

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Українська державна академія залізничного транспорту

ЗУБЕНКО ВАЛЕНТИНА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 621.391

**МЕТОДИ ПОБУДОВИ І ДЕКОДУВАННЯ КАСКАДНИХ КОДОВИХ
КОНСТРУКЦІЙ З ПОКРАЩЕНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ**

05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Кіровоградському національному технічному університеті Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник :

кандидат технічних наук, доцент

Поддубняк Володимир Йосипович,

Державний ВНЗ «Донецький інститут Української державної академії залізничного транспорту», директор.

Офіційні опоненти :

доктор технічних наук, професор

Лосєв Юрій Іванович, Харківський національний університет імені В.Н.

Каразіна, професор кафедри «Теоретичної та прикладної системотехніки»;

кандидат технічних наук, доцент

Пєвнєв Володимир Яковлевич,

Харківський національний університет внутрішніх справ, доцент кафедри «Інформаційні комунікації, захист інформації та документообіг».

Захист відбудеться «27» березня 2013 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.820.01 при Українській державній академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м.Харків, пл.Фейербаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Української державної академії залізничного транспорту, 61050, м.Харків, пл.Фейербаха, 7.

Автореферат розісланий « » _____ 2013 р.

Учений секретар

Спеціалізованої вченої ради

к.т.н., доцент

К.А. Трубчанінова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. Не дивлячись на велику кількість робіт виконаних у відповідності з Концепцією розвитку зв'язку України до 2010 року, затвердженою постановою Кабінету Міністрів України №2238 від 9 грудня 1999 р. швидкий розвиток інфокомунікаційних систем вимагає розробки новітніх методів і технічних засобів цифрової обробки сигналів, технологій завадостійкої високошвидкісної телепередачі інформації. Перспективним напрямом в цьому сенсі є методи синтезу завадостійких кодів з покращеними властивостями, розробка нових обчислювально ефективних алгоритмів їх побудови і декодування.

Досвід експлуатації систем і мереж зв'язку, результати досліджень ефективності вживаних методів завадостійкого кодування показали, що найбільший енергетичний вигравш від кодування дає використання згорткових кодів і паралельних каскадних кодових конструкцій на їх основі (турбо-кодів). Так, в роботах таких відомих вітчизняних та закордонних вчених як, Шеннон К., Блейхут Р., Прокіс Дж., Скляр Бернард, Вітербі А.Д., Стєклов В.К., Беркман Л.Н., Т. Касамі, Ф.Дж. Мак-Вільямс, Н.Дж.А. Слоен, Цимбал В.П., показано, що методи побудови згортальних кодів і каскадних кодових конструкцій спільно з методами м'якого декодування дозволяють забезпечити завадостійкість передачі дискретних повідомлень, близьку до теоретичної межі.

У той же час, поряд з високою енергетичною ефективністю даного класу кодів, слід зазначити надзвичайно високу складність їх практичної реалізації. Це пояснюється, перш за все, тим, що застосування як згорткових кодів, так і паралельних каскадних кодів на їх основі вимагає використання алгоритмів декодування по максимуму правдоподібності, надзвичайно складних в практичній реалізації.

Іншим перспективним напрямом в розвитку методів завадостійкого кодування є застосування лінійних блокових кодів з швидкими алгоритмами декодування і побудова на їх основі каскадних конструкцій. У роботах таких відомих вчених, як Берлекемп Е., Омура Дж.К., Злотник Б. М., Кларк Дж., мол., Кейн Дж., Кузьмин І.В., Кедрус В.А. показано, що по своїх асимптотичних властивостях подібні конструкції можуть лежати дуже близько до теоретичних кодових меж. У той же час існуючі методи і алгоритми швидкого декодування не оптимальні по критерію мінімізації ймовірності помилки, а вживана схема з жорсткими рішеннями не дозволяє добитися високої завадостійкості передачі дискретних повідомлень.

Таким чином, розробка нових методів побудови та декодування каскадних кодових конструкцій з покращеними властивостями є актуальним складним науковим-технічним завданням, спрямованим на підвищення завадостійкості передачі дискретних повідомлень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.

Дисертаційна робота пов'язана з наступними перспективними концепціями та напрямками розвитку науки і техніки в Україні в галузі телекомунікаційних систем і мереж:

1. 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.
2. Концепція Національної програми інформатизації схваленої Законом України «Про Концепцію Національної програми інформатизації» від 4 лютого 1998 р. N 75/98-ВР.
3. 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. №410-р.
4. Концепція розвитку телекомунікації в Україні, схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 7 червня 2006 р. № 316-р.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення завадостійкості передачі дискретних повідомлень на основі використання каскадних кодових конструкцій з покращеними властивостями.

Відповідно до мети роботи необхідно вирішити **науково-технічне завдання**, що полягає в розробці методів побудови і декодування каскадних кодових конструкцій з покращеними властивостями для підвищення завадостійкості передачі дискретних повідомлень. Для вирішення цієї задачі необхідно розв'язати наступні **задачі дослідження**.

1. Провести аналіз методів завадостійкого кодування інформації та обґрунтувати шляхи їх вдосконалення.
2. Вдосконалити метод побудови каскадних кодових конструкцій з покращеними властивостями, процедуру їх синтезу і програмну реалізацію.
3. Вдосконалити метод декодування, розробити обчислювальні алгоритми декодування каскадних кодових конструкцій з ітеративним обміном м'якими рішеннями і реалізувати їх програмно.
4. Дослідити завадостійкість передачі дискретних повідомлень з використанням каскадних кодових конструкцій і обґрунтувати практичні рекомендації по їх впровадженню.

Об'єкт дослідження. Процес підвищення завадостійкості передачі дискретних повідомлень з використанням каскадних кодових конструкцій з покращеними властивостями.

Предмет дослідження. Методи побудови і декодування каскадних кодових конструкцій з покращеними властивостями.

Методи дослідження. Методи алгебри кодів, теорії полів Галуа і теорії чисел для розробки і дослідження каскадних кодових конструкцій з покращеними властивостями. Методи статистичної теорії зв'язку, теорії ймовірності і математичної статистики для дослідження завадостійкості передачі дискретних повідомлень з використанням каскадних кодових конструкцій. Методи теорії автоматів і теорії складності для розробки пропозицій по реалізації каскадних кодів з покращеними властивостями і оцінки складності алгоритмів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що у дисертаційній роботі вперше визначено, сформульовано та вирішено науково-технічне завдання підвищення завадостійкості передачі дискретних повідомлень за рахунок розробки та впровадження методів побудови каскадних кодових конструкцій з покращеними властивостями і їх декодування на основі ітеративного обміну м'яких рішень.

Отримані наступні **наукові результати**.

1. **Вдосконалено** метод побудови каскадних кодових конструкцій, що відрізняються від відомих аналітичним описом внутрішньої структури і особливостей синтезу кодових слів, запропонованими алгебраїчними процедурами кодування через перетворення елементів складених кодів з урахуванням потужності алфавіту символів, що дозволяє узагальнити каскадні конструкції, які синтезуються, на випадок недвійкових послідовностей з ітеративним обміном м'якими рішеннями.
2. **Вдосконалено** метод м'якого декодування каскадних кодових конструкцій з ітеративним обміном м'яких рішень, який відрізняється від відомих методів запропонованою процедурою формування системи перевірочних рівнянь з найбільш достовірними кодовими символами, обчисленням м'яких рішень про значення декодованих символів і їх ітеративним обміном, що дозволяє реалізувати швидке декодування кодових слів складених кодів по критерію мінімізації помилкового прийому символів інформаційного повідомлення і прискорити таким чином процес турбо-декодування каскадних кодів.
3. **Одержав подальший розвиток** метод оцінки завадостійкості передачі дискретних повідомлень в каналах з випадково виникаючими помилками, який відрізняється від відомих запропонованою ітеративною процедурою статистичного тестування послідовності, що приймається для емпіричної оцінки вірогідності помилки на біт на виході декодера при заданій межі довірчого інтервалу (точність оцінки), що дозволяє при фіксованому співвідношенні енергії сигналу до спектральної щільності потужності шуму одержувати достовірні (із заданою довірчою вірогідністю) залежності завадостійкості передачі дискретних повідомлень.

Практичне значення отриманих результатів дисертаційних досліджень полягає в розробці нових алгоритмів кодування та декодування.

1. Розроблено алгоритм побудови каскадних кодових конструкцій з покращеними властивостями. Розроблена структурна схема пристрою завадостійкого кодування і програмна реалізація з використанням каскадних кодів з покращеними властивостями, дані практичні рекомендації по його практичному використанню.
2. Розроблено алгоритм декодування каскадних кодових конструкцій з ітеративним обміном м'яких рішень. Розроблена структурна схема пристрою декодування та її програмна реалізація, визначені рекомендації по їх практичному використанню.
3. Розроблено імітаційну модель каналу передачі дискретних повідомлень з використанням каскадних кодових конструкцій і методу декодування з ітеративним обміном м'якими рішеннями. Одержані емпіричні залежності

ймовірності помилкового прийому символів повідомлення від співвідношення «сигнал-шум». Встановлено, що застосування запропонованих каскадних кодових конструкцій дозволяє зменшити ймовірність помилки декодування і одержати енергетичний вииграш 4,5 – 5,5 dB.

4. Отримані результати використані в науково-дослідних роботах, які проводяться в рамках «Концепції розвитку телекомунікації в Україні», та можуть бути використані в навчальному процесі та науково-дослідних роботах Української державної академії залізничного транспорту.

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові результати дисертаційної роботи отримано самостійно. В роботах, виконаних з співавторами та опубліковано у виданнях, які ввійшли до переліку ДАК України, автору належать:

– в [1] проведено порівняльний аналіз методів побудови узагальнених каскадних кодів з використанням блокових та згортувальних кодів;

– в [2] обґрунтовані та формалізовані каскадно-кодові конструкції з покращеними властивостями; запропоновані нові алгебраїчні процедури синтезу з використанням недвійкових блокових кодів (кодів РС та алгеброгеометричних кодів);

– в [3] вдосконалено метод м'якого декодування каскадних кодових конструкцій з ітеративним обміном м'яких рішень;

– в [4] розроблений алгоритм декодування каскадних кодових конструкцій з ітеративним обміном м'яких рішень.

– в [5] розроблено імітаційну модель каналу передачі дискретних повідомлень з використанням каскадних кодових конструкцій та досліджено її роботу.

Апробація результатів досліджень. Основні результати досліджень доповідались та були схвалені на наступних науково-технічних конференціях:

- 23-а Міжнародна конференція «Перспективні комп'ютерні і телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України». Алушта, 23-29 вересня 2010 р.;

- 24-а міжнародна науково-технічна конференція «Перспективні комп'ютерні системи, що управляють і телекомунікаційні, для залізничного транспорту України». Алушта, 23-29 вересня 2011 р.;

- Міжнародна науково-практична конференція «Автоматика та енергозберігаючі технології». Кіровоград, 17-19 жовтня 2012 р.;

а також на щорічних науково-технічних конференціях викладачів і аспірантів Кіровоградського національного технічного університету, Кіровоград (2010-2012р.).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи викладено в 5 наукових статтях, які опубліковані у збірниках наукових праць, що входять до переліку ДАК України [1-5], 3 тезисах доповідей (2 доповіді – на науково-технічних конференціях, 1 доповідь – на науково-практичній конференції) [6-8].

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновку, списку використаних джерел та додатку. Матеріал дисертації містить 187 сторінок, з них: основний зміст – 138 сторінок, у тому числі

18 рисунків, 6 таблиць; 1 додаток загальним обсягом 32 сторінки і список використаних джерел з 144 найменувань на 17 сторінках. Дисертація написана російською мовою.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі приведена загальна характеристика дисертаційної роботи, обґрунтована актуальність науково-технічного завдання, визначається зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, сформульовані мета, об'єкт, предмет і методи дослідження, поставлені задачі, що вирішуються. Визначена наукова новизна та сформульовані наукові і практичні результати.

У першому розділі проводиться порівняльний аналіз відомих методів завадостійкого кодування інформації, обґрунтовуються критерії і показники їх ефективності. Досліджуються методи побудови каскадних кодових конструкцій, обґрунтовуються перспективні шляхи їх подальшого вдосконалення, обґрунтовується вибір напряму досліджень і формалізується постановка науково-технічне завдання дисертаційного дослідження.

Проведений порівняльний аналіз показав, що існуючим методам завадостійкого кодування властиві наступні недоліки: висока складність реалізації алгоритмів синтезу і декодування по максимуму правдоподібності неперервних (древовидних) і лінійних блокових кодів при достатньо високих показниках енергетичного виграшу від кодування (ЕВК); порівняно низькі значення ЕВК лінійних блокових кодів (в порівнянні з алгоритмами м'якого декодування згортальних кодів) при низькій складності розрахунків алгебраїчних методів їх синтезу і декодування.

Для усунення науково-технічного протиріччя між існуючим станом розвитку методів і алгоритмів завадостійкого кодування та необхідними для практики властивостями, запропоновано розробити перспективні каскадні кодові конструкції з покращеними властивостями, утворені каскадуванням лінійних блокових кодів зі швидкими алгоритмами м'якого декодування та ітеративним обміном одержаних рішень.

У другому розділі здійснено аналіз методів побудови каскадних кодових конструкцій, структури кодового слова узагальненого каскадного коду та виявлені їх переваги і недоліки з точки зору практичного застосування.

Показано, що використання згортальних (неперервних) кодів в паралельних каскадних кодових конструкціях веде до різкого збільшення обчислювальної складності реалізації оскільки їх складність експоненціально росте залежно від параметрів згортального коду.

Для усунення недоліків розглянутих методів каскадування блокових кодів запропоновано використовувати турбо-продуктивні коди (Turbo Product Codes), оскільки їх конструктивні показники перевершують ітеративні коди і по кодових співвідношеннях наближаються до теоретичної межі Варшавова-Гілберта.

Аналіз структури кодового слова, показав, що узагальненим каскадним кодам властиві наступні конструктивні недоліки:

1. Для побудови узагальненого каскадного коду всі m кодів першої ступені підбрано так, що i -й код першої ступені є підкодом (як лінійний підпростір) $(i+1)$ -го коду першої ступені. На практиці така побудова викликає істотні труднощі і синтез узагальненого каскадного коду з потрібними для практичних застосувань характеристиками є важким.
2. За визначенням узагальнений каскадний код – це двійковий лінійний блоковий код, а найбільш ефективним засобом боротьби з помилками, що групуються і впливають практично на всі реальні канали передачі даних, є недвійкові коди, обробка символів яких виконується з використанням арифметики кінцевого поля $GF(q)$, $q > 2$. Очевидно, що існуючі методи побудови і декодування узагальнених каскадних кодів не здійснюють синтез недвійкових кодових конструкцій, відсутні обчислювальні алгоритми кодування і декодування.

Для подолання виявлених недоліків запропоновано використання каскадних кодових конструкцій з покращеними властивостями (рис. 1), які є узагальненням каскадних кодів на випадок недвійкових кодових слів над $GF(q)$, $q > 2$.

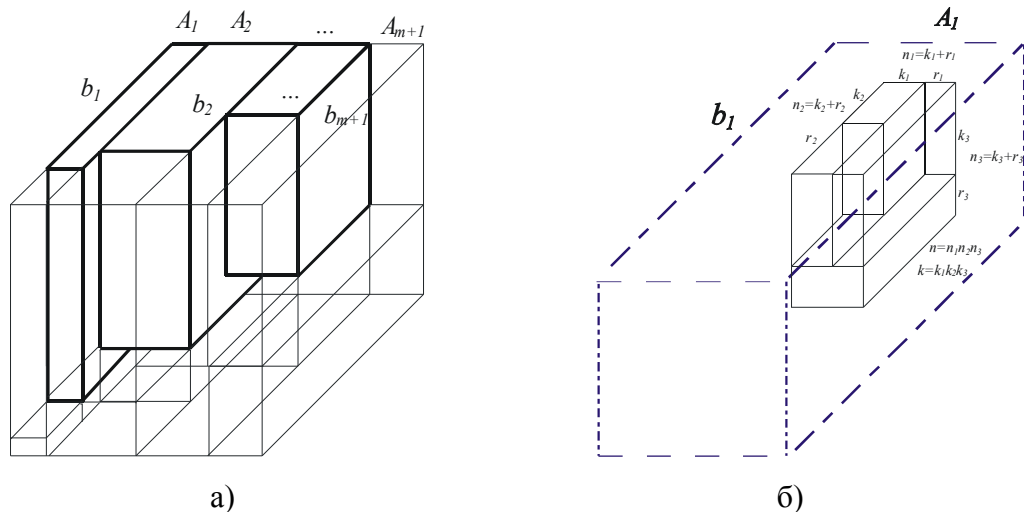


Рис. 1. Структура кодового слова запропонованих каскадних кодових конструкцій з покращеними властивостями: а) графічна інтерпретація зовнішнього виду, б) графічна інтерпретація внутрішньої побудови.

k_2 – кількість підблоків, k_1 – двійкові інформаційні символи,

Структура кодового слова запропонованих каскадних кодових конструкцій з покращеними властивостями представляє собою A -мірний куб, в підкубі (рис.1, б) якого розміщуються інформаційні символи повідомлення, а перевірочні символи формуються в результаті кодування по рядках і стовпцях куба простим недвійковим блоковим кодом. Ідеологія турбо-декодування в даному випадку полягає в обміні м'якими рішеннями при декодуванні в різних площинах, саме декодування є симбіозом паралельно-послідовного виконання алгоритмів декодування з м'якими рішеннями над відповідними рядками-стовпцями A -мірного куба.

Для зазначених кодових конструкцій обґрунтовані нові алгебраїчні процедури синтезу з використанням недвійкових блокових кодів (кодів Ріда-Соломона (РС) і алгеброгеометричних кодів).

У відповідності з процедурами синтезу узагальнених каскадних кодів, обґрунтовано виконання трьох етапів синтезу запропонованих каскадних кодових конструкцій з покращеними властивостями.

На *першому етапі* визначаються внутрішня структура каскадного (n, k, d) коду над полем $GF(2^{A_i})$, величини $A_i > 0$, $i = \overline{1, m}$ ($A_i = p_i \cdot a$, p_i – ступінь розширення двійкового поля, т.б. потужність алфавіту символів, a – додатна постійна, яка визначає швидкість зміни потужності алфавіту символів); $b_i \geq 0$; $n_1 > 0$; $n_2 > 0$, які задовольняють умові:

$$n = n_1 n_2; k = \sum_{i=1}^{m+1} A_i b_i; d \geq \begin{cases} \min\{d_{1i}, d_{2i} : i = \overline{1, m}\} n \text{ при } b_{m+1} = 0, \\ \min\{d_{2m+1}, d_{1i}, d_{2i} : i = \overline{1, m}\} n \text{ при } b_{m+1} \neq 0. \end{cases}$$

де m – порядок каскадного коду; d_{1i} – мінімальна кодова відстань i -го коду (рис. 1).

Мета *другого етапу* полягає у визначенні n_2 квадратних породжуючих матриць H_0^j , $j = \overline{1, n_2}$, порядку n_1 . Кожна з таких матриць повинна містити m підматриць H_i , $i = \overline{1, m}$, та має однозначно визначати правило кодування такого i -го коду першої ступені з параметрами (n_1, k_i, d_{1i}) , який є підкодом $i+1$ -ого кода першої ступені.

Третій етап полягає у побудові $m+1$ групових кодів (кодів другої ступені) з параметрами (n_2, b_i, d_{2i}) .

Основна перевага запропонованих кодових конструкцій, у порівнянні з узагальненими каскадними кодами, полягає в суттєвому спрощенні процедури синтезу на другому етапі. Основна відмінність полягає в тому, що на цьому етапі потрібно знайти такий набір кодів першої ступені, що б вони крім конструктивних (n_1, k_i, d_{1i}) параметрів задовольняли умові вкладення i -м кодом в i -й код першої ступені.

З цією метою для дослідження недвійкових блокових кодів на другому етапі запропоновано використання добре відомих лінійних кодів з максимально досяжною кодовою відстанню (МДР коди) – кодів РС, а також недвійкових кодів, що асоціюються з алгебраїчними кривими (алгеброгеометричні коди).

Так для ланцюжка кодів РС над $GF(q)$, $\alpha \in GF(q)$, та будь-якою додатною константою l , нами в роботі було доведено твердження 1.

Твердження 1. Для будь-якого $1 \leq l \leq q-1$ код РС над $GF(q)$, заданий породжуючим многочленом $g_l(x)$, є підкодом РС коду з многочленом, що породжує $g_{l+1}(x)$.

Для ланцюжка алгеброгеометричних кодів, що є підкодами один одного, доведено твердження 2.

Твердження 2. Нехай P_i – проектні точки кривої алгебри, $F_j(P_i)$ – значення генераторних функцій в точках кривої, використовувані для побудови алгеброгеометричного коду. Тоді лінійний блоковий код, заданий матрицею, що породжує $G = \|F_j(p_i)\|_{n,l+1}$, є підкодом лінійного блокового коду з матрицею, що породжує $G = \|F_j(p_i)\|_{n,l}$.

Результати доведення тверджень 1, 2 дозволили *вперше* запропонувати алгебраїчні процедури синтезу розроблених каскадних кодових конструкцій, з використанням недвійкових блокових кодів (кодів РС та алгеброгеометричних кодів). Розроблені алгебраїчні процедури дозволили практично реалізувати синтез пропонованих каскадних кодових конструкцій з покращеними властивостями.

У третьому розділі досліджуються методи декодування з м'якою схемою ухвалення рішень і процедури обміну м'якими рішеннями в алгоритмах турбо-декодування. Пропонується вдосконалений метод м'якого декодування каскадних кодових конструкцій з ітеративним обміном м'яких рішень, який відрізняється від відомих методів прискореною процедурою відбору перевірочних рівнянь з найбільш достовірними символами, що дозволяє реалізувати декодування кодових слів по критерію мінімізації помилкового прийому символів і прискорити процес турбо-декодування каскадних кодів. Запропоновані обчислювальні алгоритми, що реалізують прискорений відбір перевірочних рівнянь з найбільш достовірними символами та ітеративний обмін рішеннями в схемі турбо-декодера.

Реалізація процедури турбо-декодування має на увазі використання методів декодування з м'яким рішенням на виході. Принцип турбо-декодування представлений на рис. 2, полягає в обміні м'якими рішеннями, одержаними з різних ступенів каскадного коду, для уточнення рішення на наступній ітерації декодування.



Рис. 2. Схема м'якого декодування з ітеративним обміном м'яких рішень про достовірність символів прийнятої послідовності (схема турбо-декодера)

Проведений аналіз відомих підходів до побудови схем декодування лінійних блокових кодів з м'якими рішеннями показав, що загальним недоліком цих методів є складність їх практичної реалізації. Тому, перспективним напрямом для розробки та удосконалення методів декодування з м'якими рішеннями на основі вирішуючих функцій, які, без значного зниження енергетичного виграшу від кодування дозволили б істотно спростити складність практичної реалізації, є формування

впорядкованих підмножин перевірочних рівнянь і методів декодування на їх основі.

Реалізацію цього напрямку здійснено на прикладі передачі двох сигналів по каналу AWGN, нехай двійкові логічні елементи 1 та 0 представляються сигналами

$S_1 = 1$ і $S_2 = -1$ з використанням формули повної ймовірності та теореми Байеса для перевірки гіпотез.

На м'якому виході декодера прийнятий символ запишеться у вигляді

$$L_{FDK}(S_1, S_2, C_1, C_2) = L_S(S_1, S_2) + L_{DS}(S_1, S_2) + L_{DK}(C_1, C_2), \quad (1)$$

тобто м'яке рішення на виході декодера залежить від трьох величин: $L_S(S_1, S_2)$ - логарифм відношення апіорної вірогідності сигналів S_1 і S_2 ; $L_{DS}(S_1, S_2)$ - логарифм відношення апостеріорної вірогідності сигналів S_1 і S_2 (результат каналних вимірювань) і $L_{DK}(C_1, C_2)$ - логарифм відношення функцій правдоподібності двійкових кодових символів C_1 і C_2 як результат декодування.

Отже, для прийняття рішення, потрібно підсумувати окремі внески, оскільки всі три компоненти статистично незалежні. М'який вихід декодера $L_{FDK}(S_1, S_2, C_1, C_2)$ є дійсним числом, що забезпечує як саме ухвалення жорсткого рішення, так і його надійність.

Знак $L_{FDK}(S_1, S_2, C_1, C_2)$ задає жорстке рішення, тобто:

$$c_i = \begin{cases} C_1 = 1, \text{ якщо } L_{FDK}(S_1, S_2, C_1, C_2) > 0 \\ C_2 = 0, \text{ якщо } L_{FDK}(S_1, S_2, C_1, C_2) < 0 \end{cases}, \quad (2)$$

де \tilde{n}_i - значення i -го біта, відповідне схвалюваному прийнятому рішення.

Як правило, величина $L_{DK}(C_1, C_2)$ має той же знак що і $L_{FDK}(S_1, S_2, C_1, C_2)$. Порівняння знаків цих величин підвищує, таким чином, достовірність ухвалюваного рішення.

Розглянемо роботу демодулятора (рис. 2) коли для передачі інформації використовується два сигнали ($S_1 = 1$ і $S_2 = -1$) і відповідні їм двійкові кодові символи $C_1 = 1$ і $C_2 = 0$. Під час першої ітерації на вході такого декодера дані вважаються рівноімовірними, що дає початкове апіорне значення $L_S(S_1, S_2) = 0$. Канальне вимірювання дозволяє знайти значення $L_{DS}(S_1, S_2)$. На виході декодера отримуємо значення $L_{DK}(C_1, C_2)$. При ітеративному декодуванні, як показано на рис. 2., здійснюється оновлення апіорної ймовірності інформації наступної ітерації $L_S(S_1, S_2) = L_{DK}(C_1, C_2)$.

Ґрунтуючись на рівнянні (1) одержаний алгоритм, який дає оцінку м'якого виходу декодера $L_{DK}(C_1, C_2)$ і результуючу оцінку $L_{FDK}(S_1, S_2, C_1, C_2)$. Аналіз алгоритму, показує, що основним завданням при реалізації турбо-декодування є розробка процедури обчислення м'якого рішення $L_{DK}(\tilde{N}_1, \tilde{N}_2)$ для ітеративної процедури обміну в процесі турбо-декодування.

Для аналізу можливих шляхів обчислення м'якого рішення $L_{DK}(C_1, C_2)$ на виході декодера використовувалися одержані вирази (1) та (2) для лінійного блокового (n, k, d) коду над кінцевим полем $GF(2)$. В цьому випадку визначено, що м'який вихід декодера $L_{FDK}(\tilde{n}_j) = L_{FDK}(S_1, S_2, \tilde{N}_1, \tilde{N}_2)$ є дійсним числом і матиме вигляд:

$$L_{FDK}(c_j) = L_S(c_j) + L_{DS}(c_j) + \sum_{i=0}^{2^{n-k}-1} L_{DK_i}(c_j). \quad (3)$$

А знак $L_{FDK}(\tilde{n}_j)$ задає жорстке рішення за наступним правилом:

$$c_j = \begin{cases} C_1 = 1, \text{ якщо } L_{FDK}(c_j) > 0 \\ C_2 = 0, \text{ якщо } L_{FDK}(c_j) < 0 \end{cases} \quad j = 0, 1, \dots, n-1 \quad (4)$$

Аналіз виразу (3) показує, що із збільшенням кодових (n, k, d) параметрів число доданків швидко зростає і вже при $(n-k) > 32$ застосування розглянутого підходу стає обчислювально недоцільним. Перспективним напрямом для подолання цього недоліку є розробка правила формування впорядкованих підмножин перевірочних рівнянь і теоретичне обґрунтування на їх основі вирішальних функцій для методів декодування з м'якими рішеннями.

Нами, у дисертаційній роботі, для довільного кодового слова $\tilde{n} = (\tilde{n}_0, \tilde{n}_1, \dots, \tilde{n}_{n-1})$ лінійного блокового (n, k, d) коду, т.б. $c \in GF^k(2)$, $c_i \in [0, 1]$ та довільного вектору, одержаного лінійною комбінацією рядків перевірочної матриці H - $h_i = (h_{i_0}, h_{i_1}, \dots, h_{i_{n-1}})$ запропоновано використовувати наступну впорядковану підмножину перевірочних рівнянь:

$$I_h = \begin{cases} c_0 h_{i_{00}} + c_1 h_{i_{01}} + \dots + c_j h_{i_{0j}} + \dots + c_{n-1} h_{i_{0n-1}} = 0; \\ c_0 h_{i_{10}} + c_1 h_{i_{11}} + \dots + c_j h_{i_{1j}} + \dots + c_{n-1} h_{i_{1n-1}} = 0; \\ \dots \\ c_0 h_{i_{(M-1)0}} + c_1 h_{i_{(M-1)1}} + \dots + c_j h_{i_{(M-1)j}} + \dots + c_{n-1} h_{i_{(M-1)n-1}} = 0, \end{cases} \quad (5)$$

де i_0, i_1, \dots, i_{M-1} такі номери перевірочних рівнянь, для яких елементи i -го рядка перевірочної матриці $h_{i_j} \neq 0$, а для кожного перевірочного рівняння з (5) наступну оцінку:

$$F_i = \frac{1}{|h_i|} \sum_{l=0}^{n-1} |L_{DS}(c_l) h_{i_l}|, \quad i = i_0, i_1, \dots, i_{M-1}, \quad (6)$$

як середню величину абсолютних значень логарифмів відношення правдоподібності $L_{DS}(c_l)$, $l = 0, 1, \dots, n-1$ відповідних ненульовим елементам перевірочних рівнянь.

Очевидно, що в «ідеальному» випадку $F_i = |L_{DS}(\tilde{n}_j)|$. Перешкоди в каналі зв'язку змінюють величини $L_{DS}(\tilde{n}_l)$ в рівнянні (6) і можуть як зменшити (у разі неспівпадання знаку перешкоди та сигналу), так і збільшити (у разі збігу знаку перешкоди та сигналу) абсолютні значення $|L_{DS}(c_l)|$. Оцінка F_i дає середнє значення $|L_{DS}(\tilde{n}_l)|$ по всіх елементах кодового слова, що беруть участь в оцінці $L_{DS}(c_j)$. Перевірочні рівняння (5) з більшим F_i згідно формули (6) дають, таким чином, достовірнішу оцінку, обчислену згідно формули (1) і правила (3) для i -го перевірочного рівняння. Тоді

$$L_{DK_i}(c_j) = \sum_{\substack{l=0, \\ l \neq j}}^{n-1} (L_S(c_l) + L_{DS}(c_l)) h_{i_l}. \quad (7)$$

Одержані по виразу (6) оцінки середньої величини абсолютних значень $L_{DS}(\tilde{n}_l)$, $l = 0, 1, \dots, n-1$ використані в якості вагових коефіцієнтів при оцінці логарифма правдоподібності, будуть мати наступний вигляд:

$$L_{DK}(c_j) = \sum_{i=i_0}^{i_{M-1}} F_i L_{DK_i}(c_j). \quad (8)$$

Вираз (8) спільно з впорядкованою підмножиною перевірочних рівнянь (5) задають правило декодування з м'якою оцінкою ухвалюваних рішень про достовірність кодових символів $L_{DK}(c_j)$.

М'яке рішення на виході декодера $L_{FDK}(c_j) = L_{FDK}(S_1, S_2, C_1, C_2)$ з використанням формованих впорядкованих підмножин перевірочних рівнянь є дійсним числом, і визначається як:

$$L_{FDK}(c_j) = L_S(c_j) + L_{DS}(c_j) + \sum_{i=i_0}^{i_{M-1}} F_i L_{DK_i}(c_j). \quad (9)$$

Знак $L_{FDK}(\tilde{n}_j)$, як і раніше, задає жорстке рішення за правилом (4).

Використовуючи рівняння (9), яке задає правило оцінювання кодового символу з м'яким прийняттям рішень та з урахуванням співвідношень (6-8), формалізовано процес декодування з ітеративним обміном одержаних м'яких оцінок та розроблена блок-схема (рис. 3) алгоритму м'якого декодування лінійних блокових кодів.

Алгоритм (рис. 3) дозволяє одержати оцінку м'якого виходу декодера $L_{DK}(c_j)$, результуючу оцінку $L_{FDK}(c_j)$ та символ $c(j)$ після виконання заданої кількості ітерацій N_k турбо-декодування каскадної кодової конструкції, що містить m складених кодів.

Таким чином в результаті проведених досліджень розроблений алгоритм декодування каскадних кодових конструкцій з ітеративним обміном м'яких рішень, який практично реалізує запропонований вище метод. Розроблений алгоритм заснований на послідовному виконанні процедур формування впорядкованих підмножин перевірочних рівнянь і оцінці логарифмів відношення правдоподібності та дозволяє за кінцеве число кроків реалізувати декодування каскадних кодових конструкцій по критерію мінімізації помилкового прийому кодових символів.

У четвертому розділі з використанням методів теорії ймовірності і математичної статистики розроблена методика експериментальних досліджень завадостійкості передачі дискретних повідомлень з використанням каскадних кодових конструкцій.

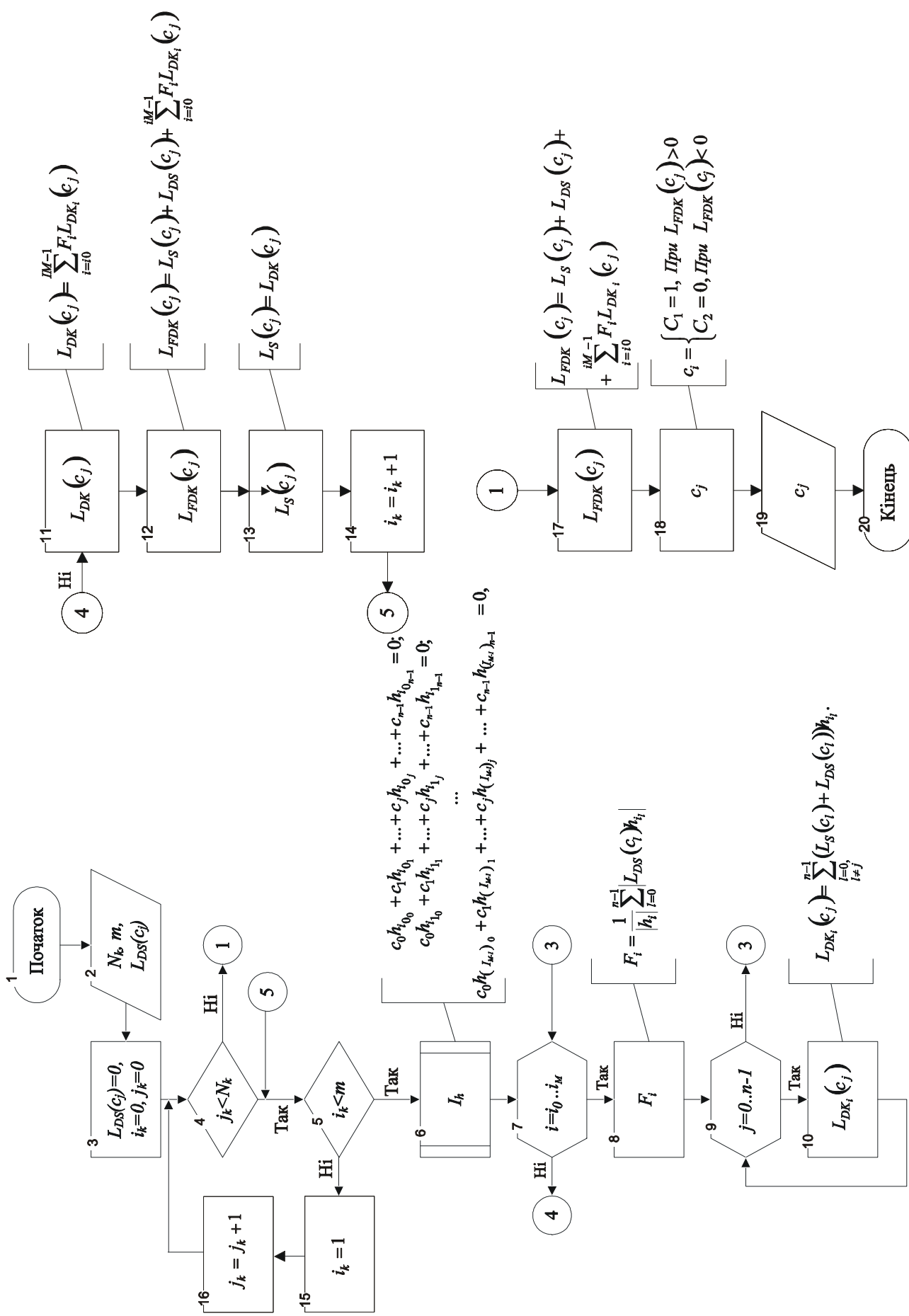


Рис. 3. Блок-схема алгоритму м'якого декодування

Зокрема, з використанням математичного апарату статистичної перевірки гіпотез, запропонована процедура оцінювання ймовірності помилкового прийому символів повідомлення при фіксованому співвідношенні «сигнал/шум». Розроблена імітаційна модель каналу передачі дискретних повідомлень на основі каскадних кодових конструкцій і методів декодування з ітеративним обміном м'яких рішень.

Проведено експериментальні дослідження завадостійкості передачі дискретних повідомлень, одержані емпіричні залежності ймовірності помилкового прийому символів дискретних повідомлень від співвідношення «сигнал/шум». Обґрунтовані практичні рекомендації по впровадженню отриманих результатів для підвищення достовірності передачі дискретних повідомлень в телекомунікаційних системах і мережах спеціального призначення, у тому числі і в системах управління і зв'язку на транспорті.

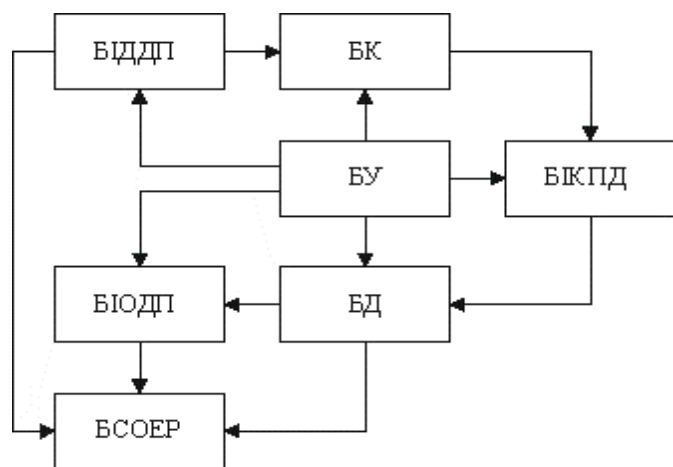


Рис. 4. Структурна схема розробленої імітаційної моделі каналу передачі дискретних повідомлень

Імітаційна модель (рис. 4) структурно складається з блоку імітації джерела дискретних повідомлень (БІДДП), блоку кодування лінійним каскадним блоковим кодом (БК), блоку імітації каналу передачі даних (каналу AWGN) (БКПД), блоку декодування з ітеративним обміном м'яких рішень між складеними декодерами каскадної кодової конструкції (БД), блоку імітації одержувача дискретних повідомлень (БІОДП), блоку статистичної обробки експериментальних результатів (БСОЕР) і блоку узгодження (БУ).

Отримана модель (рис. 4) забезпечила можливість проведення експериментальних досліджень

ефективності каскадних кодових конструкцій з використанням запропонованого методу м'якого декодування. Розроблена методика проведення експериментальних досліджень дозволила проаналізувати поведінку залежностей ймовірності помилок від кількості ітерацій турбодекодера та із заданою довірчою ймовірністю і встановленим довірчим інтервалом при фіксованому співвідношенні «сигнал/шум» одержувати достовірні залежності перешкодостійкості передачі дискретних повідомлень.

В результаті моделювання отримані емпіричні залежності ймовірності помилкового прийому символів повідомлення для ітеративного $(7,4,3) \times (7,4,3)$ двійкового коду зі швидкістю $R \approx 0,33$ (рис. 5), ітеративного $(15,11,3) \times (15,11,3)$ двійкового коду ($R \approx 0,54$) з м'яким декодуванням (рис. 6), ітеративного $(31,26,3) \times (31,26,3)$ двійкового коду ($R \approx 0,7$) (рис. 7).

На графіках (рис. 5-7) приведені також ймовірності помилкового прийому фазоманіпульованих сигналів (без кодування).

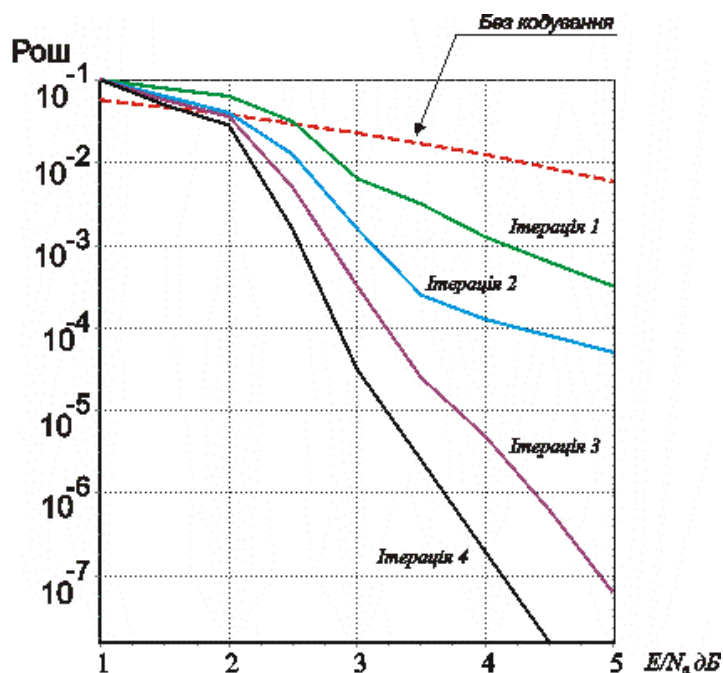


Рис. 5. Залежності вірогідності помилкового прийому символів дискретних повідомлень від співвідношення «сигнал/шум» з м'яким декодуванням ітеративного $(7,4,3) \times (7,4,3)$ двійкового коду

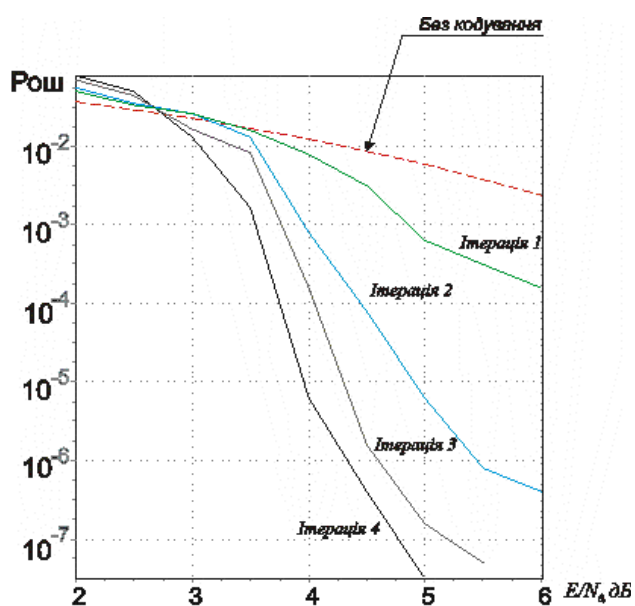


Рис. 6. Залежності вірогідності помилкового прийому символів дискретних повідомлень від співвідношення «сигнал/шум» з м'яким декодуванням $(15,11,3) \times (15,11,3)$ двійкового коду

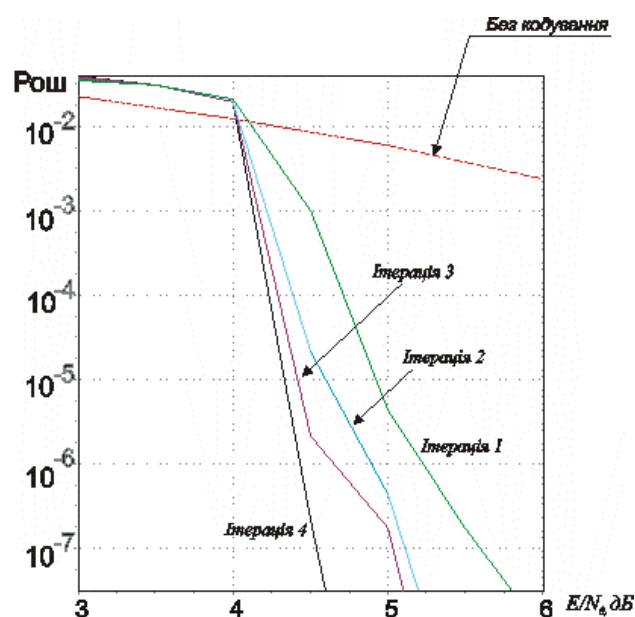


Рис. 7. Залежності вірогідності помилкового прийому символів дискретних повідомлень від співвідношення «сигнал/шум» з м'яким декодуванням $(31,26,3) \times (31,26,3)$ двійкового коду

Аналіз отриманих графіків (рис. 5-7) показує, що застосування ітеративного коду з м'яким декодуванням приводить до істотного енергетичного виграшу від

кодування. Енергетичний вигравш зростає при підвищенні якості каналу передачі даних.

Аналіз залежностей, приведених на рис. 5 – 7, показує, що при збільшенні довжини коду відбувається «зсув» крапки, з якої вдається одержати енергетичний вигравш в область високих співвідношень «сигнал/шум».

Практично це означає, що для каналів передачі даних з високою ймовірністю помилкового прийому фазоманіпульованих сигналів слід використовувати короткі коди або каскадні конструкції з короткими складеними кодами.

При підвищенні якості каналів передачі даних (із зменшенням ймовірності помилкового прийому фазоманіпульованих сигналів) слід збільшувати довжину коду, оскільки це приведе до різкого зниження вірогідності помилки на виході декодера.

Одержані емпіричні залежності сходяться з відомими результатами в області розробки та дослідження турбо-продуктивних кодів (ітеративних кодів з турбо-декодуванням).

В результаті проведених досліджень отримані результати порівняльних досліджень завадостійкості передачі дискретних повідомлень з використанням згортальних кодів, каскадних схем з кодами Ріда-Соломона і турбо-продуктивних кодів. Рекомендовані параметри ітеративних кодів для використання їх спільно з розробленим методом турбо-декодування.

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У дисертаційній роботі поставлено та розв'язано актуальне науково-технічне завдання підвищення завадостійкості передачі дискретних повідомлень, за рахунок розробки та застосування нових методів синтезу каскадних кодових конструкцій на основі РС кодів і алгеброгеометричних кодів та їх декодування на основі ітеративного обміну м'яких рішень. Головні відмінні риси зазначених методів полягають у наявності аналітичних описів внутрішньої структури кодових слів та в особливій прискореній процедурі вибору перевірочних рівнянь з найбільш достовірними символами.

Результати досліджень, представлені у роботі, дозволяють зробити наступні загальні висновки.

1. Однією з причин обмеження рівня завадостійкості передачі дискретних повідомлень в телекомунікаційних системах і мережах спеціального призначення, в т.ч. в системах управління і зв'язку на транспорті, є протиріччя між необхідністю зниження з одного боку потужності передавача, економії смуги частот, збільшення дальності зв'язку, здатності працювати при малих співвідношеннях «сигнал-шум», та необхідністю підвищення достовірності передачі інформації.
2. Використання каскадних кодових конструкцій з покращеними властивостями і методів декодування з ітеративним обміном м'якими рішеннями дозволяє

усунути виявлену суперечність та забезпечити можливість підвищення рівня завадостійкості телекомунікаційних систем.

3. Найбільш важливими науковими результатами, одержаними в дисертації, є наступні.

□ Запропоновані каскадні кодові конструкції, які відрізняються від відомих запропонованими алгебраїчними процедурами синтезу складених блокових кодів, дозволяють узагальнити каскадні конструкції, що синтезуються, на випадок недвійкових послідовностей з можливістю використання методів декодування з ітеративним обміном м'якими рішеннями.

□ Використання підмножини перевірочних рівнянь, які відповідають ненульовим елементам рядка перевірочної матриці, разом з ітеративним обміном м'яких рішень забезпечують можливість створення алгоритму прискореного турбо-декодування каскадного коду та мінімізації ймовірності помилкового приймання символу.

□ Імітаційне моделювання роботи каналу передачі дискретних повідомлень з використанням каскадних кодових конструкцій підвищеної якості та турбо-декодування з ітеративним обміном м'якими рішеннями підтвердило коректність результатів досліджень та наявність зв'язку між ймовірністю помилкового прийому символів і довжиною каскадної кодової конструкції, а саме:

□ в каналах передачі даних з високою ймовірністю помилкового прийому фазоманіпульованих сигналів необхідно використовувати каскадні кодові конструкції з короткими складеними кодами;

□ при підвищенні якості каналу передачі даних необхідно збільшити довжину коду для різкого зменшення ймовірності помилки на виході декодера.

4. Найбільш важливими практичними результатами, одержаними в дисертації, є наступні.

□ Розроблені алгоритми побудови та декодування каскадних кодових конструкцій з покращеними властивостями.

□ Розроблена структурна схема пристрою завадостійкого кодування та декодування і програмна реалізація з використанням каскадних кодів з покращеними властивостями, дані практичні рекомендації по їх практичному використанню.

□ Розроблена імітаційна модель каналу передачі дискретних повідомлень з використанням каскадних кодових конструкцій і методу декодування з ітеративним обміном м'якими рішеннями. Одержана емпірична залежності вірогідність помилкового прийому символів повідомлення від співвідношення «сигнал-шум».

□ Результати застосування розроблених у роботі алгоритмів побудови каскадних кодових конструкцій з поліпшеними властивостями, структурної схеми пристрою завадостійкого кодування для передачі даних по каналу типу AWGN дозволили зменшити ймовірність помилки декодування та отримати енергетичний виграш у 4.5 – 5.5 дБ.

5. **Достовірність отриманих результатів** підтверджується збіжністю результатів експериментальних досліджень, одержаних в ході функціонування розробленої імітаційної моделі з теоретичними даними і відомими положеннями в теорії завадостійкого кодування, зокрема з відомими результатами по дослідженню турбо-продуктивних кодів. Також достовірність отриманих результатів **обґрунтовується** їх відповідністю основним положенням алгебраїчної теорії кодів, теорії чисел, теорії полів Галуа.
6. Результати дисертаційної роботи рекомендується використовувати при проведенні науково-дослідних і проектно-конструкторських робіт щодо створення перспективних методів і засобів завадостійкого кодування. Результати досліджень будуть корисні для підготовки фахівців у вищих навчальних закладах України при вивченні навчальних дисциплін по теорії передачі даних, теорії інформації і завадостійкому кодуванню, математичним основам телекомунікаційних систем і технологій.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гусев С.А. Исследование методов построения каскадных кодовых конструкций для повышения помехоустойчивости передачи дискретных сообщений [Текст] / С.И.Приходько, С.А.Гусев, В.А.Зубенко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Київ: Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління, 2011 р. – Випуск 1 (17). – С.219-224.
2. Гусев С.А. Разработка каскадных кодовых конструкций с улучшенными свойствами [Текст] / С.И. Приходько, С.А.Гусев, В.А.Зубенко // Системи обробки інформації: зб. наук. праць Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. – Харків: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2011 р. – Випуск 2 (92). – С.119-128.
3. Гусев С.А. Мягкое декодирование каскадных кодов-произведений с использованием упорядоченных подмножеств проверочных уравнений [Текст] / А.А.Кузнецов, С.И.Приходько, С.А.Гусев, В.А.Зубенко // Системи обробки інформації: зб. наук. праць Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. – Харків: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2011 р. – Випуск 4 (94). – С. 137-145.
4. Гусев С.А. Итеративное декодирование каскадных кодовых конструкций [Текст] / А.А.Кузнецов, С.А.Гусев, В.А. Зубенко.// Системи управління, навігації та зв'язку. – Київ: Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління, 2011 р. – Випуск 2 (18). – С. 122-130.
5. Зубенко В.А. Разработка имитационной модели канала передачи дискретных сообщений с использованием каскадных кодовых конструкций [Текст] / В.И. Поддубняк, В.А.Зубенко // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць Кіровоградського національного технічного університету. – Кіровоград: КНТУ, 2012 р. – Вип. 25. Ч II. – С. 80-85.

6. Зубенко В.А. Методы кодирования и декодирования алгебраических каскадных сверточных кодов [Текст] // Матеріали двадцять третьої міжнародної науково-практичної конференції «Перспективні комп'ютерні, керуючі та телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України». – Алушта, 2010 р. – С.75-76.
7. Бутримас А.В. Принцип суперпозиции алгебраических сверточных кодов [Текст] / В.И.Поддубняк, В.А.Зубенко, А.В.Бутримас // Матеріали двадцять четвертої міжнародної науково-практичної конференції «Перспективні комп'ютерні, керуючі та телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України». – Алушта, 2011 р. – С.131-132.
8. Бутримас А.В. (УкрГАЗТ), Поддубняк В.И., Зубенко В.А. Принцип алгебраического частотного сверточного кодирования [Текст] /В.И.Поддубняк, В.А.Зубенко, А.В.Бутримас (УкрГАЗТ) // Матеріали двадцять четвертої міжнародної науково-практичної конференції «Перспективні комп'ютерні, керуючі та телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України». – Алушта, 2011 р. – С.132-133.

АНОТАЦІЯ

Зубенко В.О. Методи побудови і декодування каскадних кодових конструкцій з покращеними властивостями. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі. – Українська державна академія залізничного транспорту, Харків, 2013.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню завадостійкості передачі дискретних повідомлень в телекомунікаційних системах і мережах спеціального призначення, у т.ч. в системах управління і зв'язку на транспорті. Для досягнення цієї мети в роботі поставлено і розв'язано актуальне науково-технічне завдання, суть якого полягає в розробці нових методів побудови і декодування каскадних кодових конструкцій з покращеними властивостями. В роботі удосконалені: метод побудови каскадних кодових конструкцій; розроблений новий алгоритм декодування з ітеративним обміном м'якими рішеннями; отримав подальший розвиток математичний апарат оцінки завадостійкості передачі дискретних повідомлень на основі імітаційного моделювання.

Одержані в результаті моделювання емпіричні залежності вірогідності помилкового прийому сигналу дискретних повідомлень від співвідношення «сигнал/шум» сходяться з відомими результатами рішення аналогічних задач і дозволяють формулювати рекомендації по використанню їх в каскадних кодових конструкціях.

Ключові слова: завадостійкість передачі, дискретне повідомлення, каскадні кодові конструкції, турбо-продуктивні коди, енергетичний вииграш, декодування, ітеративний обмін м'якими рішеннями, перевірочні рівняння.

АННОТАЦИЯ

Зубенко В.А. Методы построения и декодирования каскадных кодовых конструкций с улучшенными свойствами. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 – Телекоммуникационные системы и сети. – Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 2013.

Диссертационная работа посвящена повышению помехоустойчивости передачи дискретных сообщений в телекоммуникационных системах и сетях специального назначения, в т.ч. в системах управления и связи на транспорте. Для достижения этой цели в работе поставлено и решено актуальное научно-техническое задание, суть которого состоит в разработке новых методов построения и декодирования каскадных кодовых конструкций с улучшенными свойствами. В работе усовершенствован метод построения каскадных кодовых конструкций, который отличается от известных аналитическим описанием внутренней структуры и особенностей синтеза кодовых слов. Предложены алгебраические процедуры кодирования через преобразование элементов составных кодов с учетом мощности алфавита.

Анализ методов мягкого декодирования каскадных кодовых конструкций указывает на необходимость снижения сложности их реализации и увеличения исправляющей способности кода. В диссертации предложена ускоренная процедура отбора проверочных уравнений с наиболее достоверными символами, которая позволила в процессе декодирования адаптивно учитывать достоверность принятых символов. В результате проведенных исследований усовершенствован метод мягкого декодирования и на его основе получен вычислительный алгоритм, позволяющий за конечное число шагов реализовать декодирование каскадных кодовых конструкций по критерию минимизации ошибочного приема кодовых символов.

Разработанная имитационная модель канала передачи дискретных сообщений позволила осуществить итеративную процедуру статистического тестирования принимаемой кодовой последовательности, для эмпирической оценки вероятности ошибки на бит на выходе декодера при заданной границе доверительного интервала. Полученные в результате моделирования эмпирические зависимости вероятности ошибочного приема сигнала дискретных сообщений от соотношения «сигнал/шум» сходятся с известными результатами решения аналогичных задач и позволяют формулировать рекомендации по использованию их в каскадных кодовых конструкциях.

Проведенные, с использованием разработанной имитационной модели, экспериментальные исследования эффективности каскадных кодовых конструкций показали, что практическое применение разработанного метода декодирования с итеративным обменом мягкими решениями позволяет обеспечить высокие показатели помехоустойчивости передачи дискретных сообщений.

Ключевые слова: помехоустойчивость передачи, дискретное сообщение, каскадная кодовая конструкция, турбо-продуктивный код, энергетический выигрыш, декодирование, итеративный обмен мягкими решениями, проверочные уравнения.

ABSTRACT

Zubenko V.O. Methods of construction and decoding of cascade codes constructions with the improved properties. – Manuscript.

Thesis for a Candidate of Technical Science Degree in specialty 05.12.02 – Telecommunication systems and network. – Ukrainian State Academy of Rail Transport, Kharkiv, 2013.

The dissertation deals with the increase of interference immunity of the discrete messages passing in the telecommunications systems and networks of the special setting, as well as in the control and connection systems on transport. To achieve this purpose and solved the actual scientific and technical task was put. The task essence is to develop new methods of construction and decoding of cascade codes constructions with the improved properties. The development of mathematical apparatus of interference immunity estimation of discrete messages passing on the imitation design basic has got further development.

The empiric dependences of probability of error reception of discrete messages signal to the correlation of «signal/noise» are received. They correlate with the known results of similar tasks and allow to formulate the recommendations on their use in cascade code constructions.

Key words: interference immunity, discrete message, cascade codes constructions, turbo-productive codes, energy advantage, decoding, iterative exchange by the soft solutions, check equation.

ЗУБЕНКО ВАЛЕНТИНА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 621.391

**МЕТОДИ ПОБУДОВИ І ДЕКОДУВАННЯ КАСКАДНИХ КОДОВИХ
КОНСТРУКЦІЙ З ПОКРАЩЕНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Підписано до друку 28.11.12. Формат 60x84 1/16. Папір офсетний.
Надруковано на різнографі. Умов. Друк. арк..0,9
Зам № 400/2010. Тираж 100 прим.

ЦЕНТР ОПЕРАТИВНОЇ ПОЛІГРАФІЇ «АВАНГАРД»



м. Кіровоград, вул. Пашутінська, 12, оф. 4.

Тел./факс: 24-86-34, 27-02-24,

моб. /050/ 531-73-72, 341-04-33.

<http://avangard.kr.ua>, e-mail: info@avangard.kr.ua