

ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ ЗАВАДОСТІЙКОГО КОДУВАННЯ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД ПОМИЛОК У ЦИФРОВИХ КАНАЛАХ ПЕРЕДАВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ

Проведений аналіз особливостей використання завадостійкого кодування для захисту від помилок у цифрових каналах передавання інформації з фазовою маніпуляцією. Розглянуто принципи побудови та схеми кодерів та декодерів турбокоду. Розроблено схему цифрової системи передавання інформації з зовнішнім та внутрішнім турбокодером. Надано рекомендації відносно виду та структури елементів каскадного кодера. Наведено аналітичні залежності та результати досліджень для опису ймовірності бітової помилки складових каскадного турбокодера. Засобами імітаційного моделювання Matlab-Simulink досліджено основні характеристики та особливості цифрового каналу передавання з каскадним турбокодуванням та цифровою фазовою модуляцією.

Ключові слова: завадостійке кодування, каскадне кодування, турбокодер.

J.M. BOIKO, D.A. MAKARYCHKIN, S.V. IVCHUN

Khmelniitskiy National University

RESEARCH OF METHODS OF CODE ANTIJAMMING FOR ERROR PROTECTION IN DIGITAL CHANNELS PASSED INFORMATION

Abstract. Conducted analysis of features of features of the use of antijamming code for an error protection in the digital channels of passed to information with phase manipulation. Principles of construction and chart of coding and decoders of turbo coding are considered. The chart of the digital system of passed to information is developed with external, and internal turbo coding. These recommendations are in relation to a kind and structure of elements of cascade coding. Analytical dependences, and results of researches, are resulted for description of probability of bit error of constituents of cascade turbo coding. By facilities of imitation design of Matlab-Simulink probed basic descriptions and features of digital channel of passed cascade turbo coding and by a digital phase modulation.

Keywords: antijamming code, cascade code, turbo-encoder.

Вступ

Невід'ємною складовою процесу функціонування систем передачі інформації є помилки приймання інформації, які в загальному викликані наявністю в каналі зв'язку завад і шуму. Для зниження впливу помилок приймання символів на якість приймання пакетів застосовують способи завадостійкого кодування для виявлення і виправлення одиничних та згрупованих помилок і повторної передачі пакетів за запитом. Слід зазначити, методи кодування виконують з перемежовуванням символів, яке використовується для розбиття груп помилок на некорельовані одиничні помилки [1]. Як було показано у [1, 2], усі способи захисту від помилок ґрунтуються на застосуванні надлишкових символів, які додаються до інформативних і пов'язані з ними спеціальними рівняннями, які дозволяють виявляти помилки. Порівняння кодів доцільно проводити за ступенем наближення їх характеристик до порогу Шеннона [3]. Теоретично цей поріг визначає потенційно-досяжне відношення сигнал/шум для фіксованої швидкості кодування. Підвищення енергетичної ефективності за рахунок використання кодів характеризують значенням еквівалентного енергетичного виграшу [1]. Для підвищення ефективності процесу обробки інформації в системах передачі інформації з фазовою маніпуляцією, слід вирішити завдання підвищення достовірності передавання інформації, сформувати структуру системи передавання інформації, дати рекомендації відносно типу завадостійких кодів, способу їх декодування. Для розв'язання окреслених питань, розглянемо можливості використання в каналах передачі інформації способів завадостійкого кодування на основі, так званих, турбокодів та каскадних кодів з турбокодуванням. Цим питанням присвячена стаття.

Аналіз останніх досліджень і публікацій та формування схеми цифрового каналу передавання інформації із завадостійким кодуванням

На даний час найбільш помітним досягненням теорії завадостійкого кодування є розробка турбокодів. Такі коди утворюються в результаті комбонування двох або більше складових кодів, які є різними варіантами чергування однієї інформаційної послідовності. Якщо для згорткових кодів, декодер видає жорстко декодовані символи, в каскадній схемі [1], при використанні турбокоду, для задовільної роботи алгоритму декодування найчастіше використовують м'яку схему декодування. Таким чином, у випадку систем з турбокодуванням, декодування полягає в тому, щоб передати м'яку схему прийняття рішення з виходу одного декодера на вхід іншого і повторювати цю процедуру до тих пір, поки не буде отримано надійне рішення.

Як було показано у [1, 4], застосування цифрової фазової маніпуляції в системах передавання інформації в чистому вигляді супроводжується виникненням проблеми недостатньої завадостійкості. Вирішення цієї проблеми в сучасних системах передавання інформації може бути отримано шляхом поєднання цифрової маніпуляції разом з решітчастим кодуванням, зокрема шляхом використання треліс-модуляції. Обраний вид фазової маніпуляції і завадостійкого коду утворює сигнально-кодову конструкцію (СКК).

Розглянемо процес побудови турбокодів (ТК). На рис. 1 представлено кодер ТК, який в загальному випадку можна представити як паралельне з'єднання двох рекурсивних систематичних кодерів.

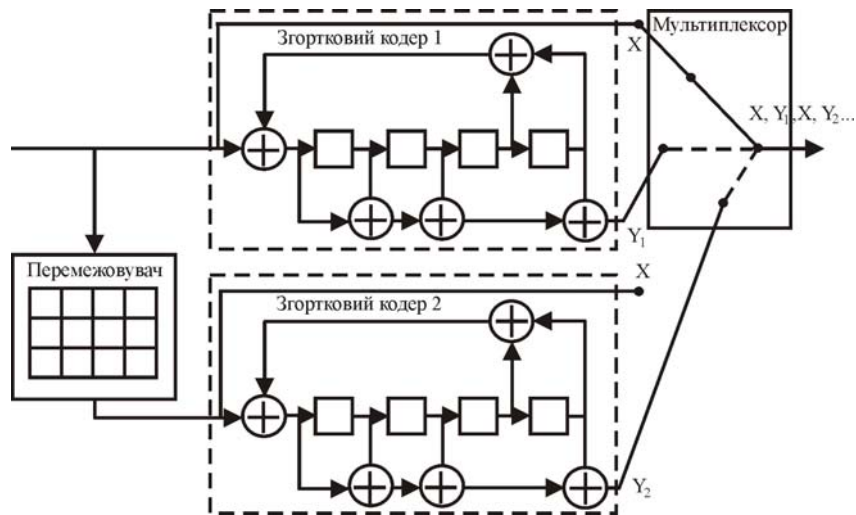


Рис. 1. Схема турбокодера

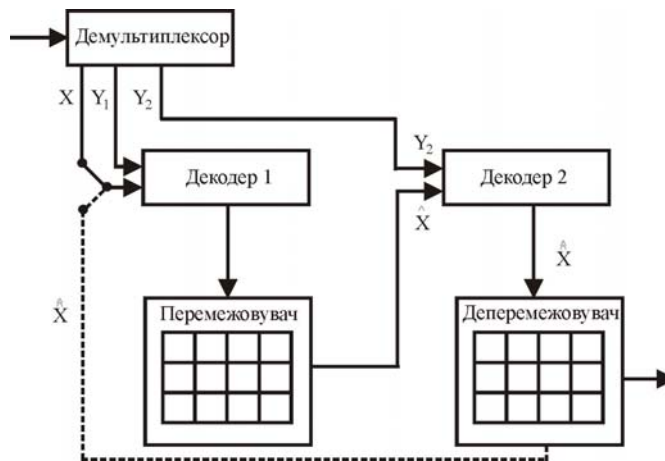


Рис. 2. Схема декодера турбокоду

Обидва згорткових кодера працюють зі швидкістю $1/2$. На вхід другого згорткового кодера інформація потрапляє з виходу псевдовипадкового перемежувача [1]. Кодова швидкість такого турбокодера в цілому буде $1/3$. В мультиплексорі здійснюється перфорація [2] до швидкості $1/2$. Завдяки використанню систематичних згорткових кодерів в кодовому блоці можна виділити систематичну та перевірочну частини. Отже, можна сказати, що в канал передавання інформації передаються два кодових блока: перший кодовий блок, який складається з перемішаної інформаційної частини і перевірочної частини нижнього згорткового кодера. Аналіз літературних джерел дає право зробити наступний висновок [1]: структура перемежувача мало впливає на його ефективність. При декодуванні блок можна роз'єднати на два кодових блока, які будуть ідентичними рис. 2. В цьому випадку можна використовувати два декодери, кожен з яких проводить декодування свого кодового блока. Декодовану інформацію першого (другого) декодера з врахуванням перемежувача можна використовувати в якості апіорної інформації для другого (першого) декодера з метою остаточного з'ясування результату декодування, отже таким чином утворюючи зворотний зв'язок між декодерами двох кодових блоків. Подібну операцію можна виконувати багаторазово (проводити декілька ітерацій). Як приклад, на рис. 3 представлено залежності бітрової помилки BER від відношення сигнал/шум для гаусового каналу з турбокодуванням з різним розміром інформаційного блоку L , та різною кількістю ітерацій. Таким чином проводиться турбодекодування. Тут кожен з декодерів виносить рішення відносно переданого символу на основі критерію максимальної апостеріорної ймовірності [2]. На першій ітерації на вхід першого декодера потрапляють оцінки («м'які» рішення) інформаційного символу систематичної і першої перевірочної частини першого кодового блока. На виході першого декодера формується оцінка («м'яке» рішення) інформаційного символу, яка далі використовується в якості апіорної інформації про нього для другого декодера. Цей декодер здійснює оцінку символу з виходу перемежувача на основі перевірочної частини другого кодового слова. На другій та наступних ітераціях декодування ця оцінка поновлюється та використовується як апіорна інформація відносно переданого символу для першого декодера. Отже, на входи кожного з двох елементарних декодерів потрапляють «м'які» рішення, результат декодування на виході декодера – також «м'яке» рішення. Остаточне прийняття рішення про переданий інформаційний символ виносить другий декодер. Закінчення процесу декодування

проходить або після виконання заданої кількості ітераційних циклів Q , або після того, як величина поправки результату декодування досягне встановленого порогу. Асимптотична границя для турбокодів визначається виразом:

$$P_{ном} \geq \frac{1}{L} \cdot Q \left(\sqrt{2d_f \cdot R \cdot \frac{E_b}{N_0}} \right) \cdot \sum_{\omega=1}^L \omega \cdot C_{\omega, d_f} \quad (1)$$

де L – розмір блоку який піддається перемежуванню, d_f – вільна відстань турбокоду [3], ω – вага коду, C_{ω, d_f} – кількість кодових послідовностей з вагою d_f , R – швидкість кодування.

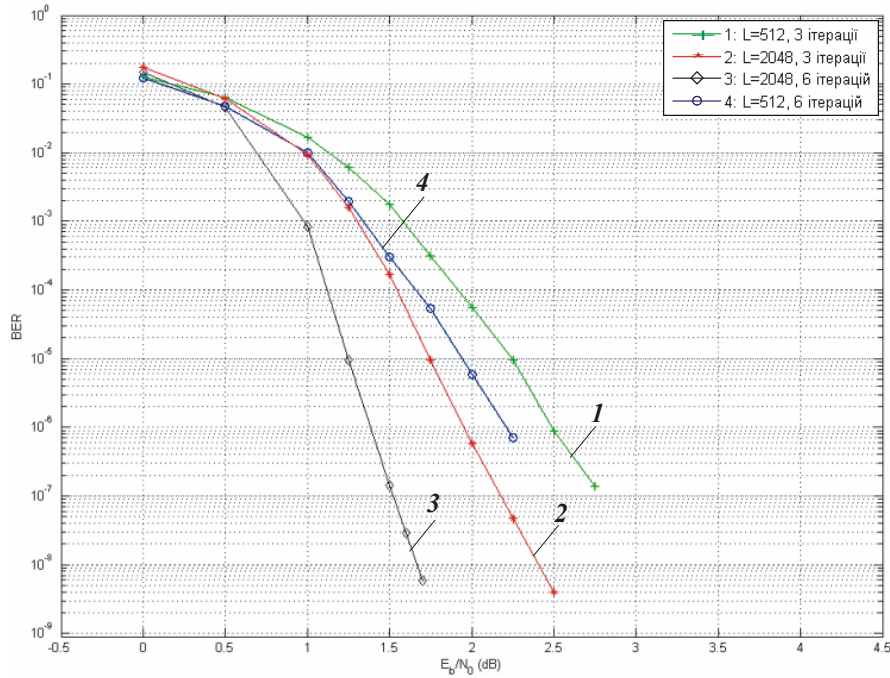


Рис. 3. Залежності біткової помилки BER від відношення сигнал/шум (E_b / N_0) для AWGN каналу

На рис. 4 представлено імітаційну схему системи передавання інформації з турбокодуванням. Сформована генератором випадкових чисел (Bernoulli Binary Generator) послідовність потрапляє на підсистему турбокодера (Turbo Encoder), яка містить два згорткових кодера та перемежувач, далі модулятор фазо-маніпульованого сигналу, в якості каналу зв'язку використано гаусовий канал AWGN, на виході якого розташовано підсистему декодера турбокода (Turbo Decoder) (рис. 5), яка містить два декодера, перемежувач та деперемежувач відповідно до схеми рис. 2. На рис. 6 наведено кодові послідовності на виході генератора випадкових чисел Bernoulli Binary Generator і на виході декодера турбокода отримані з допомогою інструмента Scope.

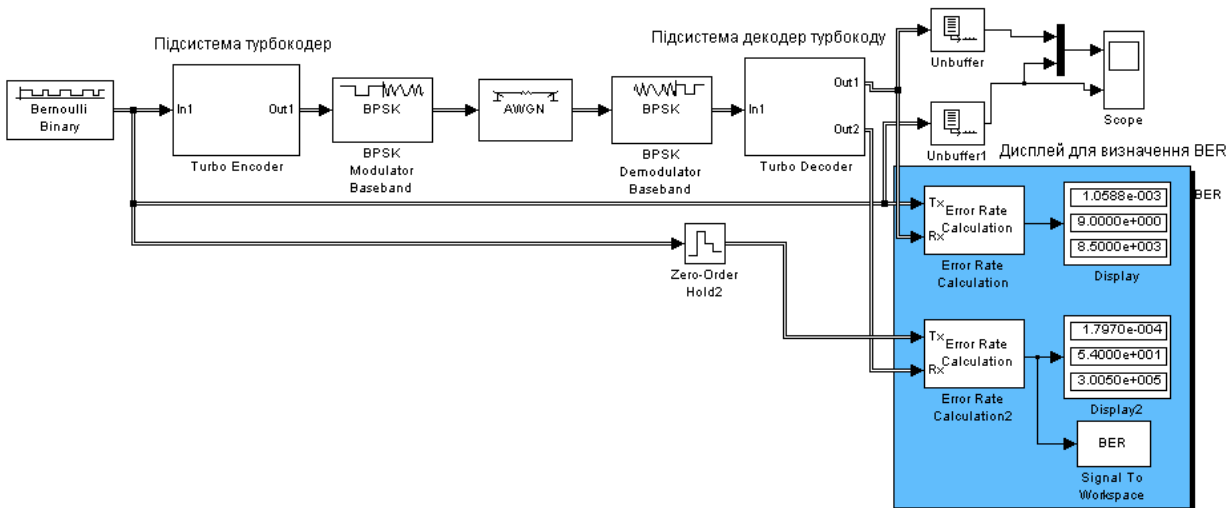


Рис. 4. Імітаційна схема системи передавання інформації з фазовою маніпуляцією і турбокодуванням

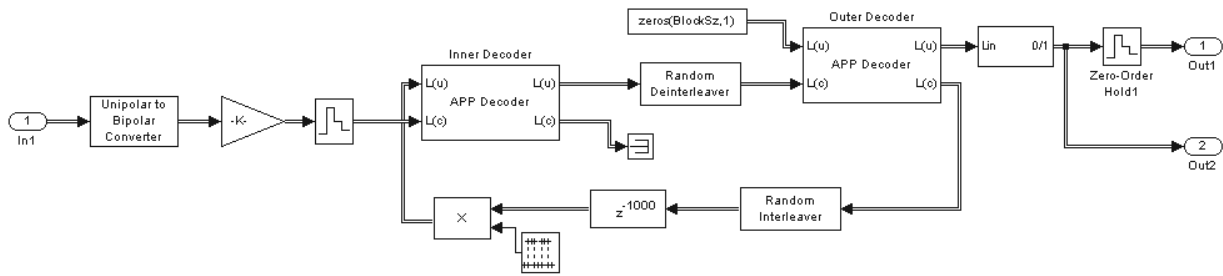


Рис. 5. Імітаційна модель підсистеми декодера турбокоду

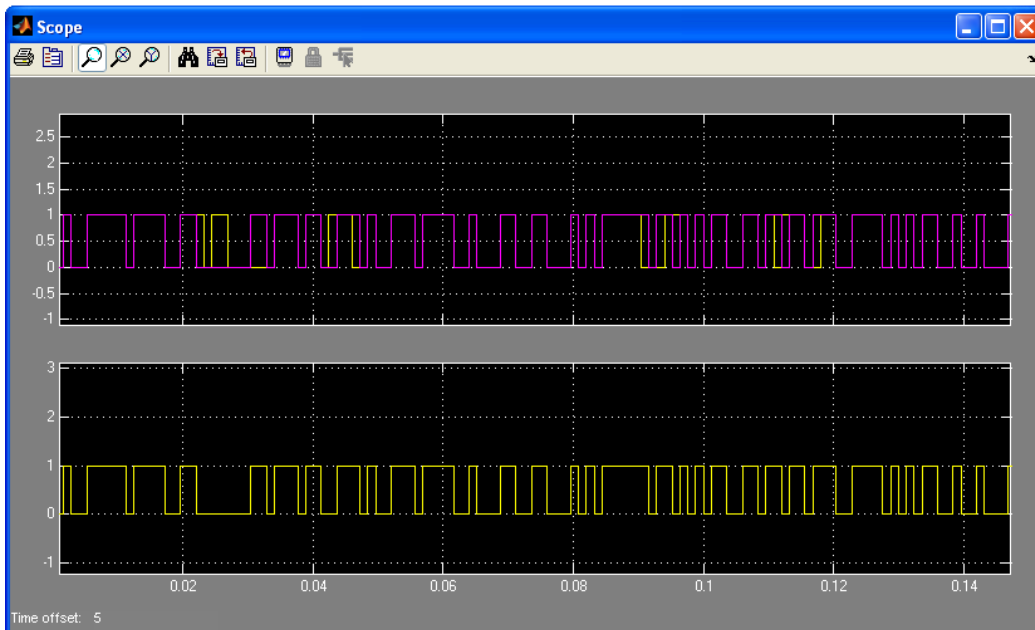


Рис. 6. Кодові послідовності на виході генератора випадкових чисел Bernoulli Binary Generator і на виході декодера турбокода

Проводилось визначення ймовірності помилки на біт (BER) [2], від відношення сигнал до шуму для турбокоду ТК (37,21), $L = 65536$, $R = 1/2$. На рис. 7 також представлено асимптотичну границю для турбокоду, яка розрахована з формули (1).

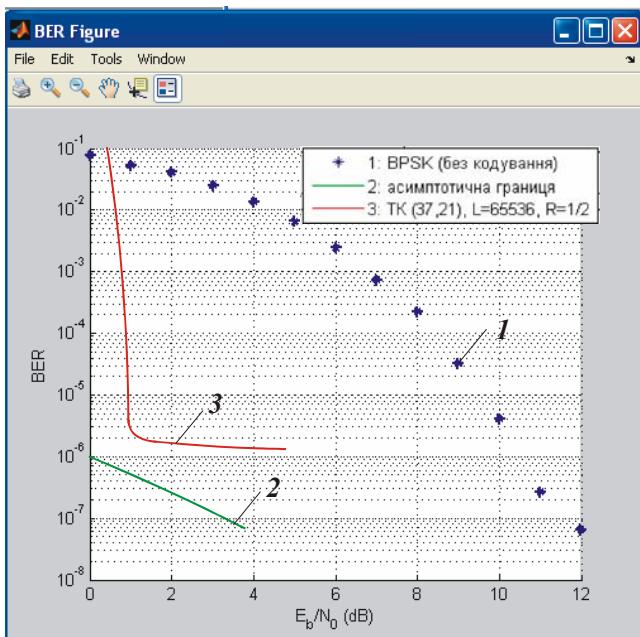


Рис. 7. Залежності біткової помилки BER від відношення сигнал/шум (E_b / N_0) для AWGN каналу: 1 – без кодування (BPSK); 2 – асимптотична границя; 3 – ТК (37,21), $R=1/2$

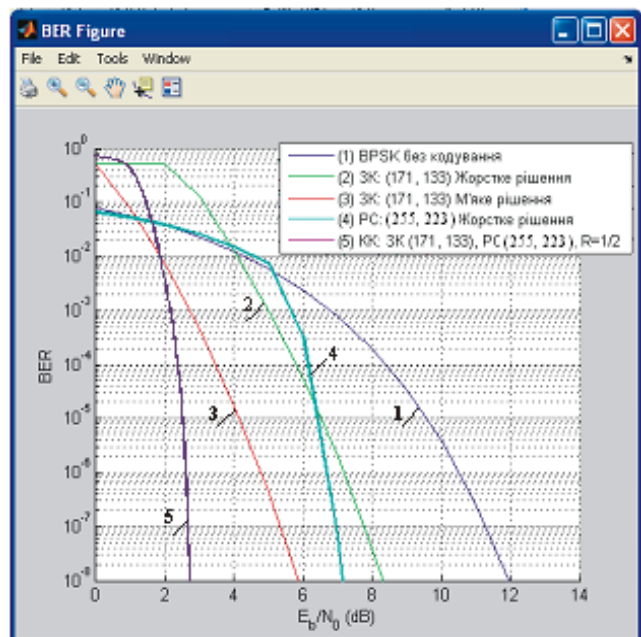


Рис. 8. Залежності біткової помилки BER від відношення сигнал/шум (E_b / N_0) для AWGN каналу: 1 – без кодування (BPSK); 2 – ЗК (жорстке рішення); 3 – ЗК (м'яке рішення) 4 – PC; 5 – КК (ЗК (171, 133), PC (255, 223)), $R=1/2$

Аналіз залежностей, наведених на рис. 7, дозволяє зробити наступні висновки. При ймовірності помилки BER менше 10^{-5} крутість характеристики ТК знижується зі зростом величини E_b / N_0 , отже відбувається ефект насичення ймовірності помилки. Досягнути малих ймовірностей помилок, наприклад 10^{-8} , очевидно, з допомогою турбокоду вдасться за великих значень E_b / N_0 . Крім того, порівнюючи рис. 7 з рис. 8, отриманим в роботі [1], встановлюємо, що для низьких ймовірностей помилки ТК будуть не ефективні в порівнянні з каскадними кодами (порівнюємо криву 3 на рис. 7 та 5 на рис. 8 при значенні BER 10^{-6}). Турбокод, досліджений вище, мав наступні параметри: кількість символів на вході кодера $k = 65523$, конструктивна довжина турбо-кодера $K = 5$, довжина перемешувача $L = k + K - 1 = 65536$, $R = 1/2$, довжина кодового слова $n = L / R = 131072$.

Аналіз літературних джерел дозволяє зробити наступні висновки: турбокоди розглянутої структури мають при Q – ітераціях декодування таку ж саму складність за кількістю необхідних операцій складання і множення, як і декодер Вітербі [2] згорткового коду. Обчислювальна складність турбокодера в розрахунку на один інформаційний біт не залежить від довжини інформаційного блоку k , але слід зауважити, що для ТК зі зростом k , зростає необхідний об'єм пам'яті декодера, а отже час затримки декодування.

Побудова схеми системи передачі з каскадним турбокодуванням та оцінка ефективності каскадного турбокодування

В роботі [1] розглядалися можливості побудови схеми передавання інформації із застосуванням завадостійкого каскадного кодування. Зокрема, використання диференціального (відносного) кодування в системах без завадостійкого кодування призводить до розмноження помилок. В системах з завадостійким кодуванням доцільне використання відносного кодування. В цьому випадку має значення послідовність включення відносного і завадостійкого кодера. Тут можна окремо виділити зовнішнє і внутрішнє відносне кодування. На основі викладених міркувань [1] щодо реалізації цифрового каналу передавання інформації можна зробити наступні висновки. Для реалізації кодів з великою довжиною блоку і високою коректуючою здатністю, в каналі передачі інформації доцільно використовувати каскадні коди. В цьому випадку слід використовувати декілька рівнів кодування. Найбільш доцільною є схема з двома рівнями. В якості зовнішнього можна використати код Ріда – Соломона (РС), в якості внутрішнього можна вибрати різні коди. Розглянемо можливості використання в якості внутрішніх кодів турбокодів, а в якості зовнішнього кода – код Ріда – Соломона [1]. В цьому випадку, можна констатувати, що характеристики отриманої конструкції будуть наближатись до потенційної для подібного поєднання кодів. Проведемо побудову схеми системи передавання інформації з каскадним кодуванням та оцінимо ефективність каскадного коду з внутрішнім ТК (37,21) і зовнішнім кодом Ріда – Соломона, в якості прикладу використаємо досліджений у [1] код РС (255, 223), який використовується в супутникових цифрових каналах передавання інформації [5]. Загальна схема системи передавання інформації в цьому випадку буде виглядати наступним чином (рис. 9).

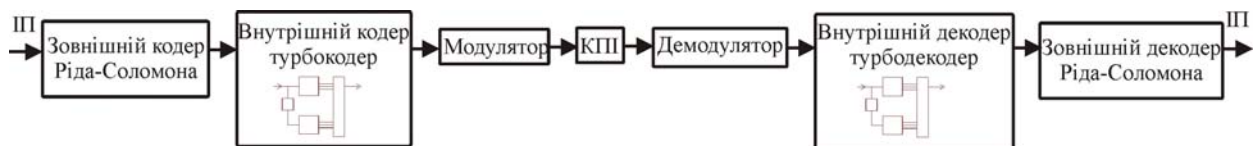


Рис. 9. Структурна схема каналу передавання інформації з каскадним кодуванням: ІП – інформаційний потік; КПІ – канал передавання інформації

Аналізуючи результати отримані вище для турбокоду рис. 7, зазначимо, що асимптотична границя ТК близька до експериментальної залежності лише в області значень BER $< 10^{-5}$. Отже, використання виразу (1), не підходить для розрахунку характеристик каскадного коду з внутрішнім турбокодом. В цьому випадку для отримання ймовірності бітової помилки двійкових символів слід користуватись вказаною у [1] формулою для декодера Ріда – Соломона:

$$P_b \leq \frac{2^{m-1}}{2^m - 1} \sum_{i=t+1}^n \frac{i+1}{n} \cdot C_n^i \cdot P_{sim} (1 - P_{sim})^{n-i}, \quad (2)$$

де $P_{sim} = 1 - (1 - P_c)^m$ – ймовірність помилки 2^m – го символу, а P_c – ймовірність бітової помилки в каналі.

Нагадаємо, що коди Ріда – Соломона – це блокові коди (n, k) , які мають максимальну відстань $d = n - k + 1$. Для цих недвійкових кодів, які визначено над полем Галуа $GF(q)$, довжина блоку складає $n = q - 1$ (звичайно $q = 2^m$, тоді кодом виправляються 2^m – ні символи). Причому для виправлення t помилок вимагається $2t$ перевірочних символів.

Кожен символ кодового слова Ріда – Соломона складається з декількох біт. При декодуванні може бути виправлено $t = \frac{n - k}{2}$ символів, які породжено помилками. Всі операції, пов'язані з процедурами кодування і декодування проводяться в полі Галуа $GF(2^x)^1$ (кінцева множина, яка складається з 2^x

елементів) за модулем полінома або при байтовій структурі в полі $GF(2^8)$.

На рис. 10 зображено залежності ймовірності помилки (BER) від відношення сигналу до шуму (E_b / N_0) для описаного вище каскадного коду, а також для згорткового коду (ЗК) (ЗК (171,133), $R=1/2$), у випадку декодування за “м’яким” алгоритмом Вітербі, BPSK – маніпульованого сигналу без кодування, турбокоду. Крім того, враховуємо результат для залежності ймовірності помилки (BER) від відношення сигналу до шуму (E_b / N_0) для каскадного коду представлено на рис. 8 (крива 5), робимо висновок, що каскадний код (крива 4) на рис. 10 усуває ефект насичення який притаманний ТК. Далі, порівнюємо криву 5, для залежності ймовірності помилки (BER) від відношення сигналу до шуму (E_b / N_0) для каскадного коду утвореного структурою: зовнішній кодер – Ріда – Соломона; перемежувач та внутрішній кодер – згортковий на рис. 8, з кривою 4 на рис. 10, яка є залежністю ймовірності помилки (BER) від відношення сигналу до шуму (E_b / N_0) для каскадного

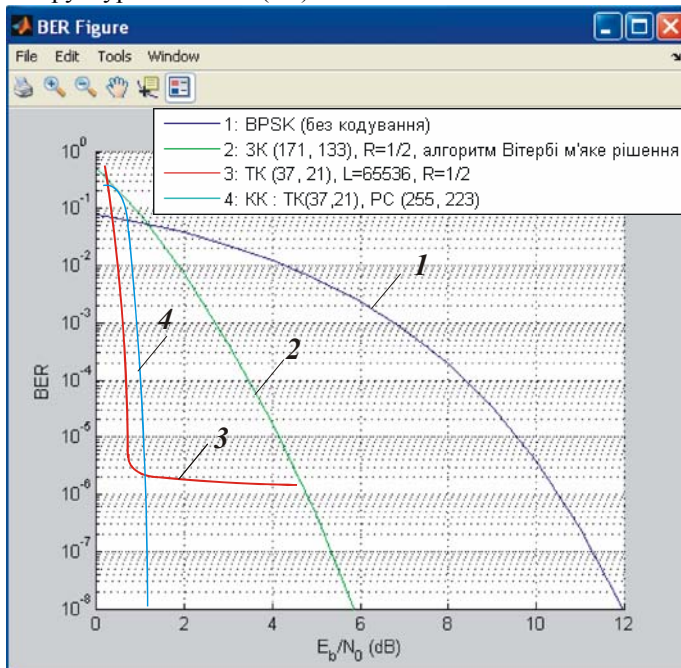


Рис. 10. Залежності бітрової помилки BER від відношення сигнал/шум (E_b / N_0) для AWGN каналу: 1 – без кодування (BPSK); 2 – ЗК (171,133); 3 – ТК (37,21), $R=1/2$; 4: КК: ТК(37,21), PC (255,223)

коду, утвореного структурою представленою на рис.9: зовнішній кодер – Ріда – Соломона, внутрішній – турбокодер (рис. 1). Робимо висновок про те, що вигравш структури каскадного коду з турбокодером в цьому випадку складає приблизно 1,8 дБ для рівня BER 10^{-6} . Тут, слід зазначити, що ефект насичення в сучасних мікросхемах усувають введенням додаткового рівня кодування [6].

На рис. 11 представлено імітаційну схему підсистеми супутникового передавача [1], в якій здійснюється процедура каскадного кодування на основі використання зовнішнього кода Ріда – Соломона та внутрішнього турбокода.

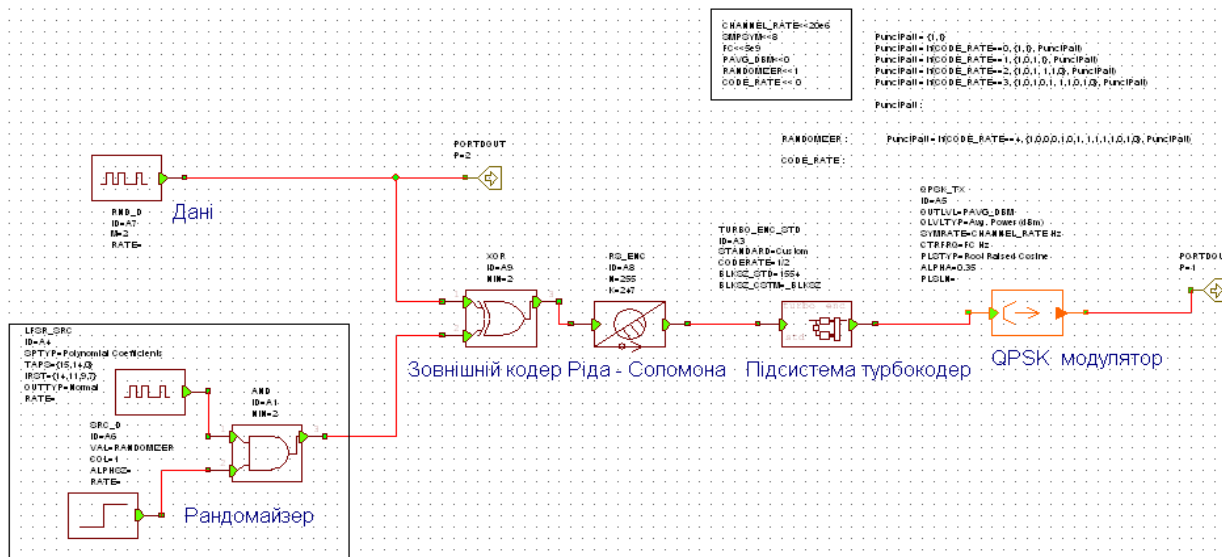


Рис. 11. Імітаційна модель передавача з каскадним турбокодуванням

З метою визначення енергетичного вигравш каскадного кодування, проводилось імітаційне моделювання супутникового каналу в середовищі Visual System Simulator. Імітаційна модель супутникового каналу передавання з каскадним кодуванням (зовнішній кодер Ріда – Соломона (255, 247), внутрішній кодер – турбокодер ($L=1554$, $R=1/2$, 10 ітерацій, QPSK) зображена на рис. 16 [1]. В процесі моделювання приймалось, що частоти квадратурних генераторів на приймальному та передавальному боці узгоджені за фазою.

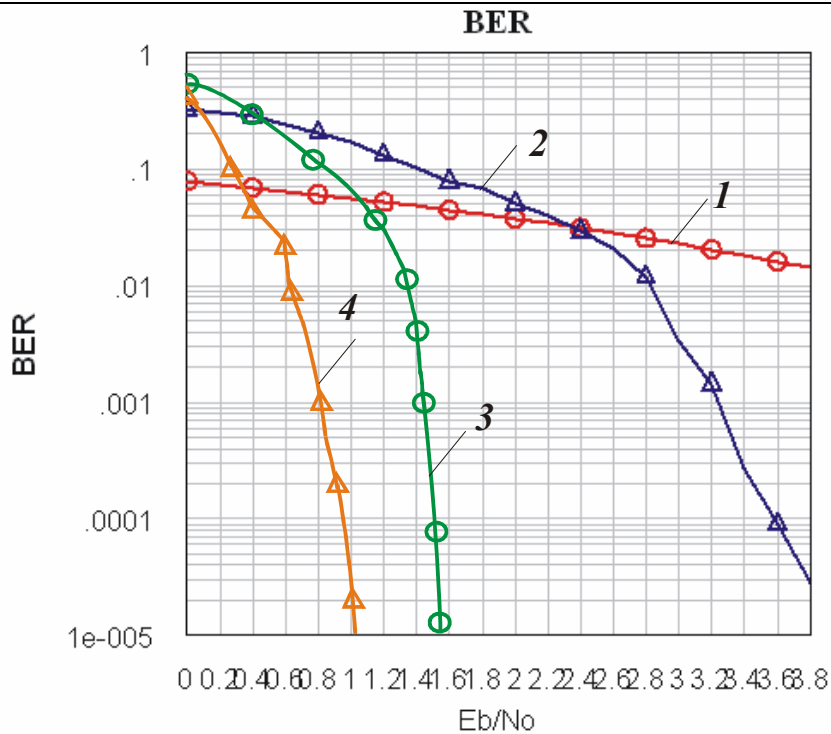


Рис. 12. Залежності біткової помилки BER від відношення сигнал/шум (E_b / N_0) для AWGN каналу з каскадним турбокодуванням: 1 – без кодування (QPSK); 2 – КК: PC (255, 247), перемежувач, ЗК (171, 133), QPSK, $R=1/2$; 3 – ТК: $R=1/2$, 4 – ТК: $R=1/3$

Проводилось моделювання схеми каналу передавання інформації з метою визначення енергетичного виграшу кодування (ЕБК) за умов зміни швидкості кодування турбокодера для зазначеного коду ($R=1/2$ (крива 3 на рис. 12), та $R=1/3$ (крива 4 на рис. 12)). Зокрема на рис. 12 наведено результати розрахунку залежності біткової помилки BER для представлених вище сигнально-кодових конструкцій (СКК) від відношення сигнал/шум (E_b / N_0) для AWGN каналу з різними швидкостями. На рис. 12, також наведена крива зміни BER від відношення сигнал/шум (E_b / N_0) для AWGN для некодованої QPSK (крива 1), а також крива (крива 2), отримана імітаційним моделюванням каналу передавання інформації з каскадним кодуванням за СКК типу: зовнішній кодер – PC (255, 247), перемежувач, внутрішній кодер – ЗК (171, 133), QPSK, $R=1/2$.

Так, для зазначеного коду у випадку швидкості кодування $1/2$ $E_{BK} \approx 2,3$ дБ ($BER=10^{-5}$) в порівнянні з каскадним кодом за СКК PC (255, 247), перемежувач, ЗК (171, 133), QPSK, $R=1/2$. У випадку реалізації каналу передавання інформації зі швидкістю кодування $1/3$, E_{BK} дорівнював 2,8 дБ ($BER=10^{-5}$), в порівнянні з каскадним кодом за СКК PC (255, 247), перемежувач, ЗК (171, 133), QPSK, $R=1/2$. Зміна структури коду, швидкості кодування у випадку турбокодування призводить до збільшення E_{BK} . В порівнянні з некодованою фазовою маніпуляцією (крива 1 на рис. 12) $E_{BK} \approx 8,5$ дБ для $R=1/3$ і 7,9 дБ для $R=1/2$ ($BER=10^{-5}$). Вибір структури каналу передавання інформації слід здійснювати шляхом застосування каскадних кодів та каскадних турбокодів оптимальних до виправлення помилок, забезпечення надлишковості та швидкості кодування.

Висновки

- Показано, що турбокоди утворюються в результаті компонування двох або більше складових кодів, які є різними варіантами чергування однієї інформаційної послідовності, а процедура декодування полягає в тому, щоб передати м'яку схему прийняття рішення з виходу одного декодера на вхід іншого і повторювати цю процедуру до тих пір, поки не буде отримано надійне рішення.
- Встановлено, що підвищення звадостійкості передавання інформації в цифрових супутникових каналах досягається використанням схем каскадного турбокодування.
- Визначено, що крутість характеристики ТК знижується зі зростанням величини E_b / N_0 , отже відбувається ефект насичення ймовірності помилки.
- В процесі дослідження отримано, що енергетичний виграш кодування (ЕБК) для каскадного коду, утвореного структурою зовнішній кодер – Ріда – Соломона, внутрішній – турбокодер, складає приблизно 1,8 дБ, для рівня $BER = 10^{-6}$, в порівнянні з каскадним кодом КК: PC (255, 223), ЗК (171, 133), BPSK, $R=1/2$.
- Розроблено структурну схему каналу передавання інформації із каскадним турбокодуванням.

- Визначено, що у випадку швидкості кодування $1/2$ ЕБК $\approx 2,3$ дБ ($BER=10^{-5}$) в порівнянні з каскадним кодом за СКК РС (255, 247), перемежувач, ЗК (171, 133), QPSK, $R=1/2$. У випадку реалізації каналу передавання інформації зі швидкістю кодування $1/3$ – ЕБК дорівнював 2,8 дБ ($BER=10^{-5}$), в порівнянні з каскадним кодом за СКК РС (255, 247), перемежувач, ЗК (171, 133), QPSK, $R=1/2$. Зміна структури коду, швидкості кодування у випадку турбокодування призводить до збільшення ЕБК.

- Сформовано Simulink – імітаційну модель системи передавання інформації зі каскадним турбокодуванням з метою дослідження ефективності кодування для захисту від помилок у цифрових каналах передавання інформації.

Література

1. Бойко Ю.М. Способи підвищення завадостійкості оброблення сигналів з фазовою маніпуляцією у цифрових супутникових каналах передавання // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – № 6. – С. 148 – 161.
2. Бойко Ю.М. Імітаційна реалізація способів завадостійкого кодування/декодування при вирішенні завдань підвищення вірності передавання інформації в супутникових каналах зв'язку // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – № 1. – С. 190 – 200.
3. Шинкарук О.М. Основи функціонування багатоканальних систем передачі інформації: [навч. посібник] / О.М. Шинкарук, Ю.М. Бойко, І.І. Чесановський. – Хмельницький: ХНУ, 2011. – 245 с.
4. Juliy Boiko, Victor Stetsiuk, Victor Michan. Improving noise immunity of QPSK demodulation of signals in digital satellite communication systems/ TCSET'2012 IEEE. 21 – 24 February, Lviv – Slavske.
5. Бойко Ю.М. Систематизація показників розрахунку енергетичного бюджету лінії "Супутниковий ретранслятор Metop/Fengyun – наземна станція" // IV – й Міжнародний радіоелектронний форум Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку" ММФ-2011. 19-20 жовтня. – Харків: – ХНУРЕ, Т. 1. Ч. 2. С. 42 – 46.
6. Product Specification. AHA 4540 Astro LE 4K Block/Turbo Product Code Encoder/Decoder [Electronic resource] – Advanced Hardware Architectures, Inc. – Mode of access: <http://www.aha.com>. – Last access: 2003. – p. 89. – Title from the screen.

Reference

1. Boiko J.M. Spособи pidvichennya zavadostiikosti obroblyennya signaliv z fazovoyu manipulacieju u cifrovich suputnikovich kanalach peredavannya informacii. Khmelnytskyi. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Technical sciences. 2012, No. 6, pp. 148-161.
2. Boiko J.M. Imitaciina pealizaciya sposobiv zavadostiikogo koduvannya/dekoduvannya pri virichenni zavdan' pidvichennya virmosti peredavannya informacii v suputnikovich kanalach zvayzku. Khmelnytskyi. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Technical sciences. 2012, No. 1, pp. 190-200.
3. Shinkaruk O.M., Boiko J.M., Chesanovskii I.I. Osnovi funkcionuvannya bagatokanalnich sistem peredachi informacii: navch. posibnik dlya studentiv vichich navchalnich zakladiv. Khmelnytskyi, KhNU, 2011. – 245 p.
4. Juliy Boiko, Victor Stetsiuk, Victor Michan. Improving noise immunity of QPSK demodulation of signals in digital satellite communication systems // TCSET'2012 IEEE. 21-24 February, Lviv – Slavske.
5. Boiko J.M. Sistematizaciya pokaznikov rozrachunku energetichnoho budzetu linii "Suputnikovii petranslator Metop/Fengyun – nazemna stanciya". IV – I Miznarodnii radioelektronniy forum: prikladna radioelektronika. Stan i perspektivi rozvitku" MMF-2011., Vol. 1, Chast 2, Kharkiv "KNURE", 2011, pp. 42-46.
6. Product Specification. AHA 4540 Astro LE 4K Block/Turbo Product Code Encoder/Decoder [Electronic resource] – Advanced Hardware Architectures, Inc. – Mode of access: <http://www.aha.com>. – Last access: 2003. – p. 89. – Title from the screen.

Рецензія/Peer review : 23.3.2013 р.

Надрукована/Printed : 7.4.2013 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Шинкарук О.М.