



[DOI 10.28925/2663-4023.2024.24.9098](https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.24.9098)

УДК 004.94

Гаджиєв Матін Магсуд-Огли

д.т.н. професор, в.о. завідувача кафедри Інженерії програмного забезпечення
Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0001-7280-3863

gadjievmm@ukr.net

Назаренко Олександр Аскольдович

к.ф.-м.н., доцент, ректор ДУІТЗ
Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0002-0187-0791

duitz.od@gmail.com

Калініна Тетяна Олександрівна

к.т.н., доцент кафедри Інженерії програмного забезпечення
Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0002-3184-3604

kalininat384@gmail.com

Кочеткова Марина Вікторівна

викладач кафедри Інженерії програмного забезпечення
Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, Одеса, Україна
ORCID ID: 0009-0006-3189-4002

jubdvg@gmail.com

Петрович Янна Олександрівна

викладач кафедри Інженерії програмного забезпечення
Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, Одеса, Україна
ORCID ID: 0009-0008-8939-2333

yanna-petrovich@ukr.net

АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ ФОРМУВАННЯ КОДОВИХ КОНСТРУКЦІЙ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЯКІСТЬ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Анотація. Досягнення найкращих якісних показників передачі по каналах сучасних систем зв'язку завжди має актуальне значення для розробників та користувачів інфокомунікаційних систем. При цьому для забезпечення високої достовірності та продуктивності передачі можна використовувати різні методи кодування та способи перетворення даних, що передаються. Відповідно кожен із запропонованих методів обробки даних має свої переваги та недоліки, що визначає їх привабливість або обмеження застосування для даних, що передаються. У цій роботі проведено аналіз алгоритмів формування сигнальних кодових конструкцій традиційних перешкодостійких позиційних кодів, кодів з парним числом одиниць та 9-елементного коду Хеммінга. Класичне позиційне кодування поступається такими важливими параметрами передачі даних, як інформаційна ємність і ентропія. Однак, у деяких випадках, наприклад коли на результати обчислень якісних параметрів передачі даних значною мірою впливає використовувана мова текстової інформації, що передається, або обсяг аналізованого тексту (вплив швидше за все буде помітний в окремих випадках, а не в загальному), то важливе значення набуває можливість застосування певного/адаптованого типу кодування даних, що передаються. У статті проведено теоретичні дослідження та розраховано основні якісні параметри досліджуваних кодових конструкцій для різних вихідних умов. Проведено порівняльний аналіз та оцінка впливу досліджуваних параметрів на якість передачі даних. Проведені теоретичні дослідження показують, що за певних умов позиційне кодування забезпечує значний вигравш за основними якісними показниками обробки даних і може бути успішно застосовано для кодування та передачі цифрових даних по каналах сучасних систем передачі інформації. Для практичного



підтвердження достовірності отриманих результатів слід провести відповідні дослідження, наприклад, з імітацією на програмній моделі віртуальної системи передачі з різними принципами кодування на сучасних обчислювальних системах.

Ключові слова: дані; алгоритми обробки даних; код Хеммінгу; позиційний код; інформаційний елемент; кодування; кодові конструкції; завадостійкість.

ВСТУП

Класичні дослідження в галузі теорії зв'язку відкрили перед інженерами та розробниками нові та зовсім несподівані шляхи підвищення завадостійкості прийому повідомлень без необхідності використання на лініях зв'язку потужних передавачів за рахунок застосування перешкодостійких кодів. В результаті кодування повідомлень помилки, що з'явилися на виході декодерів, можуть бути виправлені. При цьому важливим є вибір параметрів коду. Одночасно застосування завадостійких кодів дозволяє знизити вимоги до надійності прийому сигналів на виході декодера і тим самим знизити енергетику лінії зв'язку [1].

Розробці ефективних алгоритмів формування завадостійких кодів і методів їх декодування присвячено величезну кількість робіт [2] – [6]. Одним із перших завадостійких блоковий код запропонував американський вчений Хеммінг у 1947 році. Цей код відносився до класу лінійних, позиційних кодів і міг виправити лише одноразову помилку прийнятої кодової комбінації.

Ці роботи, а також класичні дослідження в галузі передачі-прийому даних, показали, що тільки при великій довжині кодових комбінацій (КК) коди можуть забезпечити як завгодно високу завадостійкість прийому сигналів. В результаті було проведено численні дослідження та запропоновано алгоритми побудови ефективних кодових конструкцій у галузі теорії кодування. Таким чином, у другій половині ХХ століття було запропоновано численні конструкції кодів, що дозволяють виправляти багаторазові помилки у КК [4] – [6]. Їх застосування давало змогу отримати відчутний енергетичний вигравш у потужності передавачів у порівнянні з системами, в яких кодування не використовувалося. Такі коди знайшли практичне застосування в багатьох системах зв'язку, і в результаті з'явилася можливість передавати повідомлення з високою надійністю за зниженої потужності передавача.

Надалі відбувався швидкий розвиток теорії кодування. Основні цілі при цьому були спрямовані на розробку конструкцій довгих кодів, які б мали певну кодову швидкість, а відстань Хеммінга між найближчими кодовими комбінаціями була максимально можливою. При цьому ефективними є такі конструкції кодів, у яких зі збільшенням їх довжини частка помилок, що виправляються, збільшується. Саме такі коди дозволяють, згідно з класичною теорією, досягти високої надійності прийому повідомлень за рахунок збільшення довжини коду без підвищення потужності передавача. Структура завадостійкого коду має бути регулярною для того, щоб було можливо досить просто реалізувати алгоритми кодування повідомлень та декодування прийнятих КК. Регулярність структури коду має на увазі, що алгоритм формування КК, відповідних інформаційним послідовностям символів, що надходять на вхід кодера, відповідає певним математичним правилам і має бути досить простим.

Область застосування завадостійких кодів дуже велика. Вони застосовуються в системах фіксованого зв'язку (радіорелейних і супутникових), в системах рухомого зв'язку, у тому числі стільникових та бездротового доступу, в системах цифрового наземного



телевізійного, а також провідного вішання, в системах, в яких повідомлення передаються кабельними та оптоволоконними лініями зв'язку, та у багатьох інших системах [1], [4], [6].

Метою цієї статті є дослідження та порівняльний аналіз перспективних алгоритмів синтезу сигнальних кодових конструкцій найпростіших надлишкових кодів — а саме коду з парним числом одиниць та коду Хеммінгу. Проведено розрахунки основних якісних показників досліджуваних кодових конструкцій та проаналізовано їх вплив на умови передавання даних в інфокомунікаційних системах.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для якісної передачі сигналів каналами різних систем передачі інформації забезпечення високої достовірності і продуктивності передачі досягається за рахунок використання різних методів кодування і способів перетворення даних, що передаються. Відомо, що кодування в системах зв'язку здійснюється за одним із наступних принципів; за алфавітом сигналів (код сигналів); за алфавітом повідомлень (код повідомлень); і за загальним алфавітом одночасно [2] – [4]. Перший принцип передбачає перетворення одного алфавіту джерела повідомлень на інший, без формування сигналів, що зазвичай виробляється у самому джерелі. По-друге, сигнали одного типу перетворюються на сигнали другого типу, наприклад застосуванням процесів модуляції та утворення перешкодостійких надлишкових кодів [3] – [5].

У широкому розумінні кодування представляє суб'єктивну операцію в тому сенсі, що вибирається з урахуванням особливостей каналу: видом фазочастотної характеристики каналу (ФЧХ) та амплітудної (АЧХ). Тому процес кодування часто розглядають як операцію узгодження джерела із каналом зв'язку. При цьому відомо, що в каналі зв'язку крім сигналу джерела повідомлень діє багато видів різних перешкод, що призводить до істотної відмінності сигналів на вході і виході каналу. І зокрема для корекції спотворень використовують позиційні коригувальні коди, в кодових словах яких містяться інформаційні та додаткові елементи: останні формуються на основі « m » інформаційних елементів, синтезованих при різних поєднаннях інформаційних елементів. Слід зазначити, що позиційні коди мають низьку ефективність за рахунок великої частки додаткових елементів. Хеммінгом було введено в теорію кодування фундаментальне поняття — кодова відстань d_n між двома кодовими комбінаціями, що дорівнює кількості позицій коду, на яких у цих КК стоять різні символи. Вагою певної КК називають відстань між нею і КК, що складається з одних нулів. Величина d_n в лінійних кодах залежить від його довжини і числа позицій, що відводяться для передачі інформаційних символів. У свою чергу позиційне кодування є поданням числа N через коефіцієнти системи числення відповідної алфавіту каналу « a » (a — число стану інформаційного параметра), $N = d_n a^n + \dots + d_2 a^2 + d_1 a^1 + d_0 a^0$.

Кількість інформації в позиційних кодових словах (H) визначається кількістю інформаційних елементів у них. Існуючі системи зв'язку використовують надлишкові коди, у яких кожна комбінація містить s елементів інформаційних та r елементів додаткових (надлишкових) $n = m + r$ [3].

Наприклад, у коді з парним числом одиниць інформаційними є лише $(n - 1)$ елементів, а в 9-елементному коді Хеммінга міститься 5 інформаційних елементів і 4 перевірочних [4], отже, ентропія кожного кодового слова $H = 5$, а інформаційна ємність одного елемента $I_H = 5/9 = 0,5555\dots$



МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Проведемо аналіз та оцінку якісних параметрів коду з парним числом одиниць та 9-елементного коду Хеммінгу. Код з парним числом одиниць є одним із найпростіших систематичних надлишкових кодів, що мають мінімальну надмірність. Кожна його комбінація, крім m інформаційних елементів, має $(m + 1)$ елемент, який дорівнює «1», якщо число m парне, або «0», m якщо парне. Основними параметрами коду є:

1. Мінімальна кодова відстань d_{min} що визначається твірною матрицею [6],[10]

$$\begin{vmatrix} 1000 \dots 01 \\ 0100 \dots 01 \\ 000 \dots 01 \\ 0000 \dots 11 \end{vmatrix} \quad (1)$$

З матриці випливає, що кожен її рядок містить щонайменше двох одиниць, тобто, $d_{min} = 2$.

2. Коефіцієнт надмірності коду K_u визначається наступним чином:

$$K_u = \frac{r}{m+r}, \quad (2)$$

де m — кількість інформаційних елементів, r — кількість надлишкових елементів.

За умови, що $r = 1$, отримуємо таку формулу:

$$K_u = \frac{1}{m+1} \quad (3)$$

Тоді неважко обчислити [9], [12], що для $m \in [5 \dots 10]$ коефіцієнт K_u дорівнює:

Таблиця 1

Коефіцієнт надмірності від кількості інформаційних елементів

m	5	6	7	8	9	10
K_u	0,166	0,1428	0,125	0,111	0,1	0,09

3. Завадостійкість коду S_k :

$$S_k = \log \frac{1}{P_0} = \log \frac{1}{1-P_{np}}, \quad (4)$$

де P_{np} — вірогідність правильного прийому кодового слова, P_0 — вірогідність помилки.

Для каналу з незалежними помилками вірогідність правильного прийому всього кодового слова дорівнює [7]:

$$P_{np} = (1-P_0)^{m+1}. \quad (5)$$

Тоді,

$$S_k = \log \frac{1}{1-(1-P_0)^{m+1}}. \quad (6)$$



Розрахунок S_k для $m \in [5 \dots 10]$ представлений в табл. 2.

Таблиця 2

Значення S_k для кожного $m \in [5 \dots 10]$

m	5	6	7	8	9	10
S_k	2,22	2,156	2,098	2,047	2,00	1,96

З таблиці для значень S_k випливає, що зі збільшенням m стійкість до перешкод зменшується.

4. Коефіцієнт виявлення помилок K_{00} визначимо за формулою [8],

$$K_{00} = \frac{P_{00}}{P_{np}} = \frac{P_{np} - P_{np}}{1 - (1 - P_0)^{m+1}}, \quad (7)$$

де P_{00} — ймовірність виявлення помилок синтезуючим кодом.

Розраховані значення [11], [12] коефіцієнта виявлення помилок та ймовірності виявлення помилок зведемо до табл. 3.

Таблиця 3

Значення K_{00} і P_{00} для $m \in [5 \dots 10]$ при $P_0 = 10^{-3}$

m	5	6	7	8	9	10
K_{00}	1	0,997	0,9965	0,996	0,99	0,99
P_{00}	$1,49 \times 10^{-5}$	$2,08 \times 10^{-5}$	$2,8 \times 10^{-5}$	$3,57 \times 10^{-5}$	$4,46 \times 10^{-5}$	$5,45 \times 10^{-5}$

5. Швидкість передачі визначається:

$$R = \frac{m}{m+1} \quad (8)$$

Розраховані значення [11], [12] швидкості передачі зведені до табл. 4.

Таблиця 4

Значення R для кожного $m \in [5 \dots 10]$

m	5	6	7	8	9	10
R	0,83	0,85	0,87	0,888	0,9	0,909

Як і з таблиці R — кодова швидкість збільшується, зі збільшенням m .

Формування дев'ятиелементного коду Хеммінга

Код Хеммінга, який дозволяє виправляти помилки кратності P_n і повинен мати мінімальну кодову відстань $d_M = 2t_{H.O}$. Число елементів кодової комбінації n визначається нерівністю [3]

$$2^m = \frac{2n}{1+n} \quad (9)$$



Цей код будується з таким розрахунком, щоб кількість надлишкових елементів та кількість перевірок $n - m$ відповідали r перевірним сумах із «5» інформаційних елементів [4].

Кожна із сум як доданок включає інформаційні елементи:

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= a_1 + a_3 + a_5 + a_7 + a_9 \\ S_2 &= a_2 + a_3 + a_6 + a_7 \\ S_3 &= a_4 + a_5 + a_6 + a_7 \\ S_4 &= a_8 + a_9 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

У рівнянні (10) бере участь 9 елементів, номери яких у двійковому та десятковому кодах відповідають табл. 5:

Таблиця 5

Двійкові еквіваленти десяткових чисел

DEC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
BIN	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001	1010

З таблиці слідує, що послідовність використання номерів елементів a_i в рівняннях (10):

- у першій сумі беруть участь номери, що мають «1» у двійковому вигляді на першій позиції зліва;
- у другій сумі беруть участь елементи, які мають «1» на другій позиції зліва та і т.д.

Подаємо ці закономірності у вигляді таблиці.

У табл. 6 знаком «+» показані номери кодових елементів, що беруть участь у певних сумах у рівнянні (10):

Таблиця 6

Відповідність елементів до позицій у рівнянні (10)

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	+		+		+		+		+
2		+	+			+	+		
3				+	+	+	+		
4								+	+

Таким чином, проведені вище всі аналітичні дослідження та розрахунки також поширюються на випадок використання дев'ятиелементного коду Хеммінга з відповідними припущеннями. Теоретичні розрахунки показали, що динаміка зміни основних якісних параметрів передачі при цьому зберігається, відмінність полягає в незначних цифрових величинах.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

За результатами проведених теоретичних досліджень можна зробити такі основні висновки:

1. У позиційних кодах із збільшенням кількості інформаційних елементів коефіцієнт надмірності плавно падає.



2. Збільшення числа інформаційних елементів призводить до плавного зменшення завадостійкості коду.
3. Такі параметри як коефіцієнт виявлення помилки та ймовірність виявлення помилки у позиційних кодах практично не залежить від зміни кількості інформаційних елементів, хоча незначна динаміка до їхнього зменшення спостерігається.
4. У позиційних кодах швидкість передачі (кодова швидкість) зі збільшенням кількості інформаційних елементів зростає.
5. Збільшення числа перевірюваних елементів r у коді Хеммінга призводить до збільшення коефіцієнта виявлення та виправлення помилок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Рид, Р. (2005). *Основи теорії передачі інформації*. «Вільямс».
2. Захарченко, Н. В. (2018). *Інформаційні параметри позиційних і таймерних кодів*.
3. Захарченко, Н. В. (2009). *Повышение эффективности блочного кодирования при работе по нестационарным каналам*. Элм.
4. Рихтер, С. Г. (2010). *Кодирование и передача речи в цифровых системах подвижной связи*. «Горячая линия – Телеком».
5. Гусев, О. Ю. (2010). *Теорія електричного зв'язку*. «Магнолія 2006».
6. Захарченко, М. В. (2009). *Системи передавання даних*. Фенікс.
7. Hadzhyiev, M., Bahachuk, D., Nazarenko, A., Odegov, N., & Stepanov, D. (2023). Multiplex method of data transmission in residue class systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/9(126), 23–32.
8. Гаджиєв, М., Назаренко, О., Бабіч, Ю., Багачук, Д., & Глазунова, Л. (2023). Дослідження ефективних алгоритмів обробки даних для підвищення якості передачі інформації в інфокомунікаційних системах. *Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка»*, 4(20), 153–163. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.20.153163>
9. Кромєн, Т., Лейзерсон, Ч., & Ривест, Р. (2002). *Алгоритми: построение и анализ*. МЦНМО.
10. Буртняк, І. В. (2019). *Імітаційне моделювання*. Івано-Франківськ: ПНУ ім. В. Стефаніка.
11. *Scilab*. (n.d.). <https://www.scilab.org/>
12. Корн, Г. (1978). *Справочник по математике для научных работников и инженеров*. Наука.

**Matin Hadzhyiev**

Doctor of Sciences, Professor, Act. Head of the Department of Software Engineering
State University of Intellectual Technologies and Communication, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0001-7280-3863
gadjievmm@ukr.net

Aleksander Nazarenko

PhD, Associate Professor, Rector SUITC
State University of Intellectual Technologies and Communication, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-0187-0791
duitz.od@gmail.com

Kalinina Tetiana

PhD, Associate Professor of the Head of the Department of Software Engineering
State University of Intellectual Technologies and Communication, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-3184-3604
kalininat384@gmail.com

Marina Kochetkova

Lector of the Head of the Department of Software Engineering
State University of Intellectual Technologies and Communication, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0009-0006-3189-4002
jubdvg@gmail.com

Yanna Petrovich

Lector of the Head of the Department of Software Engineering
State University of Intellectual Technologies and Communication, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0009-0008-8939-2333
yanna-petrovich@ukr.net

ANALYSIS OF ALGORITHMS FOR THE FORMATION OF CODE STRUCTURES AFFECTING THE QUALITY OF DATA TRANSMISSION IN INFOCOMMUNICATION SYSTEMS

Abstract. Achieving the best quality indicators of transmission through the channels of modern communication systems is always of urgent importance for developers and users of information communication systems. At the same time, to ensure high transmission reliability and performance, various coding methods and methods of converting the transmitted data can be used. Accordingly, each of the proposed data processing methods has its advantages and disadvantages, which determines their attractiveness or application limitations for the data being transmitted. In this paper, the analysis of algorithms for forming signal code structures of traditional interference-resistant positional codes, codes with an even number of units, and a nine-element Hamming code is carried out. Classical positional coding is inferior in such important data transmission parameters as information capacity and entropy. However, in some cases, for example, when the results of data transfer quality parameters calculations are significantly influenced by the language of the transmitted textual information or the volume of the analyzed text (the influence is more likely to be noticeable in individual cases, and not in general), then an important value acquires the possibility of applying a certain/adapted type of encoding of the transmitted data. The article conducts theoretical research and calculates the main qualitative parameters of the studied code constructions for various initial conditions. A comparative analysis and assessment of the influence of the studied parameters on the quality of data transmission was carried out. Conducted theoretical studies show that, under certain conditions, positional coding provides a significant gain in the main quality indicators of data processing and can be successfully applied for coding and transmission of digital data through the channels of modern information transmission systems. In order to practically confirm the reliability of the obtained results, relevant studies should be conducted, for example, with simulation on a software model of a virtual transmission system with different coding principles on modern computer systems.



Keywords: data; data processing algorithms; Hamming code; position code; information element; coding; code structures; interference resistance.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Rid, R. (2005). *Osnovy teorii peredachi informacii*. "Vil'jams".
2. Zakharchenko, N. V. (2018). *Informacionnie parametri pozicionnich I taymernich kodov*.
3. Zakharchenko, N. V. (2009). *Povishenie effektivnosti blokovogo koduvannya pri roboti po nestacionarnim kanaliam*. Elm.
4. Rihter, S. G. (2010). *Kodirovanie i peredacha rechi v cifrovyyh sistemah podvishnoy svyazi*. "Gorjac.haja linija-Telekom".
5. Gusev, O. Ju., Konahovich, G. F., & Puzirenko, O. Ju. (2010). *Teorija elektrichnogo zv'jazku*. "Magnolija 2006".
6. Zakharchenko, N. V. (2009). *Sistemi peredavannya danix*. Feniks.
7. Hadzhyiev, M., Bahachuk, D., Nazarenko, A., Odegov, N., & Stepanov, D. (2023). Multiplex method of data transmission in residue class systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/9(126), 23–32.
8. Hadzhyiev, M., Nazarenko, A., Babich, Y., Bagachuk, D., & Glazunova, L. (2023). Researching of efficient data processing algorithms to increase the quality of information transfer in infocommunication systems. *Electronic Professional Scientific Journal "Cybersecurity: Education, Science, Technique"*, 4(20), 153–163. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.20.153163>
9. Kromen, T. Leyzerson, Ch., & Rivest, R. (2002). *Algoritmi: postroenie I analiz*. MCNMO.
10. Burtnyak, I. V. (2019). *Imitaciyne modelyuvannya*. Ivano-Frankivsk. PNU Stefanika B.
11. Scilab (n.d.). <https://www.scilab.org>
12. Korn, G. (1978). *Handbook of mathematics for scientists and engineers*. Nauka.



This work is licensed under Creative Commons Attribution-noncommercial-sharealike 4.0 International License.