

УДК 621.396.96

МОЖЛИВОСТІ АДАПТИВНОГО БАГАТОПОРОВОГО ДЕКОДУВАННЯ  
САМООРТОГОНАЛЬНИХ КОДІВ

БОЙКО Ю.М.

*Хмельницький національний університет,  
11, вул. Інститутська, м. Хмельницький, 29016, Україна  
boiko\_julius@ukr.net*

POSSIBILITIES OF ADAPTIVE MULTI-THRESHOLD DECODING  
OF SELF-ORTHOGONAL CODES

JULIUS BOIKO

*Khmelnytsky National University,  
11 Instytutska Str., Khmelnytsky, 29016, Ukraine  
boiko\_julius@ukr.net*

ВОЗМОЖНОСТИ АДАПТИВНОГО МУЛЬТИПОРОВОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ  
САМООРТОГОНАЛЬНИХ КОДОВ

БОЙКО Ю.Н.

*Хмельницький національний університет,  
11, ул. Институтская, г. Хмельницький, 29016, Украина  
boiko\_julius@ukr.net*

**Анотація.** В статті наведено опис методології адаптивного багатопорогового декодування самоортогональних кодів у телекомунікаційних каналах передачі інформації. Систематизовано вимоги щодо необхідної конфігурації форми сигнально-кодових конструкцій для різних стандартів передачі інформації. З'ясовано вимоги до синтезу алгоритмів мажоритарного декодування в умовах підвищення швидкості обробки інформації в телекомунікаційних каналах та необхідності мінімізації обчислювальної складності при задовільній якості декодування. Розглянуто схематехнічні особливості реалізації адаптивних багатопорогових декодерів. Описано методику модифікації багатопорогового декодера на основі адаптивних алгоритмів фільтрації. Досліджено принципи застосування адаптивних алгоритмів для забезпечення необхідної достовірності передачі інформації, у випадку багатопорогового декодування. Запропоновано механізм адаптивного декодування згорткових та блокових самоортогональних кодів який ґрунтується на модифікації схеми декодера з метою забезпечення необхідної достовірності передачі інформації при мінімальній надлишковості завадостійкого коду в умовах завад та шумів. Представлено результати математичного моделювання предметної області у випадку зміни кількості ітерації при декодуванні. Визначено збіжність адаптивних алгоритмів для реалізації адаптивних декодерів. Наведено результати вимірювання енергетичного виграшу кодування від застосування в телекомунікаційних каналах з фазовою маніпуляцією адаптивних багатопорогових декодерів. З'ясований вплив залежності ймовірності спотворення символів від середньої ймовірності помилки на символ після декодування на завадостійкість багатопорогових декодерів коротких і довгих блокових та згорткових самоортогональних кодів. Дані рекомендації щодо впливу зміни швидкості, кодової відстані та довжини сигнально-кодової конструкції на завадостійкість адаптивного багатопорогового декодера блокових та згорткових самоортогональних кодів в телекомунікаційних каналах з фазовою маніпуляцією.

**Ключові слова:** телекомунікаційні технології, декодер, сигнально-кодова конструкція, адаптивне декодування.

**Abstract.** The article describes the methodology of adaptive multi-threshold decoding of self-orthogonal codes in telecommunication information transmission channels. The requirements for the necessary configuration of the form signal-code constructions for various information transmission standards are systematized. The requirements for the synthesis of majority decoding algorithms are determined under conditions of increasing the speed of information processing in telecommunication channels and the need to minimize the computational complexity with satisfactory decoding quality. The circuit design features of the implementation of adaptive multi-threshold decoders are considered. A method for modifying a multi-threshold decoder based on adaptive filtering algorithms is described. The principles of application of adaptive algorithms to ensure the necessary reliability of information transmission in the case of multi-

*threshold decoding are investigated. A mechanism for adaptive decoding of convolutional and block self-orthogonal codes is proposed based on the modification of the decoder circuit in order to ensure the required reliability of information transmission with minimal redundancy of the error-correcting code in terms of noise. The results of mathematical modeling of the domain in the case of a change in the number of iterations during decoding are presented. The conditions for convergence of adaptive algorithms for the implementation of adaptive decoders are determined. The results of measuring the energy gain of coding from the use in telecommunication channels with phase shift keying of adaptive multi-threshold decoders are given. The results of the influence of the dependence of the probability symbol distortion for the average probability of an error per symbol after decoding on the noise immunity of multi-threshold decoders short and long block and convolutional self-orthogonal codes are clarified. Recommendations on the effects of changes in the speed, code distance and length of the signal-code constructions on the noise immunity of an adaptive multi-threshold decoder block and convolutional self-orthogonal codes in telecommunication channels with phase shift keying modulation are given..*

**Keywords:** telecommunication technology, decoder, signal-code constructions, adaptive decoding.

**Аннотація.** В статті приведено опис методології адаптивного мультипорогового декодування самоортогональних кодів в телекомунікаційних каналах передачі інформації. Систематизовані вимоги до необхідної конфігурації форми сигнально-кодівих конструкцій для різних стандартів передачі інформації. Визначені вимоги до синтезу алгоритмів мажоритарного декодування в умовах підвищення швидкості обробки інформації в телекомунікаційних каналах і необхідності мінімізації вичислительної складності при задовільному якості декодування. Розглянуті схематехнічні особливості реалізації адаптивних мультипорогових декодерів. Описана методика модифікації мультипорогового декодера на основі адаптивних алгоритмів фільтрації. Вивчені принципи застосування адаптивних алгоритмів для забезпечення необхідної достовірності передачі інформації в разі мультипорогового декодування. Представлено механізм адаптивного декодування сверточних і блочних самоортогональних кодів, заснований на модифікації схеми декодера з метою забезпечення необхідної достовірності передачі інформації при мінімальній надлишковості помехостійкого коду в умовах шумів і завад. Представлено результати математичного моделювання предметної області в разі зміни кількості ітерацій при декодуванні. Визначено умови збіжності адаптивних алгоритмів для реалізації адаптивних декодерів. Приведено результати вимірювання енергетичного виграшу кодування при застосуванні в телекомунікаційних каналах з фазовою маніпуляцією адаптивних мультипорогових декодерів. Уточнено результати впливу залежності ймовірності спотворення символів для середньої ймовірності помилки на символ після декодування на помехостійкість мультипорогових декодерів коротких і довгих блочних і сверточних самоортогональних кодів. Дані рекомендації по впливу зміни швидкості, кодового відстані і довжини сигнально-кодівих конструкцій на помехостійкість адаптивного мультипорогового декодера блочних і сверточних самоортогональних кодів в телекомунікаційних каналах з фазовою маніпуляцією.

**Ключевые слова:** телекоммуникационные технологии, декодер, сигнально-кодированная конструкция, адаптивное декодирование.

## ВСТУП

Завадостійке кодування є невід'ємною частиною сучасних цифрових телекомунікаційних систем передавання інформації. Необхідна якість дискретної інформації яка передається по телекомунікаційним каналам забезпечується за рахунок корекції помилок, які виникають в каналах зв'язку[1].

Теорія кодування є прикладною наукою. Вона інтегрована в завдання, які вирішують, зокрема і засоби телекомунікацій, радіолокації, вимірювальної, обчислювальної та керувальної техніки. В цьому випадку важливе значення має факт можливості застосування отриманих результатів, їх конкурентоспроможність у порівнянні з некодованими методами захисту від помилок. Практичні досягнення теорії кодування зараз добре відомі [2–6]. Однак найбільш широке застосування на сучасному етапі розвитку телекомунікаційних технологій отримали такі способи кодування, як перевірка на парність (LDPC), коди Хеммінга, циклічні перевірки для виявлення помилок, згорткові коди, турбокоди і т. п. Розвиток телекомунікаційних стандартів і технологій зв'язку, таких як 4G (LTE), 5G, IEEE 802.3an (10G Ethernet), IEEE 802.15.3c, IEEE 802.11n (Wi-Fi), IEEE 802.16e (WiMAX), систем супутникового зв'язку та передавання даних, телеметрії, систем цифрового телебачення форматів DVB-S,

DVB-S2X, ISDB-Tmm, DVB-T2 та інші, спонукає дослідників до необхідності пошуку методів кодування/декодування, здатних функціонувати на швидкостях які досягають десятків ГГц при одночасному забезпеченні необхідного рівня завадостійкості [3]. Огляд літературних джерел дозволяє констатувати, що багатопорогові декодери самоортогональних кодів є достатньо ефективним засобом вирішення завдань підвищення якості та швидкості декодування [3–6].

### ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАДАЧІ

Необхідність вирішення негайних завдань теорії та практики використання завадостійких кодів у засобах телекомунікацій утворює важливу науково-технічну задачу, яка полягає у пошуку методів мінімізації розмноження помилок у випадку багатопорогового декодування, локалізації пакетних помилок та синтезі кодів з ефектом мінімального розмноження помилок, які забезпечують високу якість передавання інформації у телеметричних та телекомунікаційних каналах передавання інформації, що становить сутність задачі, яка розв'язується в статті.

Слід зазначити, що переважна частина задачі по забезпеченню необхідної достовірності переданої інформації покладається саме на алгоритм завадостійкого кодування, а точніше на декодер.

Систематизовані вимоги щодо необхідної конфігурації СКК для різних стандартів передавання інформації зведено в таблицю 1.

Таблиця 1 – Параметри СКК деяких телекомунікаційних систем

Тип телекомунікаційної системи/формат	Тип коду	Кодова швидкість	Довжина коду
Супутниковий зв'язок	ЗК+РС	1/2, 1/3, 3/4	(255, 223)
Стандарт UMTS/LTE	ТК	1/2	640–65536
DVB-S2X	LDPC+БЧХ	1/5, 11/45, 1/3, 14/45, 7/15, 8/15	3070–16200
DVB-S2	LDPC+БЧХ	1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9, 9/10	64800
DVB-S	ЗК+РС	1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 8/9, 9/10	1600
DVB-RCS	ТК	1/2, 1/4, 1/3, 2/5, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9, 9/10	1600
ISDN-Tmm	ЗК+РС	1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8	1504, 1632

**Примітка.** СКК – сигнально-кодова конструкція, ЗК – згортковий код, РС – код Ріда-Соломона, LDPC – код з малою щільністю перевірок на парність, БЧХ – код Боуза-Чоудхури-Хоквінгема, ТК – турбокод

Однак застосування алгоритмів корекції помилок може виявитися проблематичним через високу складність декодера, який не встигатиме справлятися з обробленням високошвидкісного потоку інформації. Саме ці обставини і спонукають до пошуку нових методів корекції помилок, які при високій ефективності декодування матимуть низьку складність реалізації.

Серед кодів, що допускають порогове декодування, найпростішими є так звані самоортогональні коди. Усі самоортогональні коди допускають повну ортогональність, тобто за допомогою мажоритарного декодування можуть бути виправлені всі помилки, виправлення яких гарантується мінімальною кодовою відстанню.

В статті описано методику модифікації багатопорогового декодера на основі адаптивних алгоритмів фільтрації, досліджено принципи застосування адаптивних алгоритмів для забезпечення необхідної достовірності передавання інформації у випадку багатопорогового декодування.

## 1 ОПИС ДОСЛІДЖЕНЬ

Використаємо згортковий самоортогональний код, який застосовується у телекомунікаційному каналі для передавання  $k$  повідомлень з двійкових символів. Після кодування загальна кількість символів буде дорівнювати  $n$  ( $n > k$ ). Нехай внаслідок передавання цієї інформації у каналі з фазовою маніпуляцією (двійковий симетричний канал), декодер внаслідок наявності шумів і завад отримає замість кодового слова  $\bar{C}_0$ , спотворене шумами повідомлення  $\bar{Y}$  довжиною  $n$ . Обчислюємо синдром  $\bar{S} = \bar{Y}H^T$  прийнятого з повідомлення і для кожного інформаційного символу  $i_j$ ,  $1 \leq j \leq k$  виділимо множину  $\{S_{jk}\}$  елементів синдрому з номерами  $\{j_k\}$ , які будуть перевірки відносно символу  $u_j$ . Нехай ця множина містить в якості доданку помилку  $e_j$  в кожному символі. Схему декодера представимо на рисунку 1. Введемо додатково двійковий вектор  $\bar{D}$  довжиною  $k$  який буде різницеvim. В початковому стані прийемо його значення рівним нулю. Будемо в цьому регістрі відмічати зміни інформаційних символів з метою запам'ятовування декодером прийнятого з каналу повідомлення і обчислення в необхідний момент різниці між прийнятим повідомленням і кодовим словом яке розташоване в інформаційному регістрі.

Алгоритм декодування проводимо шляхом обчислення для довільно взятого символу  $u_j$  функції правдоподібності  $L_j$  яка, загалом, має бути залежна від перевірок  $S_{jk}$  символу та  $j$ -го елемента вектору  $\bar{D}$ :

$$L_j = \sum_{\{j_k\}} S_{jk} + d_j. \quad (1)$$

Загальна кількість доданків у формулі (1) повинна бути рівна кодовій відстані  $d$ . У випадку коли  $L_j > T$  ( $T = (d-1)/2$  – порогове значення), символ  $u_j$ , перевірки  $\{S_{jk}\}$  і символ  $d_j$  інвертуються і далі вибирається інший символ  $u_m$  ( $m \neq j$ ). Для цього символу аналогічно обчислюємо суму  $L_m$  і т. п. Якщо  $L_j \leq T$  то відразу виконуємо перехід до чергового символу  $u_m$ . Встановимо умову: виконання основного кроку декодування всіх  $k$  інформаційних символів повідомлення може супроводжуватись їх багатократним перебором в довільному порядку.

Значення порогу пропонується проводити адаптивно, а саме на перших ітераціях декодування збільшувати величину порогу. В цьому випадку пороговий елемент на перших ітераціях буде вносити меншу кількість власних помилок в повідомлення яке передається наступним ітераціям. Такий підхід, як показали дослідження представлені нижче, дозволяє значно підвищити загальну ефективність схеми декодера (рисунок 1).

Для дослідження використані коди з мінімальною кодовою відстанню  $d$ , від 3 до 17. Формували коди із швидкостями  $1/2, 2/3, 1/3, 4/6, 4/7, 4/8, 4/9, 4/10, 4/11, 4/12$  довжиною до 100000 біт.

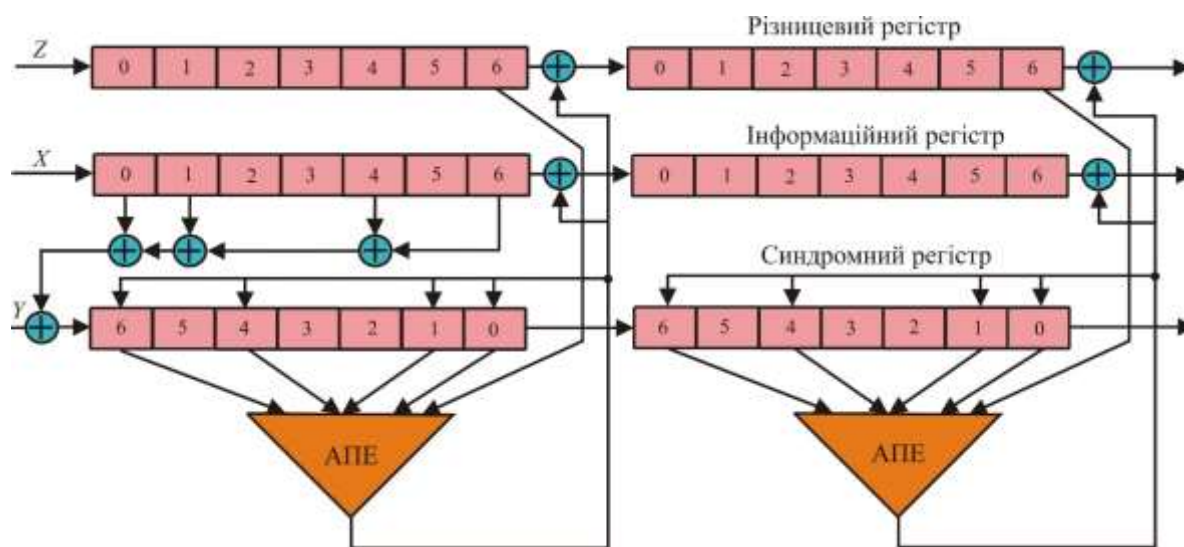


Рисунок 1 – Схема багатопорогового декодера самоортогональних згорткових кодів:  $d = 5, R = 1/2, n_A = 13$ , дві ітерації

Для досягнення оптимального рішення (рисунок 2, крива 5:  $R = 1/2, d = 9; q = 256$ ), багатопороговий декодер здійснював  $5 \div 15$  ітерацій декодування прийнятого повідомлення. На рисунках 2 та 3 використано криві завадостійкості для кодів РС з аналогічними параметрами, які досить поширені в телекомунікаційних каналах [7–10]. Результати моделювання вказують на те, що багатопороговий декодер забезпечує кращі характеристики в порівнянні з РС-кодами. Така картина явно проглядається за невеликих значень  $q$ , завдяки більшій довжині  $n$  використаних кодів і достатньо задовільній збіжності рішень багатопорогового декодера до рішень оптимального декодера (на рисунках 2 та 3 крива оптимального рішення умовно непоказана).

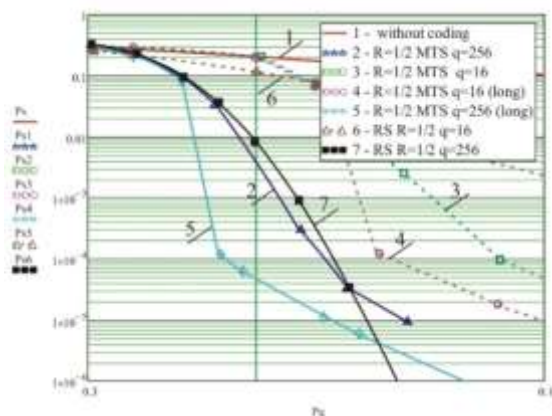


Рисунок 2 – Графіки завадостійкості багатопорогового декодера для коротких і довгих блокових самоортогональних кодів:  $q$  – кількість рівнів квантування виходу демодулятора;  $R$  – швидкість кодування ( $1/2$ ); MTS (multi-threshold schemes) – багатопорогова схема декодування; RS – код Ріда-Соломона

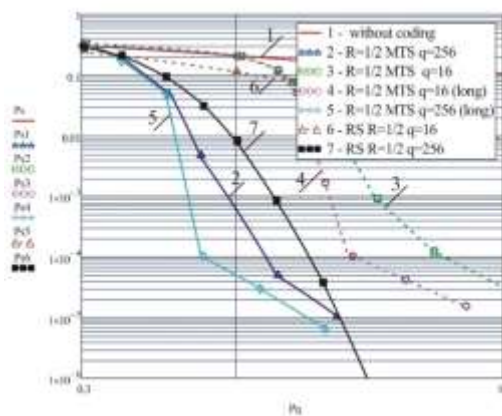


Рисунок 3 – Графіки завадостійкості багатопорогового декодера для коротких і довгих згорткових самоортогональних кодів:  $q$  – кількість рівнів квантування виходу демодулятора;  $R$  – швидкість кодування ( $1/2$ ); MTS (multi-threshold schemes) – багатопорогова схема декодування; RS – код Ріда-Соломона

Графіки побудовано в координатах, як залежність ймовірності спотворення символу  $P_q$  від середньої ймовірності помилки на символ  $P_s$  після декодування.

Механізм адаптивного декодування загалом ґрунтується на тому, що багатопороговий декодер містить сукупність інформаційних та перевірочних гілок, а отже дозволяє керувати надлишковістю шляхом підключення або виключення перевірочних гілок. Тоді процес адаптації зводили до оцінювання приймачем відношення сигнал/шум в телекомунікаційному каналі та адаптивному виборі на основі такої оцінки з певної множини коду, який би володів максимальною кодовою швидкістю і забезпечував задану достовірність. Наявність в каналі значного рівня шуму буде спричиняти необхідність застосування потужного коду з більшою кількістю ітерацій декодування і навпаки, низький рівень шумів буде спричиняти необхідність використання менш потужного коду та меншу кількість ітерацій декодування. Таким чином, запропонований алгоритм дає можливість адаптивно змінювати параметри кодеру та декодера під стан телекомунікаційного каналу враховуючи інтенсивність завад. Для проведення такої адаптації, використовували алгоритми адаптації (RLS – Recursive Least Square) з метою визначення відношення сигнал/шум в телекомунікаційному каналі зв'язку.

Нехай вхідний дискретний випадковий сигнал  $x(t)$  обробляється нерекурсивним дискретним фільтром порядку  $N$ , коефіцієнти якого можуть бути представлені вектор-стовпцем  $\mathbf{w} = [w_0, w_1, \dots, w_N]^T$ . Вихідний сигнал фільтра буде рівним:

$$y(k) = \mathbf{u}^T(k) \mathbf{w}, \quad (2)$$

де  $\mathbf{u}(k) = [x(k), x(k-1), \dots, x(k-N)]^T$  – вектор-стовпець вмісту лінії затримки фільтра на  $k$ -му кроці. Крім того, є зразковим (також випадковий) сигнал  $d(k)$ . Помилка відтворення зразкового сигналу дорівнює:

$$e(k) = d(k) - y(k) = d(k) - \mathbf{u}^T(k) \mathbf{w}. \quad (3)$$

Необхідно знайти такі коефіцієнти фільтра  $\mathbf{w}$ , які забезпечують максимальну близькість вихідного сигналу фільтра до зразкового, тобто мінімізують помилку  $e(k)$ . Оскільки  $e(k)$  також є випадковим процесом, в якості міри її величини розумно прийняти середній квадрат. Таким чином, оптимізуючий функціонал виглядає так:  $J(\mathbf{w}) = \overline{e^2(k)} \rightarrow \min$ .

В роботі використано підхід до формування алгоритму адаптивної обробки, коли в процесі приймання сигналу на кожному черговому кроці перераховують коефіцієнти фільтра безпосередньо за формулою (2), проте це пов'язано з невиправдано великими обчислювальними витратами.

$$\mathbf{w} = (\mathbf{U}\mathbf{U}^T)^{-1} \mathbf{U}\mathbf{d}. \quad (4)$$

Дійсно, розмір матриці  $\mathbf{U}$  постійно збільшується і, крім того, необхідно кожен раз заново обчислювати зворотну матрицю  $(\mathbf{U}\mathbf{U}^T)^{-1}$ . Скоротити обчислювальні витрати можна, якщо зауважити, що на кожному кроці до матриці  $\mathbf{U}$  додається лише один новий стовпець, а до вектору  $\mathbf{d}$  – один новий елемент. Це дає можливість організувати обчислення рекурсивно.

При використанні алгоритму RLS проводиться рекурсивне оновлення оцінки зворотної кореляційної матриці  $\mathbf{P}(\mathbf{U}\mathbf{U}^T)^{-1}$ , а висновок формул ґрунтується на наступній матричній тождності:

$$(\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{C}\mathbf{D})^{-1} = \mathbf{A}^{-1} - \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}(\mathbf{C}^{-1} + \mathbf{D}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B})\mathbf{D}\mathbf{A}^{-1}, \quad (5)$$

де  $\mathbf{A}$  і  $\mathbf{C}$  – квадратні невідроджені матриці (необов'язково однакових розмірів), а  $\mathbf{B}$  і  $\mathbf{D}$  – матриці сумісних розмірів.

Маємо наступну послідовність кроків адаптивного алгоритму RLS: при надходженні нових вхідних даних  $\mathbf{u}(k)$  здійснюється фільтрація сигналу з використанням поточних кое-

фіцієнтів фільтра  $\mathbf{w}(k-1)$  і обчислення величини помилки відтворення зразкового сигналу:  $y(k) = \mathbf{u}^T(k)\mathbf{w}(k-1)$ ,  $e(k) = d(k) - y(k)$ ; розраховується вектор-стовпець коефіцієнтів посилення (слід зазначити, що знаменник дроби в наступній формулі є скаляром, а не матрицею):

$$\mathbf{K}(k) = \frac{\mathbf{P}(k-1)\mathbf{u}(k)}{1 + \mathbf{u}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{u}(k)}, \quad (6)$$

проводиться оновлення оцінки зворотної кореляційної матриці сигналу:

$$\mathbf{P}(k) = \mathbf{P}(k-1) - \mathbf{K}(k)\mathbf{u}^T(k)\mathbf{P}(k-1), \quad (7)$$

нарешті, проводиться оновлення коефіцієнтів фільтра:  $\mathbf{w}(k) = \mathbf{w}(k-1) + \mathbf{K}(k)e(k)$ .

На рисунку 4 проведено аналіз сигналів помилки для алгоритмів адаптації. Результат показує, що LMS (LeastMeanSquare – метод найменших квадратів) – алгоритм збігається досить повільно і має досить суттєві залишкові шуми. Алгоритми RLS та Калмана дають кращі показники, та збігаються швидше.

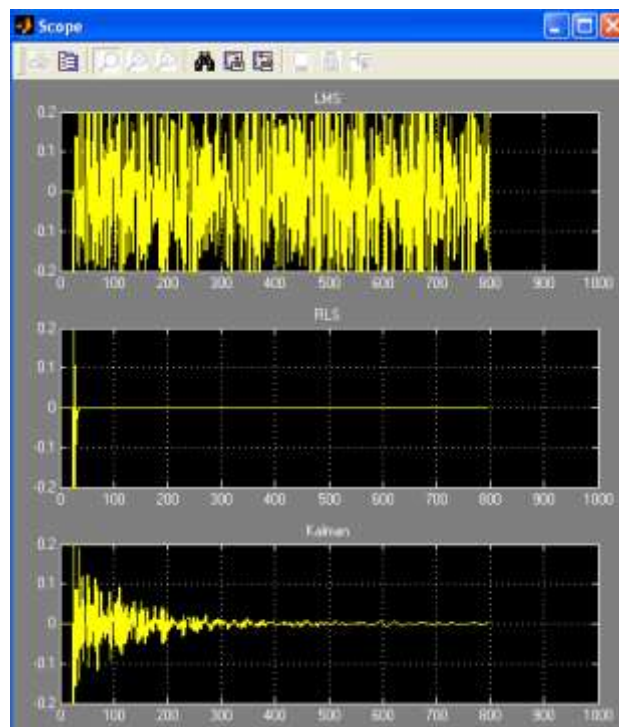


Рисунок 4 – Сигнали помилки для трьох алгоритмів адаптації

Таким чином, основною метою адаптивного кодування є забезпечення необхідної достовірності передавання інформації при мінімальній надлишковості завадостійкого коду. Таке кодування дозволяє збільшити швидкість передавання інформації або зменшити займану смугу частот за рахунок адаптації використаного кодера до стану телекомунікаційного каналу. Ідея адаптації полягає в тому, що приймач оцінює відношення сигнал/шум в телекомунікаційному каналі і на підставі цієї оцінки вибирає із заданої множини код, який має максимальну кодову швидкість і забезпечує задану достовірність. Слід зазначити, що такий процес безпосередньо пов'язаний із вибором типу цифрової модуляції.

На рисунку 5 та рисунку 6 представлено графіки завадостійкості багатопорогових декодерів за умов застосування алгоритму адаптивного декодування багатопороговим декоде-

ром у телекомунікаційному каналі з СКК на основі BPSK і QPSK для забезпечення ймовірності помилки декодування не менше  $10^{-6}$ .

Спостерігаємо досить задовільне наближення кривої завадостійкості до кривої оптимального декодера (1-opt).

Отже, алгоритм адаптивного кодування передбачає процес виділення меж відношення сигнал/шум в межах якого кожен з досліджених кодів забезпечував необхідні характеристики і володів мінімальною надлишковістю і тоді суть адаптивного кодування буде зводитись до керування параметрами багатопорогового декодера адаптивно. Такий підхід дозволяє економити смугу частот і отримати вигравш за швидкістю. Канал який містить потужні шуми, буде спонукати застосування потужного коду, з більшою кількістю ітерацій декодування і навпаки – у випадку незначних шумів в каналі, декодер модифікується до стану який визначається меншою кількістю ітерацій при декодуванні.

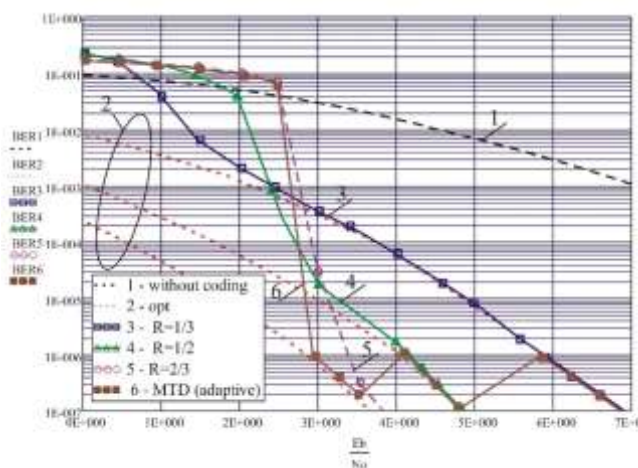


Рисунок 5– Характеристики адаптивного багатопорогового декодера в AGWN-каналі для довгих блокових кодів

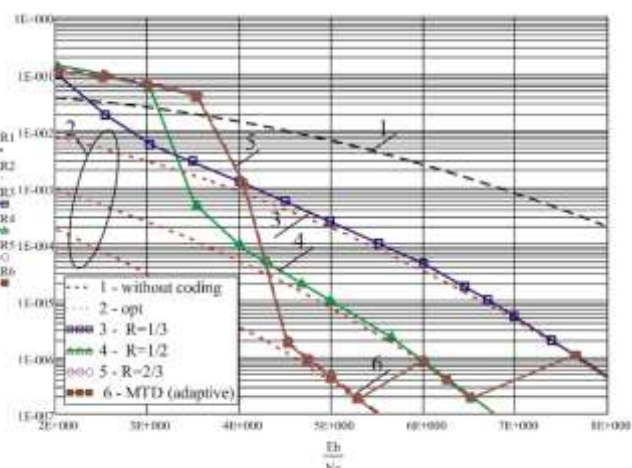


Рисунок 6 - Характеристики завадостійкості адаптивного багатопорогового декодера (BPSK) для довгих згорткових кодів

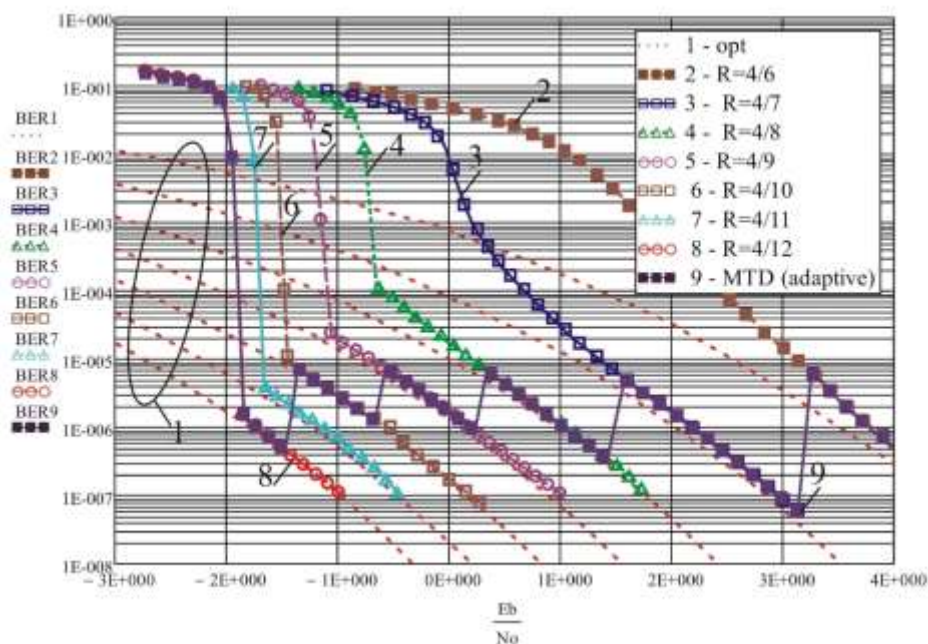


Рисунок 7 – Графіки завадостійкості адаптивного багатопорогового декодера блокових самоортогональних кодів

## 2 ВИСНОВКИ

Для розв'язання задачі зменшення ймовірності помилки декодування для самоортогональних кодів в області їх майже оптимального декодування запропоновано модифікацію схеми багатопорогового декодера шляхом використання адаптивних алгоритмів фільтрації. Запропоновано механізм адаптивного керування ефективністю роботи багатопорогового декодера шляхом керування надлишковістю підключення або виключення перевірочних гілок в структурі декодера. Показано, що підключенням та відключенням перевірочних гілок, можна отримати задану достовірність переданих даних при мінімальній надмірності коду без зміни кодера і декодера за умов застосування алгоритму адаптивного декодування багатопороговим декодером у телекомунікаційному каналі з СКК на основі BPSK і QPSK для забезпечення ймовірності помилки декодування неменше  $10^{-6}$ .

## ЛІТЕРАТУРА

- 1 Бойко Ю. М. Теоретичні аспекти підвищення завадостійкості й ефективності обробки сигналів в радіотехнічних пристроях та засобах телекомунікаційних систем за наявності завод : монографія /Ю. М. Бойко, В. А. Дружинін, С. В. Толюпа. – Київ: Логос, 2018. – 227 с.
- 2 Моргун О. А. Дослідження особливостей згортального кодування інформації у високошвидкісних системах цифрового зв'язку /О. А.Моргун //Системи обробки інформації. – 2012. – №. 5. – С. 42–46.
- 3 Бойко Ю. М. Аналіз ефективності декодування самоортогональних кодів у телекомунікаційних каналах із фазовою маніпуляцією / Ю. М. Бойко, О. І. Єрмоєнко, О. В. Костенко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький, 2018. – № 6, т. 1. – С. 76–84.
- 4 Liu Y., Niu X., Zhang M. Multi-threshold bit flipping algorithm for decoding structured LDPC codes //IEEE Communications Letters. – 2015. – Т. 19. – №. 2. – P. 127–130.
- 5 Tashatov N. etal. Multilevel Multi-threshold Decoding of Self-Orthogonal Codes for High-Speed Communications //Proc. Of the 2nd International Conference on Innovative Trends in Multidisciplinary Academic Research (ITMAR-2015). – 2015. – Т. 2. – P. 187–190.
- 6 Grinchenko N., Gromov A., Ovechkin G. Improving performance of multi-threshold decoder over binary erasur echannel //Embedded Computing (MECO), 2017 6th Mediterranean Conference on. – IEEE, 2017. – P. 1–4.
- 7 Zolotaryov V. V.etal. Soft decision decoding techniques in multi threshold decoding of self-orthogonal codes //Digital Signal Processing (DSP), 2013 18th International Conference on. – IEEE, 2013. – P. 1–4.
- 8 Бойко Ю. М. Дослідження ефективності алгоритмів каналного кодування в захищених телекомунікаційних системах передавання інформації /Ю. М. Бойко, Д. А. Макаришкін, О. І. Пасічник //Зв'язок: загальногалуз. наук.-вироб. журн. – Київ, 2016. – № 5. – С. 56–67.
- 9 Boiko Ju., Eromenko O. Signalprocessingintelecommunicationswithforwardcorrectionoferrors // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2018. – Vol. 11. – №. 3. – P. 868–877.
- 10 Boiko Ju., Kovtun I., Petrashchuk S. Productivity of telecommunication systems with modified signal-code constructions //Scientific-Practical Conference Problems of Info communications. Science and Technology (PIC S&T), 2017 4th International. – IEEE, 2017. – P. 173–178.
- 11 Бойко Ю. М. Дослідження способів завадостійкого кодування для захисту від помилок у цифрових каналах передавання інформації [Текст] /Ю. М. Бойко, Д. А. Макаришкін, С. В. Івчун //Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2013. – № 2. – С. 188–195.

## REFERENCES

- 1 Boiko Yu. M. Teoretychni aspekty pidvyshchennia zavadostiikosti y efektyvnosti obrobky syhnaliv v radiotekhnichnykh prystroiakh ta zasobakh telekomunikatsiinykh system za naiavnosti zavad : monohrafiia / Yu. M. Boiko, V. A. Druzhynin, S. V. Toliupa. – Kyiv: Lohos, 2018. – 227 s.

- 2 Morhun O. A. Doslidzhennia osoblyvostei zghortalnoho koduvannia informatsii u vysokoshvydkisnykh systemakh tsyfrovoho zviazku / O. A. Morhun // *Systemy obrobky informatsii*. – 2012. – №. 5. – S. 42–46.
- 3 Boiko Yu. M. Analiz efektyvnosti dekoduvannia samoortogonalnykh kodiv u telekomunikatsiinykh kanalakh iz fazovoiu manipuliatsiieiu / Yu. M. Boiko, O. I. Yeromenko, O. V. Kostenko // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. – Khmelnytskyi, 2018. – № 6, T. 1. – S. 76–84.
- 4 Liu Y., Niu X., Zhang M. Multi-threshold bit flipping algorithm for decoding structured LDPC codes // *IEEE Communications Letters*. – 2015. – T. 19. – №. 2. – P. 127–130.
- 5 Tashatov N. et al. Multilevel Multi-threshold Decoding of Self-Orthogonal Codes for High-Speed Communications // *Proc. Of the 2nd International Conference on Innovative Trends in Multidisciplinary Academic Research (ITMAR-2015)*. – 2015. – T. 2. – P. 187–190.
- 6 Grinchenko N., Gromov A., Ovechkin G. Improving performance of multi-threshold decoder over binary erasure channel // *Embedded Computing (MECO), 2017 6th Mediterranean Conference on*. – IEEE, 2017. – P. 1–4.
- 7 Zolotaryov V. V. et al. Soft decision decoding techniques in multi-threshold decoding of self-orthogonal codes // *Digital Signal Processing (DSP), 2013 18th International Conference on*. – IEEE, 2013. – P. 1–4.
- 8 Boiko Yu. M. Doslidzhennia efektyvnosti alhorytmiv kanalnoho koduvannia v zakhyschenykh telekomunikatsiinykh systemakh peredavannia informatsii / Yu. M. Boiko, D. A. Makaryshkin, O. I. Pasichnyk // *Zviazok: zahalnohaluz. nauk.-vyrob. zhurn.* – Kyiv, 2016. – № 5. – S. 56–67.
- 9 Boiko J., Eriomenko O. Signal processing in telecommunications with forward correction of errors // *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. – 2018. – Vol. 11. – №. 3. – P. 868–877.
- 10 Boiko J., Kovtun I., Petrashchuk S. Productivity of telecommunication systems with modified signal-code constructions // *Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), 2017 4th International*. – IEEE, 2017. – P. 173–178.
- 11 Boiko Yu. M. Doslidzhennia sposobiv zavadostiikoho koduvannia dlia zakhystu vid pomylok u tsyfrovyykh kanalakh peredavannia informatsii [Tekst] / Yu. M. Boiko, D. A. Makaryshkin, S. V. Ivchun // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. – 2013. – № 2. – S. 188–195.