

# ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИСОКОДОСТОВІРНИХ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

Вінницький національний технічний університет

## Анотація

*Дослідження методів і алгоритмів підвищення ефективності та дослідження багатопорогових декодерів самоортогональних кодів у високошвидкісних системах передачі цифрової інформації, що дозволяють забезпечувати і оцінювати ймовірності помилки декодування близько  $10^{-11}$ .*

**Ключові слова:** багатопороговий декодер, самоортогональний код, декодування, паралельне каскадування, завадостійке кодування.

## Abstract

*Research of methods and algorithms for increasing the efficiency and studying of multi-threshold decoders of self-orthogonal codes in high-speed digital information transfer systems, which allows to provide and estimate the probability of decomposition errors of about  $10^{-11}$ .*

**Keywords:** multi-threshold decoder, self-orthogonal code, decoding, parallel cascading, noise immunity encoding.

## Вступ

Однією з основних проблем, з якою стикаються при розробці систем передачі і зберігання інформації, є проблема забезпечення безпомилковості передачі інформації по каналам з шумом. Для вирішення даної проблеми зазвичай застосовуються методи завадостійкого кодування, в розробці яких в останні десятиліття з'явилися значні успіхи. Одними з найбільш ефективних алгоритмів з точки зору співвідношення ефективності та складності реалізації є багатопорогові декодери (БПД) самоортогональних кодів (СОК), які всього лише з лінійною обчислювальною складністю забезпечують близьке до оптимального декодування навіть дуже довгих кодів. Матеріали більше двохсот наукових робіт в області багатопорогового декодування дозволяють вважати, що БПД для багатьох сучасних високошвидкісних систем передачі інформації забезпечують гранично можливий рівень енергетичного виграшу і володіють дуже високою швидкістю. Разом з тим перед практичним використанням БПД в конкретних умовах, зокрема в системах цифрового телебачення, при необхідності отримання найкращих ймовірно-енергетичних характеристик потрібно виконати величезний обсяг робіт.

код. Даний код повинен зумовлювати ефект розмноження помилок, який проявляється в тому, що при здійсненні декодером першої помилки ймовірність появи наступних помилок істотно зростає. Це значно погіршує характеристики ітеративної схеми декодування, до якої відноситься БПД. Відзначимо, що при побудові «хорошого» в плані стійкості до розмноження помилок самоортогонального коду необхідно виконати ряд оптимізаційних процедур, зокрема вибрати найкращу структуру коду з паралельним каскадування. При цьому потрібне проведення комп'ютерного моделювання величезного обсягу, на виконання якого можуть знадобитися тижні роботи звичайного персонального комп'ютера.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає в дослідженні методів і алгоритмів підвищення ефективності та дослідження багатопорогових декодерів самоортогональних кодів в високошвидкісних системах передачі цифрової інформації, що дозволяють забезпечувати і оцінювати ймовірності помилки декодування близько  $10^{-11}$  і менше.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- дослідити схему кодування, засновану на самоортогональних кодах, що дозволяє зменшити ймовірність помилки декодування в області субоптимальної роботи декодерів самоортогональних кодів;
- дослідити методи імітаційно-аналітичної оцінки ефективності БПД, що забезпечують оцінку низьких цільових ймовірностей помилки з кращого в порівнянні з відомими аналітичними методами точністю;
- розробити методику застосування багатопорогових декодерів в системах з адаптивним кодуванням;
- дослідити моделі цифрової системи передачі інформації з багатопороговим декодером, що використовує ресурси центрального і графічного процесорів.

## Результати дослідження

Незважаючи на досягнення в теорії завадостійкого кодування, дана область як і раніше залишає ряд невирішених завдань. В першу чергу ці завдання пов'язані з проблемою високої складності методів, що забезпечують необхідні значення критерію енергетичного виграшу кодування (ЕВК), і з проблемою малої ефективності по ЕВК методів з прийнятною складністю. Так, методи, які дозволяють досягти відношення сигнал-шум, всього лише на кілька десятих дБ який перевищує рівень  $R = C$ , мають абсолютно неприпустимі характеристики по складності реалізації, що ускладнює їх використання в сучасних системах передачі інформації, які націлені на передачу Тбіт даних зі швидкостями до сотень Гбіт / с. Це стосується не тільки систем цифрового супутникового телебачення (ЦСТ). Так, наприклад, для супутникового зв'язку вимоги до швидкості передачі даних можуть досягати 0.4-0.5 Мбіт / с, вимоги до кількості помилок розрізняються залежно від процесу - прийом або передача. При прийомі можлива не більше одного помилкового біта на  $10^{10}$  прийнятих, при передачі допустимо не більше одного некоректного біта на  $10^7$  переданих біт [1]. Як вже говорилося, стандарт ЦСТ DVB-S2X [1] і стандарт ЦСТ ISDB-Tmm [1] висувають вимоги до ймовірності появи помилки BER (Bit Error Rate)  $10^{-12}$ ..  $10^{-14}$ , а до швидкості передачі декілька Гбіт / с . У стандартах DVB-S, DVB-S2 для забезпечення майже безпомилкової передачі (Quasi Error Free) потрібно забезпечити ймовірність помилки близько  $10^{-11}$ . При використанні оптичного носія CD допускається не більше однієї помилки на  $10^9$  біт при тому, що швидкість передачі інформації може досягати 7.8 Мбайт / с [1]. Для DVD носіїв при тих же показниках помилки, що і у CD швидкість, передачі даних може досягати 21.6 Мбайт / с. Для флеш-пам'яті (SSD накопичувачі) профільний комітет організації JEDEC (Joint Electron Device Engineering Council) затвердив стандарт по середній ймовірності появи помилки в  $10^{-12}$ - $10^{-15}$  [1]. А швидкість читання може досягати 600 Мбайт / с. Вимоги до оптичних ліній зв'язку (ОЛЗ) пред'являються ще більш високі. Так, швидкість передачі даних в ОЛЗ може досягати 2 Тбайт / с. І така швидкість передачі необхідна при середній ймовірності появи помилки не більше  $10^{-17}$ .

При цьому велика частина навантаження по забезпеченню необхідної достовірності передаваної інформації лягає саме на алгоритм завадостійкого кодування, а точніше на декодер. Це пов'язано з тим, що фізичний канал часто видає дані з ймовірністю появи помилки значно вище цільової. Так, CD-ROM зчитує інформацію з CD диска з ймовірністю появи помилок близько  $10^{-3}$ . І зменшення цього показника за рахунок поліпшення характеристик CD-ROM вкрай важко, так як це призведе до ускладнення апаратної частини, що негайно викличе подорожчання пристрою, а це поставить під сумнів економічну доцільність використання обраного виду передачі або зберігання інформації. Якщо ж спробувати заощадити при виробництві, то це може привести до масового бракування вироблених пристроїв, що також зменшить їх конкурентоспроможність. Такі ж проблеми присутні і в системах ЦСТ.

Слід ще раз відзначити, що вимоги по швидкості і достовірності передачі інформації з кожним роком істотно зростають. В результаті застосування алгоритмів корекції помилок може виявитися проблематичним через високу складності декодера, який не встигатиме справлятися з обробкою високошвидкісного потоку інформації. Це призводить до необхідності пошуку нових методів корекції

помилки, які при високій ефективності декодування матимуть низьку складність реалізації. До таких методів можна віднести багатопороговий декодер [2], що розглядається далі.

Після побудови коду необхідно налаштувати параметри декодера, для чого знову виконується процедура оптимізації, в процесі якої налаштовуються десятки, а в деяких випадках навіть сотні параметрів БПД. Це також досить витратна з обчислювальної точки зору операція.

На заключному етапі необхідно переконатися, що розроблений БПД відповідає поставленим вимогам, оцінивши його ймовірностно-енергетичні характеристики. У разі якщо цільова ймовірність помилки на біт є не дуже малою (до  $10^{-10}$ ), то подібна оцінка легко виконується за допомогою комп'ютерного моделювання за кілька годин роботи персонального комп'ютера. Відзначимо, що відомі аналітичні оцінки ефективності БПД є сильно заниженими при великому рівні шуму і слабо підходять для цієї мети. У разі ж якщо цільова ймовірність помилки, як в сучасних і перспективних системах цифрового телебачення, дуже мала ( $10^{-11}$  і менше), то процес отримання подібних оцінок з прийнятною точністю може затягнутися на тижні, місяці і навіть роки роботи комп'ютера. Все це робить завдання зменшення часу отримання оцінок ефективності БПД актуальною. Дану задачу можна вирішувати як за рахунок збільшення швидкості роботи комп'ютерних моделей БПД, так і за рахунок розробки більш ефективних аналітичних методів оцінки його характеристик. Дані завдання будуть вирішуватися в рамках магістерської роботи.

Крім цього, в ряді систем передачі різного роду інформації, особливо в системах цифрового телебачення, для підвищення ефективності використання каналу зв'язку часто застосовуються так зване адаптивне кодування і модуляція, коли в залежності від стану каналу використовуються код з однієї чи іншої кодової швидкістю і модуляція більшого або меншого порядку. Для БПД питання його застосування в подібних схемах раніше не вирішувалися. Ще одна складність застосування самоортогональних кодів в подібних системах пов'язана з тим, що на практиці вони володіють не дуже великою кодовою відстанню, тому для них характерна наявність так званої області насичення ймовірності помилки. Це ускладнює завдання отримання дуже малих ймовірностей помилки, необхідних в сучасних системах цифрової передачі інформації. Отже, актуальною також є необхідність зменшення ймовірності помилки при використанні самоортогональних кодів в області їх субоптимального декодування.

За останні роки було розроблено велику кількість завадостійких кодів і алгоритмів їх декодування. Однак лише деяким з них вдалося наблизитися до головної мети - забезпечення роботи поблизу пропускну здатності каналу. Серед таких кодів можна виділити турбо- і турбоподібні коди, коди з низькою щільністю (LDPC), полярні коди [2]. Варто відзначити, що навіть самі останні варіанти цих методів мають відносно високу обчислювальну складність, що значно ускладнює їх практичне застосування в високошвидкісних системах передачі інформації, до яких відносяться і системи цифрового телебачення. У зв'язку з цим виникає завдання пошуку більш простих і більш надійних при практичній реалізації методів кодування / декодування.

У процесі вирішення даного завдання дослідники також стикаються з проблемою отримання оцінок ефективності розроблюваних ними методів за мінімальний час. У разі великої обчислювальної складності алгоритму декодування або необхідності проведення великого обсягу експерименту традиційно найбільш складні вузли моделі системи передачі інформації (кодер, декодер) реалізовувалися на інтегральних схемах спеціального призначення (ASIC) або на програмованих логічних інтегральних схемах (ПЛІС), що забезпечують високу швидкодію. Але даний підхід, по-перше, вимагає проведення великого обсягу робіт по реалізації цих вузлів на інтегральних схемах і, по-друге, погано підходить в разі, коли в процесі дослідження потрібно змінювати алгоритм роботи вузла, наприклад декодера. У цих випадках доцільно реалізувати модель у вигляді програми для ЕОМ, але при цьому потрібно забезпечити необхідну швидкодію. Останнім часом для цього стали використовувати обчислювальні можливості графічних процесорів (GPU), які оснащуються тисячами ядер. У цій області відомі роботи таких зарубіжних спеціалістів, як J.R. Cavallaro, L. Sousa, G. Wang, G. Falcao, S. Kang. Разом з тим в процесі реалізації моделі системи передачі інформації з використанням GPU для отримання максимальної продуктивності завжди потрібно вирішувати завдання, пов'язані з необхідністю враховувати специфіку, яка визначається складовими елементами моделі, особливо кодером і декодером. Для БПД подібні завдання раніше не вирішувалися.

В ряді систем передачі різного роду інформації, особливо в системах цифрового телебачення, для підвищення ефективності використання каналу зв'язку часто застосовуються так зване адаптивне кодування і модуляція, коли в залежності від стану каналу використовуються код з однієї чи іншої кодової швидкістю і модуляція більшого або меншого порядку. Для БПД питання його застосування в подібних схемах раніше не вирішувалися. Ще одна складність застосування самоортогональних кодів в подібних системах пов'язана з тим, що вони мають не дуже велику кодовою відстань і, отже, для них характерна наявність так званої області насичення ймовірності помилки. Це ускладнює завдання отримання дуже малих ймовірностей помилки, необхідних в сучасних системах цифрової передачі інформації. Отже, актуальною також є необхідність зменшення ймовірності помилки при використанні самоортогональних кодів в області їх субоптимального декодування.

### **Висновки**

У роботі наголошено на необхідності застосування завадостійкого кодування при забезпеченні високих енергетичних характеристик сучасних систем цифрової передачі інформації, наведена і детально описана структурна схема системи передачі цифрової інформації, представлені існуючі підходи до класифікації перешкодостійких кодів і виділені їх основні параметри і характеристики.

Проведено аналіз сучасних методів корекції помилок, що застосовуються в сучасних системах цифрового телебачення, виявлені основні проблеми їх застосування. Показано, що одним з найкращих щодо ефективності та складності є багатопороговий декодер самоортогональних кодів, який може бути використаний в перспективних системах цифрового телебачення. Виявлено які основні виникають при цьому проблеми і сформульовані напрямки їх вирішення.

### **Список літератури**

- 1.Егоров С.И. Коррекция ошибок в спутниковых каналах цифрового телевидения по стандартам DVB-S и DVB-DSNG / С.И.Егоров, В.С.Титов // Телекоммуникации. – 2013. - №2. - С.30-36.
2. Золотарёв В.В. Повышение надежности передачи и хранения данных с использованием многопороговых методов декодирования помехоустойчивых кодов / В.В. Золотарёв, Г.В. Овечкин // Цифровая обработка сигналов. – 2012, №1. – С.16–21.

***Васильківський Микола Володимирович*** - доцент кафедри телекомунікаційних систем і телебачення, вінницький національний технічний університет

***Кульчиковський Костянтин Вікторович*** – студент групи ТКс-17мі, факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем.

***Vasykivskiy Mikola Volodymyrovych*** - Associate Professor of the Department of Telecommunication Systems and Television, Vinnytsia National Technical University

***Kulchykovskiy Konstantyn Viktorovich*** - student of the group TKs-17mi, faculty of infocommunications, radio electronics and nanosystems.