонованим до параметрів завадостійких кодів. Крім того, раніше не розглядалася можливість застосування алгебраїчної теорії для реалізації декодування алгебраїчно заданих згорткових кодів з довільними параметрами. Таким чином, виникає наукова проблема (суперечлива ситуація), у якій існуючі положення теорії завадостійкого кодування не дозволяють обчислювально реалізувати вирішувати завдання синтезу й декодування згорткових кодів з високими конструктивними кодovими характеристиками.

2. У ході вирішення виявленої наукової проблеми були отримані наступні наукові й практичні результати.

— Одержав подальший розвиток єдиний концептуальний підхід алгебраїчного представлення згорткових кодів у вигляді недвійкових блокових циклічних кодів (напівнескінченної довжини), що відрізняється від відомого (теоретичним узагальненням на випадок напівнескінченної довжини кодового слова циклічного коду й) використанням породжувальних багаточленів недвійкових циклічних кодів, обмежених на довільне підполе, що дозволяє розглядати з єдиних теоретичних позицій процеси синтезу, кодування й декодування згорткових кодів з довільними властивостями й кодovими характеристиками й теоретично обґрунтувати аналітичні вирази по оцінці кодovих співвідношень синтезованих згорткових кодovих конструкцій, аналітично зв'язати їхні параметри й виразити через кодovі характеристики відповідних циклічних кодів.

— Одержали подальший розвиток обчислювально ефективні (такі, що можуть бути обчислювально реалізовані) алгебраїчні методи синтезу (алгебраїчно заданих) згорткових кодів, що відрізняються від відомих використанням обмеження недвійкового циклічного коду на довільне підполе, що дозволяє синтезувати (алгебраїчно задані) згорткові коди з довільними властивостями й кодovими характеристиками.

— Одержали подальший розвиток методи кодування алгебраїчно заданими згортковими кодами, що відрізняються від відомих теоретично обґрунтованими процедурами алгебраїчної побудови рекурсивних і нерекурсивних згорткових кодів через узагальнення циклічних кодів на випадок нескінченної довжини, що дозволяє аналітично формалізувати процес завадостійкого кодування синтезованими згортковими кодами з високими (конструктивними) кодovими характеристиками.

— Уперше розроблені алгебраїчний і комбінований методи декодування алгебраїчно заданих згорткових кодів, які відрізняються від відомих методів процедурами алгебраїчної локалізації й прискорених процедур (алгоритмами) послідовного пошуку, що дозволяє реалізувати обчислювально ефективне (таке, що може бути обчислювально реалізоване) декодування безперервних кодovих конструкцій з великою довжиною кодового обмеження (з більшою кодовою відстанню) для підвищення достовірності переданої інформації.

— Одержали подальший розвиток методи синтезу паралельних каскадних згорткових конструкцій (методи турбокодування), що відрізняються від відомих використанням алгебраїчно заданих рекурсивних згорткових кодів, що дозволяє аналітично зв'язати параметри турбокодів з параметрами алгебраїчно заданих рекурсивних згорткових кодів і синтезувати паралельні каскадні згорткові конструкції із заданими (конструктивними кодovими) характеристиками.

— Одержав подальший розвиток метод ітеративного декодування турбокодів з алгебраїчно заданими рекурсивними згортковими кодами, що відрізняється від відомого узагальненим представленням нескінченного кодового слова згорткового коду через

нескінченну суму послідовних наборів з кодових слів циклічного коду, що дозволяє за рахунок зведення декодування згорткового коду до декодування послідовності кодових слів циклічного коду декодувати турбокоди на основі алгебраїчно заданих згорткових кодів з великою кількістю елементів пам'яті (з високими кодовими характеристиками, високою кодовою відстанню).

– Розроблені алгоритми синтезу, кодування й декодування алгебраїчно заданих згорткових кодових конструкцій з необхідними (ковдовими) характеристиками, такі що можуть бути обчислювально реалізовані.

– Розроблено методику (емпіричної) оцінки достовірності переданої інформації, що дозволяє для (заданих параметрів математичної моделі) дискретно-безперервного каналу із заданою погрішністю оцінити ймовірність помилкового прийому біта інформації й відповідний енергетичний виграш від кодування.

– Розроблено імітаційну модель системи передачі інформації з використанням алгебраїчно заданих згорткових кодових конструкцій, за допомогою якої встановлено, що синтезовані згорткові кодові конструкції, отримані за допомогою розроблених алгоритмів, що можуть бути обчислювально реалізовані, не поступаються по енергетичних характеристиках відомим у цей час кодам; їхнє практичне використання дозволяє забезпечити підвищення достовірності переданої інформації в каналах з випадково виникаючими помилками за рахунок відсутності обмежень при виборі необхідних параметрів синтезованих згорткових кодових конструкцій; розроблені обчислювально реалізуємі алгоритми декодування згорткових кодових конструкцій з високими конструктивними кодовими характеристиками мають параметри близькі до теоретично граничних значень.

– Розроблено практичні рекомендації з використання турбокодів із синтезованими алгебраїчно заданими згортковими кодами. Для забезпечення ймовірності помилки на біт $10^{-5} \div 10^{-6}$ при значенні енергетичного відношення сигнал/шум 1,5 – 2 дБ, пропонується використовувати турбокоди з кількістю елементів пам'яті 2 – 4. Для забезпечення ймовірності помилки на біт $10^{-8} \div 10^{-9}$ пропонується використовувати турбокоди з кількістю елементів пам'яті 6 – 8. Швидкість кодування не рекомендується вибирати менш ніж 1/3.

– Отримані результати використані в науково-дослідних роботах «Мрія», «Алгоритм» (Харківський університет Повітряних Сил, акт реалізації від 12.04.2005), на виробництві при розробці спеціального математичного та програмного забезпечення програмно-апаратного макету завадостійкого кодеру (декодеру) у ЦККБ «Протон» (акт реалізації від 26.05.2008) і в навчальному процесі Української державної академії залізничного транспорту (акт реалізації від 15.04.2008).

3. При вирішенні наукових завдань використовувалися наступні методи дослідження. Розробка й дослідження алгебраїчних методів і процедур синтезу, кодування й декодування згорткових кодових конструкцій проведені з використанням методів алгебраїчної теорії кодів, теорії полів Гауа й теорії чисел. Оцінка достовірності переданої інформації проведена з використанням методів статистичної теорії зв'язку, теорії ймовірності й математичної статистики. Розробка рекомендацій з реалізації кодерів алгебраїчно заданих згорткових кодів проведена з використанням методів теорії цифрових автоматів.

4. Обґрунтованість отриманих результатів заснована на коректному застосуванні основних положень теорії кодування, теорії ймовірностей, статистичної теорії зв'язку, теорії множин, математичної статистики.

5. Достовірність отриманих результатів підтверджується збіжністю теоретичних результатів і результатів по обробці експериментальних даних, отриманих у ході функціонування розробленої імітаційної моделі.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Приходько С.И., Столяров А.С. Принцип приведения двоичных сверточных кодов к недвоичным суженным циклическим кодам. Часть I. // Специальная техника средств связи. – МО СССР. – №3. – 1988. – С.14-16.
2. Приходько С.И., Столяров А.С. Принцип приведения двоичных сверточных кодов к недвоичным суженным циклическим кодам. Часть II // Специальная техника средств связи. – МО СССР. – №4. – 1988. – С.25-29.
3. Приходько С.И., Снисаренко А.Г. Приведение двоичных сверточных кодов к недвоичным суженным циклическим кодам // Радиотехника. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. – Харьков: ХИРЭ. – 1989. – №90. – С.80-86.
4. Приходько С.И. Приведение сверточных кодов к кодам РС // Радиотехника. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. – Харьков: ХИРЭ. – 1989. – №91. – С.81-84.
5. Приходько С.И., Березняков Г.Е. Приведение ортогонализированных сверточных кодов к квазиортогональным // Радиотехника. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. – Харьков: ХИРЭ. – 1990. – №8. – С.76-81.
6. Приходько С.И., Березняков Г.Е. Приведение ортогональных сверточных кодов к квазиортогональным сверточным кодам // Радиотехника. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. – Харьков: ХИРЭ. – 1990. – №83. – С.65-69.
7. Приходько С.И., Гусев С.А., Сидоренко Н.Ф. Принцип приведения ортогональных сверточных кодов к квазиортогональным сверточным кодам // Системы информационного взаимодействия. Сборник научных трудов. – Харьков: НАНУ, ПАНИ, ХВУ. – 1996. – С.83-88.
8. Приходько С.И., Гусев С.А. Циклические сверточные коды // Управление и связь. Сборник научных трудов. – Харьков: НАНУ, ПАНИ, ХВУ. – 1996. – С.98-101.
9. Приходько С.И. Принцип последовательного декодирования обобщенно заданных сверточных кодов. Системы обработки информации. Сборник научных трудов. – Харьков: НАНУ, ПАНИ, ХВУ. – 1998. – С.67-71.
10. Приходько С.И. Алгебраическое представление сверточных кодов // Вестник международного славянского университета. Вып.3. Харьков: НАНУ. – 1998. – С.72-75.
11. Приходько С.И. Алгебраическое кодирование сверточных кодов. Информатика. Сборник научных трудов. Вып.5. Киев: Наукова Думка. – 1998. – С.72-75.
12. Приходько С.И. Алгоритм построения сверточных кодов // Информационные системы. Сборник научных трудов. Вып.1(9). Харьков: НАНУ. – 1998. – С.82-75.
13. Приходько С.И. Построение сверточных кодов // Сборник научных трудов. Информационные системы. Вып.1(19). – Харьков: НАНУ, ПАНИ, ХВУ. – 1998. – С. 144-146.
14. Приходько С.И. Алгебраические сверточные коды // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – Харьков: ХарГАЗТ. – №2(17). – 1999. – С. 62-63.
15. Приходько С.И., Гусев С.А., Кужель И.Е. Алгебраическое построение несистематических сверточных кодов // Системы обработки информации. – Харьков: ХВУ. – 2004 – Вып. 8(36). – С. 170-175.
16. Приходько С.И., Гусев С.А., Кужель И.Е. Алгебраический метод сверточного кодирования // Комп'ютерні системи та інформаційні технології. – Х.: ХАИ. – 2005. – №1 – С.35-43.
17. Тимочко А.И., Приходько С.И., Постольный А.С. Алгебраический метод построения сверточных кодов в систематическом виде // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків: Технологічний центр. – 2005 – № 2/2(14). – С. 118-123.
18. Тимочко А.И., Приходько С.И., Постольный А.С. Алгебраический метод построения рекурсивных сверточных кодов для стандартов космической связи // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – Харків: ХАИ. – 2005. – №1(17). – С. 78-86.

19. Тимочко А.И., Приходько С.И., Постольный А.С. Алгебраические рекурсивные сверточные коды и схемы турбокодирования // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДАЗТ. – №1-2. – 2005. – С. 59-65.
20. Приходько С.И., Гусев С.А., Постольный А.С., Жученко А.С. Алгебраическое декодирование сверточных кодов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДАЗТ. – №6. – 2005. – С. 29-37.
21. Приходько С.И., Гусев С.А., Постольный А.С., Жученко А.С. Комбинированный метод декодирования алгебраических сверточных кодов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДАЗТ. – №2 (58). – 2006. – С. 8-15.
22. Приходько С.И. Оценка нижней границы свободного кодового расстояния алгебраически заданных сверточных кодов // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС. – 2007. – Вип. 5(65). – С. 120 – 124.
23. Приходько С.И. Метод декодирования алгебраических сверточных кодов // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС. – 2008. – Вип. 2(69). – С. 93 – 96.
24. Приходько С.И., Северинов А.В., Жученко А.С., Постольный А.С. Итеративное декодирование турбокодов на основе алгебраических рекурсивных сверточных кодов // Збірник наукових праць. – Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова. – Київ: НАН України, 2005. – Вип. 32. – С. 178 – 183.
25. Спосіб опису пристроїв кодування нерекурсивних згорнених кодів Пат. UA 14180 U, МКІ (2006) Н03М 13/00. – № u 2005 08658; Заявл. 12.09.2005; Опубл. 15.05.2006, Бюл. №5, 2006р. – 6с. // Приходько С.І., Постольний О.С., Гусев С.А., Жученко О.С., Кужель І.Є.
26. Спосіб опису пристроїв кодування рекурсивних згорнених кодів Пат. UA 14179 U, МКІ (2006) Н03М 13/00. – № u 2005 08657; Заявл. 12.09.2005; Опубл. 15.05.2006, Бюл. №5, 2006р. – 4с. // Приходько С.І., Постольний О.С., Гусев С.А., Жученко О.С., Кужель І.Є.
27. Спосіб опису пристроїв кодування згорнених кодів Пат. UA 14181 U, МКІ (2006) Н03М 13/00. – № u 2005 08661; Заявл. 12.09.2005; Опубл. 15.05.2006, Бюл. №5, 2006р. – 6с. // Приходько С.І., Гусев С.А., Жученко О.С., Кужель І.Є.
28. Приходько С.И., Гусев С.А. Алгебраический метод сверточного кодирования // Современные методы кодирования в электронных системах. Материалы международной НТК 26-27 октября 2004. – Сумы: СМКЭС. – 2004. – С.49-50.
29. Приходько С.И., Гусев С.А., Кужель И.Е. Алгебраические сверточные коды // Перша науково-технічна конференція Харківського університету Повітряних Сил, 16-17 лютого 2005. Тези доповідей. – Х.: ХУПС. – 2005. – С. 210 – 211.
30. Приходько С.І. Метод декодирования алгебраических сверточных кодов. // Четверта наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба. 16-17 квітня 2008 р. Матеріали конференції. – Х.: ХУПС. – 2008. – С. 149-150.
31. Приходько С.І. Алгебраический метод построения сверточных кодов для повышения помехоустойчивости передачи дискретных сообщений. // Перспективи розвитку озброєння і військової техніки в збройних силах України. Збірка тез доповідей Першої Всеукраїнської науково-практичної конференції 4-5 березня 2008 р. – Львів: ЛПСВ НУ “ЛП” – 2008. – С. 215.
32. Приходько С.І. Исследование свойств алгебраически заданных сверточных кодов // Управління розвитком “Стратегії ІТ – технологій в освіті, економіці та екології. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Х.: ХНУ. – 2007. – С. 78-79.
33. Приходько С.І. Исследование корректирующих свойств алгебраических сверточных кодов. // Міжнародна науково-технічна конференція “Інтегровані комп’ютерні технології в машинобудуванні” ІКТМ – 2007. Тези доповідей. – Х.: НАКУ “ХАІ”. – 2007. – С.428-429.
34. Приходько С.І. Оценка свободного кодового расстояния алгебраических сверточных кодов // Проблеми інформатики і моделювання. Матеріали сьомої міжнародної науково-технічної конференції 22 листопада – 1 грудня. – Х.: НТУ “ХП” – 2007. – С. 13-14.

35. Приходько С.И. Алгебраические процедуры декодирования сверточных кодов // Современные методы кодирования в электронных системах. Материалы международной НТК 23-24 апреля 2002. – Сумы: СМКЭС. – 2002. – С.11–12.

36. Приходько С.И., Волков А.С. Особенности алгебраических самоортогональных сверточных кодов в частотной области // 22 международная научно-практическая конференция «Перспективные компьютерные, управляющие и телекоммуникационные системы для железнодорожного транспорта Украины». – Алушта. – 2009.

37. Розробка методів та програмних засобів підвищення достовірності та своєчасності передачі даних у телекомунікаційній системі АСУ Військ Протиповітряної Оборони Збройних Сил України комплексу засобів автоматизації “Ореанда”. Звіт про НДР. Шифр “Алгоритм”. Проміжний. № держреєстрації 0101U000413. / Приходько С.І., Кузнецов О.О., Кужель І.Є. та інші // Х.: ХУПС., 2005. – 381с.

38. Розробка методів підвищення якості військового зв'язку АСУ ракетних військ та артилерії”. Шифр «Мрія». Звіт про НДР. № держреєстрації. 0101U000414. Заключний. / Стасев Ю.В., Приходько С.І., Грабчак В.І., та інші // Харків: ХУПС. - 2005. - 133с. - Інв.№ 1607/2.

АНОТАЦІЯ

Приходько С.І. Методи синтезу, кодування та декодування згорткових кодових конструкцій. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі. – Українська державна академія залізничного транспорту, Харків, 2010.

Дисертаційна робота присвячена розробці методів синтезу, кодування та декодування згорткових кодових конструкцій, орієнтованих на застосування в телекомунікаційних системах, що функціонують в умовах малого енергетичного відношення сигнал/шум. Розроблені методи засновані на єдиному концептуальному підході алгебраїчного представлення згорткових кодів у вигляді недвійкових блокових циклічних кодів, що дозволяє розглядати з єдиних теоретичних позицій процедури синтезу, кодування й декодування згорткових кодів з довільними властивостями й кодовими характеристиками й теоретично обґрунтувати аналітичні вирази по оцінці кодових співвідношень синтезованих згорткових кодових конструкцій, аналітично зв'язати їхні параметри й виразити через кодові характеристики відповідних циклічних кодів.

Ключові слова: згортковий код, циклічний код, згорткові кодові конструкції, синдром, турбокод, турбокодер, турбодекодер, ітеративне декодування, перемешувач.

АННОТАЦИЯ

Приходько С.И. Методы синтеза, кодирования и декодирования сверточных кодовых конструкций. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.02 – Телекоммуникационные системы и сети. – Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 2010.

Диссертационная работа посвящена разработке методов синтеза, кодирования и декодирования сверточных кодовых конструкций, ориентированных на применение в телекоммуникационных системах, функционирующих в условиях малого энергетического отношения сигнал/шум.

Основными и наиболее эффективными средствами повышения достоверности передаваемой информации являются методы помехоустойчивого кодирования. В теории помехоустойчивого кодирования можно выделить несколько основных направлений развития.

Первое направление базируется на блоковых кодах и, преимущественно, алгебраических методах представления процессов синтеза, кодирования и декодирования. Наибольшее распростра-

нение среди блоковых кодов получил обширный класс кодов – циклические коды. Наряду с высокими конструктивными свойствами циклических кодов это направление позволяет строить простые и вычислительно эффективные алгоритмы кодирования и декодирования.

Второе направление развития базируется на непрерывных кодах, подклассом которых являются сверточные коды. Отличительной особенностью сверточных кодов является возможность их простого описания деревом или регулярной решетчатой диаграммой, что позволяет реализовать вероятностное декодирование (алгоритмы последовательного декодирования, алгоритм Витерби, алгоритм максимума апостериорной вероятности). Кодер сверточного кода представляет собой линейный регистр сдвига, сложность которого из-за регулярной решетчатой диаграммы не зависит от длины кода (но зависит от числа состояний решетчатой диаграммы), что является значительным преимуществом.

В качестве третьего направления можно выделить методы каскадного кодирования, появление которых связано с попытками синтеза длинных кодов с высокими кодовыми характеристиками на основе достаточно простых составляющих кодов (которые могут быть как блоковыми, так и сверточными), декодирование которых осуществляется отдельными декодерами. Преимущество каскадных кодов состоит в упрощении алгоритмов декодирования и одновременным повышением общей эффективности кодирования.

Развитая в настоящее время алгебраическая теория блочного кодирования не может быть непосредственно применена к сверточным кодам по причине значительного различия в их свойствах по сравнению с блочными кодами. Несмотря на это существует возможность представления сверточного кода в виде блочного кода полубесконечной длины и его последующим алгебраическим описанием. Однако положительные результаты получены только для ограниченного диапазона низких скоростей кодирования, значения которых не удовлетворяют современным требованиям, предъявляемым к параметрам помехоустойчивых кодов (как правило, на практике требуются более высокие скорости кодирования).

Таким образом, возникает научная проблема, в которой существующие положения теории помехоустойчивого кодирования не позволяют вычислительно реализуемо решать задачи синтеза, кодирования и декодирования сверточных кодов с высокими конструктивными кодовыми характеристиками и с произвольными параметрами. В диссертационной работе данная научная проблема решается путем разработки на основе единого концептуального подхода методов синтеза, кодирования и декодирования алгебраически заданных сверточных кодовых конструкций с требуемыми свойствами и характеристиками.

С использованием методов алгебраической теории блоковых кодов, теории конечных полей и полиномиальных методов описания помехоустойчивых кодов разработаны методы и алгоритмы синтеза алгебраически заданных нерекурсивных и рекурсивных сверточных кодов. Разработаны методы декодирования алгебраически заданных сверточных кодов, основанные на использовании бесконечной серии синдромов кодовых слов циклического кода. Предлагается способ формирования бесконечной серии синдромов алгебраически заданного сверточного кода. Разрабатывается подход комбинированного декодирования алгебраически заданных сверточных кодов, состоящий в совмещении алгебраических процедур и процедур последовательного поиска по кодовой решетке. Установлено, что применение предложенных процедур позволяет локализовать ошибки в кодовом слове алгебраически заданного сверточного кода и ускорить последовательный поиск по кодовой решетке при комбинированном методе декодирования. Исследуются методы построения параллельных каскадных кодовых конструкций и процедуры их декодирования. Предлагаются схемы турбокодирования с использованием рекурсивных сверточных кодов, заданных через порождающий и/или проверочный многочлены недвоичного циклического кода. Разработаны алгоритмы построения турбокодов с требуемыми параметрами. Исследуются модели каналов связи, разрабатывается методика оценки достоверности передаваемой информации, которая позволяет для заданных параметров математической модели канала связи с заданной погрешностью оценить вероятность ошибочного приема бита

информации и соответствующий энергетический выигрыш от кодирования. Разрабатывается имитационная модель системы передачи информации с использованием алгебраически заданных сверточных кодовых конструкций, которая позволяет оценить эффективность кодирования синтезированными сверточными кодовыми конструкциями. На основе полученных результатов проведенных исследований разработаны практические рекомендации по использованию синтезированных алгебраически заданных кодовых конструкций для повышения достоверности передаваемой информации.

Ключевые слова: сверточный код, циклический код, сверточные кодовые конструкции, синдром, турбокод, турбокодер, турбодекодер, итеративное декодирование, перемежитель.

ABSTRACT

Prihodko S.I. Methods of synthesis, encodings and decoding of convolutional code constructions. - the Manuscript.

The thesis on competition of a scientific degree of a Dr.Sci.Tech. on a speciality 05.12.02 - Telecommunication systems and webs. - the Ukrainian state academy of a railway transportation, Kharkov, 2009.

Dissertational operation is devoted development of methods synthesis, encoding and decoding of the convolutional code constructions oriented to application in telecommunication systems, functioning in the conditions of a small power signal to noise ratio. The developed methods are grounded on the uniform conceptual approach of algebraic representation of convolutional codes in the form of not binary block cyclic codes that gives the chance to consider from uniform theoretical positions of procedure of synthesis, encoding and decoding of convolutional codes with casual properties and code performances and theoretically to justify analytical expressions according to code relations of the synthesised convolutional code constructions, analytically to link their parametres and to express by means of code performances of appropriate cyclic codes.

Keywords: a convolutional code, a cyclic code, convolutional code constructions, a syndrome, a turbo-code, a turbo-encoder, a turbo-decoder, iterated decoding, interleaver.

Підписано до друку 17.03.2010 р.
Формат паперу 60x84 1/16 Друк. різнограф.
Папір офсетний. Обсяг 1,8 друк. арк. Наклад 100 прим.
Зам. № Безкоштовно.

Видавництво УкрДАЗТ.
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 2874 від 12.06.2007 р.
61050, м. Харків, вул. Фейєрбаха, 7
Друкарня УкрДАЗТу, 61050, м. Харків, вул. Фейєрбаха, 7

Підписано до друку 17.03.2010 р.
Формат паперу 60x84 1/16 Друк. різнограф.
Папір офсетний. Обсяг 1,8 друк. арк. Наклад 100 прим.
Зам. № Безкоштовно.

Видавництво УкрДАЗТ.
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 2874 від 12.06.2007 р.
61050, м. Харків, вул. Фейєрбаха, 7
Друкарня УкрДАЗТу, 61050, м. Харків, вул. Фейєрбаха, 7
