

УДК 621.391

О.І. Кушнір¹, О.І. Тимочко², О.В. Северінов²¹Командування Повітряних Сил Збройних Сил України, Вінниця²Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЗАВАДОСТІЙКОГО КОДУВАННЯ У ЦИФРОВИХ СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ

В роботі проведений аналіз методів завадостійкого кодування, які використовуються у цифрових системах зв'язку для захисту від помилок. Розглядаються методи завадостійкого кодування на основі турбокодів, а також використання для захисту від помилок послідовних каскадних конструкцій.

завадостійке кодування, виправлення помилок, циклічний код, турбокод, каскадний код

Вступ

Постановка проблеми. Ефективність функціонування Збройних Сил України залежить від організованого і безперервного управління військами, яке дозволяє в будь-яких, навіть найскладніших умовах обстановки, добиватися успішного виконання поставлених задач у встановлені терміни. Основною підсистемою АСУ, призначеною для якісної доставки передаваних повідомлень (інформації управління) є система військового зв'язку. Основним показником системі зв'язку є імовірність помилки, яка характеризує достовірність передачі.

При передачі інформації по каналах зв'язку виникають помилки, при цьому дані спотворюються і не можуть бути використані на приймальній стороні для подальшої обробки. Ймовірність спотворення біта в потоці передаваних даних на рівні фізичного каналу знаходиться в межах $10^{-2} \div 10^{-6}$. В той же час сучасні вимоги до достовірності інформації управління в АСУ істотно зросли, імовірність помилки не повинна перевищувати $P_{\text{пом}} = 10^{-7} \div 10^{-12}$ [1].

Крім того для забезпечення мобільного оперативного управління разом з високоякісними дротяними або оптоволоконними каналами широко використовується передача даних по радіоканалах. Дані канали характеризуються значною імовірністю помилок ($10^{-2} \div 10^{-3}$). Завмирання і багатопроменеве розповсюдження радіосигналів роблять істотний вплив на якість зв'язку.

Для боротьби з виникаючими помилками відомо багато різних методів. Одним з ефективних засобів захисту інформації від помилок в цифрових системах зв'язку є завадостійке кодування інформації.

Аналіз літератури. У літературі [1 – 5] розглядаються методи захисту від помилок, вживані в різних протоколах сучасних телекомунікаційних мереж.

Метою статті є аналіз методів завадостійкого кодування і розробка рекомендацій з їх викорис-

тання в системах автоматизованого управління військового призначення для підвищення достовірності передаваної інформації в АСУ військами.

Основний матеріал

Значне збільшення інформаційних потоків, циркулюючих в системах зв'язку, ускладнення процесів, пов'язаних з проміжною обробкою даних, висуває особливо жорсткі вимоги до забезпечення високої завадостійкості інформації, що приймається. Всю безліч методів захисту від помилок можна розділити на дві групи: методи, що не використовують зворотний зв'язок і що використовують його.

У першому випадку на передаючій стороні передавані дані кодуються одним з відомих кодів з виправлення помилок. На приймальній стороні відповідно здійснюється декодування інформації, що приймається, і виправлення знайдених помилок. Виправляюча можливість коду, що застосовується, залежить від числа надмірних бітів, що генеруються кодером. Якщо надмірність, що вноситься, невелика, існує небезпека того, що дані, що приймаються, міститимуть незнайдені помилки, які можуть привести до помилок в роботі прикладного процесу. Якщо ж використовувати код з високою виправляючою здатністю (великою надмірністю), то це приведе до необґрунтовано низької реальної швидкості передачі даних.

У системах із зворотним зв'язком застосовуються процедури виявлення помилок і перезапиту, звані також вирішальним зворотним зв'язком або виявленням помилок з автоматичним запитом повторення (АЗП, ARQ – Automatic Repeat Request). В цьому випадку код застосовується тільки в режимі виявлення помилок, що дозволяє досягти дуже низької імовірності незнайдені помилки (до $10^{-6} \div 10^{-12}$) при незначному рівні надмірності, що вводиться.

При передачі даних в сучасних комп'ютерних мережах найширше застосування знайшов другий підхід, заснований на використанні методів ARQ.

Іноді також застосовується комбінація двох розглянутих підходів, яка полягає в реалізації на передачій стороні спочатку кодування з виявленням помилок, а потім кодування кодом з виправленням помилок. Такі методи гібридного ARQ особливо ефективні при передачі даних по каналах дуже низької якості.

Для виявлення помилок в передаваних даних застосовують різні методи. До них відносяться:

- посимвольний контроль парності (використовуваний при передачі по порту RS-232);
- поблочний контроль парності;
- розрахунок контрольної суми;
- контроль циклічним надмірним кодом (CRC).

Реалізація перших трьох методів відносно проста. Однак, нездатність цих методів виявляти групуючі помилки обмежує їх застосовність.

CRC-контроль є могутнішим методом виявлення помилок і використовується для виявлення помилок на рівні блоків даних.

При CRC-контролі великий набір всіх можливих двійкових чисел відображається на менший набір всіх можливих CRC. Обчислення перевірочних символів при CRC-контролі засноване на розподілі інформаційних многочленів на многочлен, що породжує. При виборі полінома, що породжує, керуються бажаною розрядністю залишку і його здатністю виявляти помилки. Ряд поліномів, що породжують, прийнятий міжнародними організаціями як стандарти.

Проте в АСУ військового призначення велика роль відводиться передачі команд і наказів у вигляді мовних повідомлень. В даному випадку повторна передача неможлива, оскільки може бути дуже тривалою і не дозволить забезпечити передачу наказів в реальному масштабі часу. Крім того, методи виявлення помилок з повторною передачею непридатні при передачі відео і захисті від помилок інформації, що зберігається на жорстких носіях. У цих випадках ефективним є застосування перешкодостійких кодів з виправленням помилок.

При низькому енергетичному відношенні сигнал/шум (1÷3 дБ) доцільне застосування турбокодів, які дозволяють забезпечити високу ефективність кодування при незначній складності реалізації декодуєчих пристроїв.

Турбокод є паралельним каскадним кодом, утвореним двома або більш становлячими кодами [3]. Схема турбокодера з двома становлячими кодерами із швидкістю кодування $R = 1/2$ представлена на рис. 1.

Проте характерним недоліком турбокодів є зменшення ефективності кодування із збільшенням енергетичного відношення сигнал/шум, що не дозволяє забезпечити $P_{\text{пом}} < 10^{-6}$ при прийнятній скла-

дності декодування. Усунення цього недоліку можливо шляхом використання турбокодів сумісне з кодами Рида-Соломона в послідовних каскадних кодових конструкціях [4].

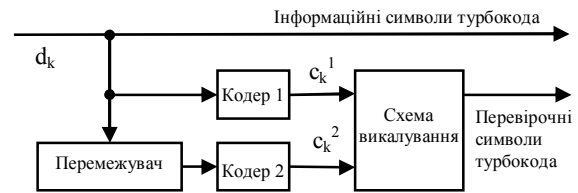


Рис. 1. Схема турбокодера

На рис. 2 представлена каскадна схема з двома рівнями кодування, де внутрішнім кодом є турбокод, а зовнішнім кодом – код Рида-Соломона. Такий вибір обумовлений тим, що внутрішній декодер працює в каналі з малим значенням відношення сигнал/шум E_b/N_0 , де виявляється перевага турбокодів, а коди Рида-Соломона є кодами з максимальною відстанню і відрізняються низькою складністю декодування [5]. Зовнішній декодер коду Рида-Соломона працює в легших умовах ($P_{\text{оши}} = 10^{-3} \div 10^{-5}$), що дозволяє одержати $P_{\text{оши}} < 10^{-9}$. На вхід кодера коду Рида-Соломона поступають m -бітові символи. Кодове слово зовнішнього коду складається з n_1 m -бітових символів, причому k_1 з них є інформаційними. Далі n_1 символів, що виходять з кодера зовнішнього коду, після перемеження і відображення в двійкову послідовність завдовжки mn_1 , кодується кодером внутрішнього коду. При цьому до блоку з mn_1 двійкових символів додається $n_2 - k_2$ перевірочних двійкових символів. Швидкість каскадного коду $R^{\text{TK+PC}} = R^{\text{PC}} R^{\text{TK}}$, де $R^{\text{PC}} = k_1/n_1$, $R^{\text{TK}} = k_2/n_2$. Перемеження повинне бути здійснене так, щоб ніякі два двійкові символи на виході турбодекодера, що знаходяться на відстані менше $5(v+1)$, де v – кількість елементів пам'яті становлячих турбокод згорткових кодів, не належали одному символу коду Рида-Соломона. При виконанні цієї умови можна вважати помилки на вході зовнішнього кодера незалежними. Найбільш просте таке перемеження здійснити за допомогою блокового або згорткового перемежителів [5].

На основі проведеного моделювання були отримані характеристики каскадної схеми з двома рівнями кодування.

На рис. 3 представлена залежність $P_{\text{оши}}^{\text{TK+PC}}$ від E_b/N_0 каскадного коду із зовнішнім кодом Рида-Соломона (125,113).

З аналізу рис. 3 виходить, що для турбокоду з фіксованими параметрами існує код Рида-Соломона з виправляючою здатністю t , який дозволяє одержати найбільший енергетичний вигравш при задано-

му значенні E_b/N_0 , а результуючий каскадний код може забезпечити низьке значення $P_{\text{ош}}^{\text{TK+PC}}$ при малому значенні E_b/N_0 .

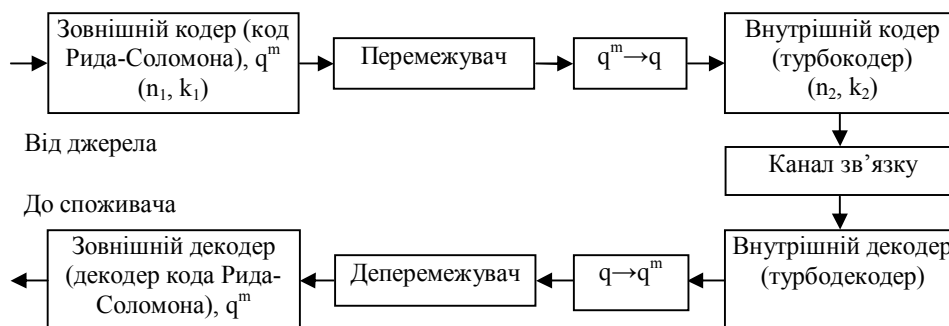


Рис. 2. Каскадна схема кодування (зовнішній код – код Рида-Соломона, внутрішній код – турбокод)

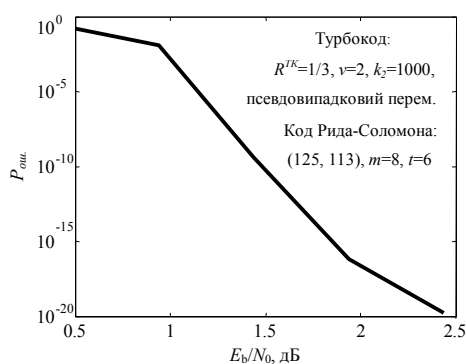


Рис. 3. Залежність $P_{\text{ош}}^{\text{TK+PC}}$ від E_b/N_0

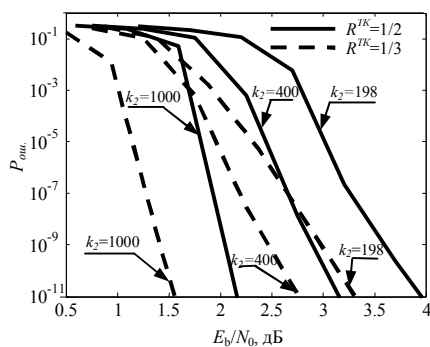


Рис. 4. Залежність $P_{\text{ош}}^{\text{TK+PC}}$ від E_b/N_0 для каскадного коду з турбокодами $v = 2$

На рис. 4 представлені криві залежності $P_{\text{ош}}^{\text{TK+PC}}$ від E_b/N_0 , одержані для каскадного коду з турбокодом з $v = 2$, псевдовипадковим перемежувачем і різними значеннями R^{TK} , k_2 , з аналізу якого виходить, що сумісне використання турбокодів і кодів Рида-Соломона в послідовних каскадних кодових конструкціях дозволяє забезпечити значення

$P_{\text{ош}} < 10^{-9}$ при низькому енергетичному відношенні сигнал шум. Крім того, із зростанням k_2 ефективність кодування зростає.

Висновки

В роботі проведений аналіз методів завадостійкого кодування, які використовуються у цифрових системах зв'язку для захисту від помилок, розглянуті особливості сумісного використання турбокодів і кодів Рида-Соломона в послідовних каскадних кодових конструкціях, що дозволяє забезпечити значення $P_{\text{ош}} < 10^{-9}$ при низькому відношенні E_b/N_0 .

Список літератури

1. Лагутенко О.И. *Современные модемы*. – М.: Эко-Трендз, 2002. – 343 с.
2. Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) "Recommendations for space data systems, telemetry channel coding" // *Blue Book*. – May 1998, <http://www.ccsds.org>.
3. Berrou C., Glavieux A., Thitiumjshima P. *Near Shannon limit error correcting coding: Turbo codes* // *Int. Conf. on Commun.* – Geneva, Switzerland, May 1993. – P. 1064-1070.
4. Giancrisofaro D., Giubilei R., Novello R., Piloni V., Tough J. *Performances of Novel DVB-RCS Standard Turbo Code and its Use in On-Board Processing Satellites* // *Proceedings of the EMPS workshop, in IEEE EMPS/PIMRC.* – London, 17-21 September 2000. – P. 345-349.
5. Кларк Дж.-мл., Кейн Дж. *Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи: Пер. с англ. / Под ред. Б.С. Цыбакова*. – М.: Радио и связь, 1987. – 392 с.

Надійшла до редколегії 22.11.2007

Рецензент: д-р фіз.-мат. наук, проф. С.В. Смеляков, Національний університет радіоелектроніки, Харків.