

Декодування стирань в паралельних циклічних кодах

Василь Семеренко, Ольга Тарасова, Сергій Луцков
кафедра обчислювальної техніки,
Вінницький національний технічний університет
Вінниця, Україна
vpsemerenko@ukr.net

Decoding the erasures in parallel cyclic codes

Vasyl Semerenko, Olga Tarasova, Sergiy Lutskov
Department of Computer Technique
Vinnytsia National Technical University
Vinnytsia, Ukraine,
vpsemerenko@ukr.net

Анотація — Розглядається декодування пакетів стирань в багатоканальних системах зв'язку на основі теорії паралельних лінійних послідовнісних схем (ЛПС). Пропонується метод ітеративного декодування паралельних циклічних кодів на основі степеневих перестановки.

Abstract — The decoding with burst of erasures in multichannel transmission systems based on the theory of parallel linear finite-state machine (LFSM) is considered. The method of iterative decoding of the parallel cyclic codes with the help of power permutation is suggested.

Ключові слова — циклічні коди; лінійна послідовнісна схема; ітеративне декодування; пакети стирань

Keywords — cyclic codes; linear finite-state machine (LFSM); iterative decoding; erasure burst errors

I. ВСТУП

Шеннонівська теорія завадостійкого кодування [1] теоретично узагальнила рівень розвитку засобів зв'язку середини 20 століття, для якого були характерні такі особливості:

- послідовне надходження даних,
- випадковий спосіб появи помилок в каналі,
- зменшення ймовірності появи помилок зі збільшенням кратності помилки,
- відсутність пам'яті в каналі зв'язку.

За останні десятиріччя з'явилися нові типи зв'язку, зокрема, безпроводний і мобільний зв'язок, теоретичною моделлю яких стали канали з пам'яттю. Характерною особливістю таких каналів стали нові типи помилок (стирання,

пропадання символів), які часто групуються, тобто об'єднуються в пакети.

Численні дослідження показали, що в результаті опромінення світлом і радіацією динамічної напівпровідникової пам'яті в ній виникають багаторозрядні стирання даних [2,3]. Тому актуальною стала задача подальшого розвитку завадостійких кодів з врахуванням сучасного стану розвитку засобів зв'язку.

Мета цієї роботи – розробка ефективних алгоритмів декодування пакетів стирань в багатоканальних системах зв'язку на основі математичного апарату лінійних послідовнісних схем.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПАРАЛЕЛЬНИХ ЦИКЛІЧНИХ КОДІВ

В сучасних багатоканальних системах передачі даних реалізована паралельна передача даних: біти одного байту або слова (2, 4, 8 байт) поступають одночасно. Кожний байт або слово можна інтерпретувати як один ρ -бітовий символ ($\rho = 8, 16, 32, 64$). Таким чином, передачу даних будемо розглядати як передачу бітів даних по ρ паралельним каналам. Такий спосіб передавання даних є символно-паралельним згідно [4].

Послідовність з m символів будемо розглядати як кодове слово циклічного коду, яке формується кодером на боці передавача та декодується декодером на боці приймача. В цьому випадку знадобляться математичні перетворення тільки в двійкових полях Галуа $GF(2)$.

Такий спосіб інтерпретації даних означає, що паралельний циклічний код складається з ρ кодових слів z_i ($i = 1 \dots \rho$), об'єднаних в кодову матрицю:

$$Z_{(\rho)} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_\rho \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{\rho 1} & z_{\rho 2} & \dots & z_{\rho n} \end{bmatrix}, GF(2). \quad (1)$$

Можливі два типи паралельних циклічних кодів: складені та інтегровані [5].

В подальшому будемо використовувати лише складені паралельні циклічні коди. Кожний рядок кодової матриці (1) такого коду представляє собою звичайний циклічний (n, k) -код. Тому для кодування складеного паралельного (n, k, ρ) -коду необхідно ρ традиційних кодерів циклічного (n, k) -коду, які працюють паралельно, тобто одночасно.

Як математичну модель циклічних кодів будемо використовувати автоматну модель [6], яка базується на теорії лінійних послідовнісних схем (ЛПС). Згідно [7], ЛПС – це лінійний скінчений автомат з ρ входами, m виходами і r комірками пам'яті. Найпростішою апаратною реалізацією ЛПС є звичайний регістр зсуву з лінійним оберненим зв'язком.

Теоретичною основою паралельних циклічних кодів при декодуванні кодової матриці (1) може бути паралельна ЛПС, функціонування якої визначається функцією станів (переходів)

$$S(t+1) = A \times S(t) + B_{(\rho)} \times Z_{(\rho)}(t), \quad GF(2) \quad (2)$$

де t – дискретний час, $A = \|a_{ij}\|_{r \times r}$, $B_{(\rho)} = \|b_{ij}\|_{r \times \rho}$ – характеристичні матриці ЛПС, $S = \|s_i\|_r$ – слово стану, $Z_{(\rho)} = \|z_{ij}\|_{\rho \times \rho}$ – вхідне слово.

Матриця A визначає внутрішню структуру ЛПС. Серед різних типів ЛПС найбільш розповсюдженою є рекурсивна ЛПС типу 1 (типу Галуа) з матрицею

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & g_0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & g_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & \dots & g_{r-2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & g_{r-1} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Елементи останнього стовпця матриці A із (3) представляють собою коефіцієнти породжувального поліному

$$g(x) = g_0 + g_1 x + \dots + g_{r-1} x^{r-1} + x^r, \quad GF(2). \quad (4)$$

Для декодування складеного паралельного (n, k, ρ) -коду знадобиться один декодер (паралельний декодер), побудований на основі характеристичних матриць A і $B_{(\rho)}$ (рис.1).

Вхідні дані паралельного коду поступають по паралельних каналах, тому необхідно використовувати багатовходову ЛПС. Максимальна кількість каналів, яка може бути представлена з використанням математичного апарату ЛПС, дорівнює r , тому далі будемо розглядати складений паралельний циклічний (n, k, r) -код, кодові слова якого поступають по r входам (каналам), а його кодова матриця (1) містить r рядків ($r = \rho$). Для опису структури входів ЛПС використовується характеристична матриця $B_{(r)}$, тому у випадку r -входової паралельної ЛПС над полем $GF(2)$ має бути така одинична $(r \times r)$ -матриця B :

$$B_{(r)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

3. ПРИНЦИПИ ДЕКОДУВАННЯ СТИРАНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ПАРАЛЕЛЬНИХ ЦИКЛІЧНИХ КОДІВ

Розряди кодової матриці (1), яка формується передавачем, можуть приймати значення з множини $M = \{0, 1\}$. Розряди кодової матриці (1), яка формується на виході демодулятора на боці приймача, можуть приймати значення з множини $M_x = \{0, 1, x, \bar{x}\}$. Символи x та \bar{x} будемо використовувати для позначення стираних відповідних розрядів.

Для виконання операцій над кодовою матрицею (1) з використанням ЛПС в алфавіті значень множини M_x необхідно перейти від поля Галуа до іншої алгебраїчної структури – комутативного кільця R з відповідними операціями додавання і множення [6].

Якщо у різних рядках кодової матриці (1) може зустрічатись до m стираних, тоді необхідно розрізняти значення кожного стирання, тобто використовувати розширений алфавіт значень множини $M_{ext} = \{0, 1, x_1, x_1, \dots, x_m, x_m\}$.

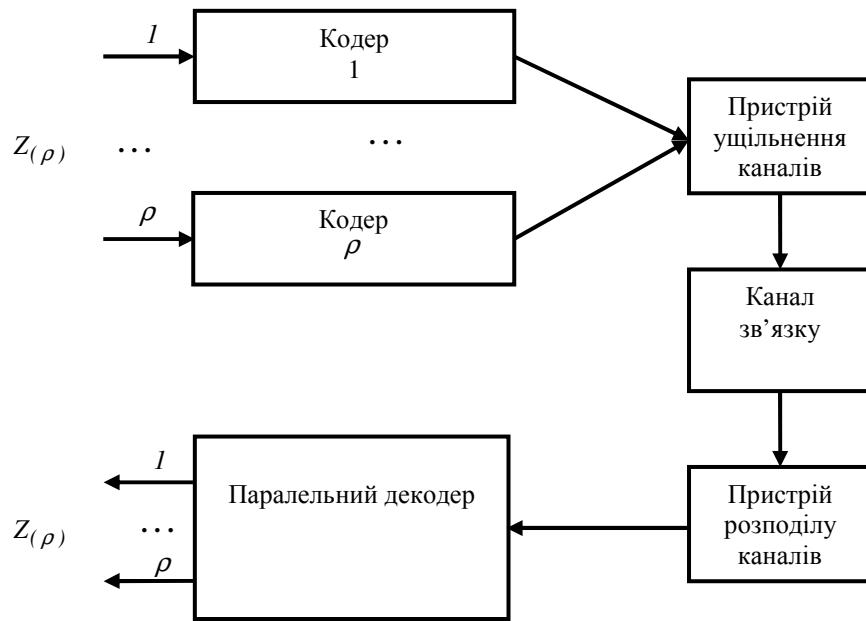


Рис. 1. Апаратна реалізація складеного паралельного циклічного коду

В загальному випадку, окрім випадкових стирань, можуть зустрічатись також традиційні помилки типу логічної інверсії.

В результаті декодування всіх зазначених помилок буде отримано слово помилки $S_{err}(n)$ згідно (2), яке буде містити як ненульові, так і невизначені значення x або \bar{x} . Для виявлення кожного типу помилок виконується окрема процедура, зокрема для випадкових стирань необхідно розв'язати алгебраїчну систему рівнянь методом Гауса.

Розглянемо окремо тип помилок, які ефективно декодуються за допомогою паралельних циклічних кодів – пакети стирань в кодовій матриці (1).

ОЗНАЧЕННЯ 1. Циклічним розрідженим пакетом Δ_{any}^{ers} стирань складеного паралельного циклічного (n, k, r) -коду називається такий тип помилок, коли з j -го по $((j+r-1) \bmod n)$ -й розряди i -го рядка кодової матриці (1) можуть бути як стерті, так і безпомилкові символи.

ОЗНАЧЕННЯ 2. Циклічним суцільним пакетом Δ_{sol}^{ers} стирань складеного паралельного циклічного (n, k, r) -коду називається такий тип помилок, коли з j -го по $((j+r-1) \bmod n)$ -й розряди i -го рядка кодової матриці (1) розташовані лише стерті символи.

Як впливає з наведених означень розглядатися пакети стирань довжини $\rho = r$.

Як і для одно каналного зв'язку, розріджений пакет Δ_{any}^{ers} стирань можна також розглядати як деяку сукупність стертих символів і декодувати кожний стертий символ окремо. В цьому випадку коректуюча здатність коду буде обмежена мінімальною кодовою відстанню цього коду.

Можна також декодувати розріджений пакет Δ_{any}^{ers} стирань подібно декодуванню пакетів інверсних помилок. Тоді коректуюча здатність коду буде обмежена відомою границею Рейгера [8], згідно якої максимальна довжина виправленого пакету помилок не повинна перевищувати половині розрядності синдрому, тобто $r/2$.

І лише для циклічних суцільних пакетів Δ_{sol}^{ers} стирань максимальна довжина виправленого пакету дорівнює розрядності синдрому, тобто r [9]. Тому доцільно розріджені пакети стирань переводити в суцільні пакети стирань. Саме з цих міркувань далі розглядаються лише суцільні пакети стирань (рис.2, символом "X" позначено стерті розряди).

Для декодувань суцільний пакетів стирань зручним способом їх виявлення є заміна всіх стертих символів нулями. Це дає можливість виконувати всі математичні розрахунки в двійкових полях Галуа.

$z_{1,1}$	$z_{1,2}$	...	X	X	X	X	...	$z_{n-2,1}$	$z_{n-1,1}$	$z_{n,1}$
$z_{2,1}$	$z_{2,2}$	...	...	X	X	X	X	...	$z_{n-1,2}$	$z_{n,2}$
...	...	...	...	...	X	X	X	X	...	...
$z_{r,1}$	$z_{r,2}$	$z_{r,3}$	$z_{r,4}$	$z_{r,5}$	...	X	X	X	X	$z_{n,r}$

Рис.2 Суцільний пакет стирань в кодовій матриці

4. ЛОКАЛІЗАЦІЯ СУЦІЛЬНИХ ПАКЕТІВ СТИРАНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ПАРАЛЕЛЬНИХ ЦИКЛІЧНИХ КОДІВ

Нехай в кожному каналі є суцільний пакет стирань довжиною r , причому в першому каналі пакет стирань починається в розряді j , а в кожному наступному каналі початок пакету зсувається на один розряд ($j = 1 + n$).

В результаті, в i -му каналі суцільний пакет стирань Δ_{sol}^{ers} починається в розряді $(j+i-1) \bmod n$, а закінчується в розряді $(j+r+i-2) \bmod n$. Тоді має місце така теорема.

ТЕОРЕМА 1. Якщо в складеному паралельному циклічному (n, k, r) -коді суцільний пакет стирань Δ_{sol}^{ers} довжиною r починається в розряді $n-r+1$, тоді після подачі на вхід ЛПС, яка знаходиться в нульовому початковому стані $S(0)$, кодової матриці (1), значення слова стану $S(n)$ ЛПС буде дорівнювати r стертим символам в першому рядку кодової матриці (1).

Доведення. Після подачі на вхід ЛПС, яка знаходиться в нульовому початковому стані $S(0)$, кодової матриці (1) без помилок, знову отримаємо нульовий стан ЛПС: $S(n) = S(0)$. Після заміни стертих позицій r старших розрядів першого рядка кодової матриці (1) нулями отримаємо кодову матрицю (1), в якій частина зазначених розрядів буде помилковою. При наявності інверсних помилок в контрольних r розрядах кодової матриці (1) їх значення будуть міститись в розрядах слова стану $S(n)$, тобто синдрому помилки $S_{err}^{(\tau)}(n)$.

Для виправлення зазначених стертих розрядів достатньо записати на їх місце отриманий синдром інверсної помилки $S_{err}^{(\tau)}(n)$ (в транспонованому вигляді: перший розряд синдрому записується в n -й розряд першого рядка кодової матриці).

Теорему 1 можна узагальнити на випадок, коли пакет стирань може знаходитися в будь-якому місці i -го рядка кодової матриці (1).

ТЕОРЕМА 2. Якщо в складеному паралельному циклічному (n, k) -коді суцільний пакет стирань Δ_{sol}^{ers} довжиною r починається в розряді j i -го рядка кодової матриці (1), тоді після подачі на вхід ЛПС, яка знаходиться в нульовому початковому стані $S(0)$, кодової матриці (1), а потім нульового слова довжиною ϑ ($\vartheta = (j+r+i-2)$), значення слова стану $S(n+\vartheta)$ буде дорівнювати r стертим символам в i -му рядку кодової матриці (1).

Для виправлення зазначених стертих розрядів достатньо записати на їх місце отриманий синдром помилки $S(n+\vartheta)$.

Основною проблемою, яка виникає при декодуванні паралельних циклічних кодів, є розрізнення помилок в різних каналах. Як показано в [5,6], сусідні помилки і пакети інверсних помилок однакової конфігурації, які розташовуються в сусідніх каналах з зсувом на один розряд, мають однаковий синдром помилок.

Схожа ситуація виникає і у випадку пакетів стирань після заміни їх нулями. Тоді такий пакет з нулями, який розташований в i -му рядку кодової матриці (1) з початком в розряді j , має однаковий синдром помилок з пакетом нулів, який розташований в $(i+1)$ -му рядку кодової матриці (1) з початком в розряді $j+1$.

Однак, у випадку стирань ми вже знаємо область пошкоджених розрядів, тому можна точно ідентифікувати номер каналу. Проблема виникає лише тоді коли мають місце діагональні стирання в одночасно в кількох каналах, причому кількість пошкоджених каналів парна (наприклад, як на рис.2). В цьому випадку внаслідок взаємної компенсації стирань можна отримати нульовий синдром.

Звичайно, точно ідентифікувати всі стерті розряди в таких каналах неможливо. Можна лише встановити факт такого великого пошкодження даних в каналах, що теж важливо.

Підвищити коректувальну здатність коду можна за допомогою ступеневої перестановки кодової матриці (1).

5. СТУПЕНЕВА ПЕРЕСТАНОВКА В ПАРАЛЕЛЬНИХ ЦИКЛІЧНИХ КОДАХ

Розглянутий метод локалізації пакетів стирань передбачає, що всі стерті розряди знаходяться в межах r розрядів будь-якого рядка кодової матриці (1), тобто в межах деякого r -розрядного контрольного вікна Δ . На практиці ця умова не завжди виконується.

Тому постає проблема такої перестановки кодової матриці (1), щоб всі помилкові розряди попали в межі контрольного вікна Δ . Ця проблема ефективно вирішується за допомогою операції ступеневої перестановки.

Ще з робіт Прейнджа [10] відомо, що коли породжувальний поліном $g(x)$ циклічного коду ділить кодовий поліном $f(x)$, то він буде ділити також і поліном, символи якого переставлені у відповідності до правил:

$$i \rightarrow (2^v i) \bmod n \text{ або } i \rightarrow (i + v) \bmod n, \text{ GF}(2^m).$$

Отже, при відсутності помилок поліном $f(2^v x)$ також буде кодовим. А при наявності помилок результат ділення $f(x)$ на $g(x)$ дасть одну конфігурацію помилкових розрядів кодового слова, а результат ділення полінома з перестановками на $g(x)$ – зовсім іншу конфігурацію.

Ця властивість традиційних циклічних кодів має місце і у випадку складених паралельних циклічних кодів. В найпростішому варіанті ступенева перестановка полягає в тому, що спочатку записуються непарні стовпці кодової матриці (1), а потім – парні (можна починати і з парних розрядів). В результаті отримуємо першу ітерацію переставленої кодової матриці $Z_{(\rho)}^{(1)}$.

Аналогічним чином можна зробити наступні ітерації перестановок і знайти такий варіант, коли всі стерті розряди попадуть в межі контрольного вікна Δ хоча б одного рядка кодової матриці (1). Далі необхідно виправити стерті розряди вікна Δ і через обернені перестановки повернутись в початковий стан кодової матриці (1).

Звичайно, бажано мати велику кількість можливих перестановок, а ця задача вирішується оптимальним вибором породжувального поліному (4) паралельного циклічного коду.

6. ВИСНОВКИ

Багатоканальний зв'язок знаходить все більше застосування в різних сферах: в оптоволоконних системах передачі даних, в комп'ютерних мережах тощо. Оптимальними кодами для завадостійкого кодування при багатоканальному зв'язку є паралельні циклічні коди. Теоретичною основою таких кодів може бути теорія паралельних ЛПС. Тоді можна використати синдромний принцип декодування, що зручно для представлення пакетів стирань розрядів кодової матриці.

Основною тенденцією сучасного розвитку в завадостійких кодах є використання ітеративного (багатокрокового) декодування. Пропонується метод ітеративного декодування паралельних циклічних кодів на основі ступеневої перестановки. На відміну від відомих ітеративних кодів, запропоновані коди базуються лише на основі "жорстких рішень" (hard decision) при декодуванні, що дозволяє суттєво підвищити продуктивність роботи та використовувати прості апаратно-програмні засоби.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] К. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. – М. : Изд-во иностр. лит., 1963. – 829 с.
- [2] E. Fujiwara, Code Design for Dependable Systems. Theory and Practical Applications. USA: John Willy & Sons, Inc.,
- [3] Lylod W. Massengil, "Cosmic and Terrestrial Single Event Radian Effects in Dynamic Random Access Memories," *IEEE Trans. on Nuclear Science*, vol 43, No 2, pp. 576-593, April 1996.
- [4] V. P. Semerenko, "The Theory of Parallel CRC Codes Based on Automaton Models," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, issue 9 (84), pp. 45–55, 2016.
- [5] В. П. Семеренко, "Паралельні циклічні коди," *Вісник ВПІ*. – № 6. – 2014. – С. 65–72.
- [6] В. П. Семеренко, Теорія циклічних кодів на основі автоматних моделей : монографія. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 444 с.
- [7] A. Gill, Linear Sequential Circuits. Analysis, Synthesis and Application. New York, London: McGraw-Hill Book Company, 1967.
- [8] Р. Блейхут, Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. – М. : Мир, 1986. – 576 с.
- [9] M. Fossorier, "Universal burst error correction," in *Proc. IEEE Int. Symp. Information Theory*, Seattle, WA, pp. 1969–1973, Jul. 2006.
- [10] Дж. Кларк мл., Дж. Кейн Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи. М. : Радио и связь, 1987. – 392 с.