

УДК 621.391

М.А. Штомпель

Український державний університет залізничного транспорту, Харків

## ПРИНЦИПИ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ БІОІНСPIРОВАНОГО МЕТОДУ ДЕКОДУВАННЯ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ЛІНІЙНИХ БЛОКОВИХ КОДІВ

Наведено формальне представлення задачі м'якого декодування лінійних блокових кодів з високою швидкістю кодування. Розглянуто основні етапи біоінспірованого методу декодування даних кодів. Запропоновані принципи програмної реалізації даного методу декодування високошвидкісних блокових кодів.

**Ключові слова:** блокові коди, біоінспіроване декодування, програмна реалізація, алгоритм.

### Вступ

#### Постановка проблеми та аналіз літератури.

Для забезпечення заданої достовірності передачі інформації у телекомунікаційних системах широко застосовуються лінійні блокові коди [1]. Перспективним напрямом розвитку методів декодування даних кодів є використання генетичних алгоритмів для пошуку найбільш ймовірного переданого кодового слова [2; 3]. У [4] запропоновано метод м'якого декодування лінійних блокових кодів на основі спільного використання інформації про надійність прийнятих символів та узагальненого біоінспірованого пошуку. При цьому процес декодування засновано на обробці елементів породжувальної матриці коду, що призводить до збільшення обчислювальної складності декодера для кодів високими швидкостями кодування. Тому для збільшення ефективності декодування високошвидкісних лінійних блокових кодів, що знаходять широке застосування у телекомунікаційних системах, було розроблено біоінспірований метод м'якого декодування на основі перевірконої матриці коду [5]. При цьому важливою задачею є розгляд питань, пов'язаних з програмною реалізацією даного методу декодування.

**Метою статті** є розробка принципів програмної реалізації біоінспірованого методу декодування лінійних блокових кодів з високою швидкістю кодування.

### Основна частина

Нехай задані прийнятий вектор м'яких рішень  $\bar{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  та перевірна матриця  $H$  лінійного блокового  $(n, k)$  коду. Тоді після формування на основі вектору  $\bar{y}$  відповідного двійкового вектору жорстких рішень  $\bar{r} = (r_1, r_2, \dots, r_n)$  можна обчислити синдром:

$$\bar{S} = \bar{r}H^T \pmod{2},$$

де  $H^T$  – транспонована перевірна матриця.

Нехай  $E(\bar{S})$  буде набором усіх двійкових векторів помилок  $\bar{e}$  для деякого синдрому  $\bar{S}$ , тоді фо-

рмально задачу м'якого декодування лінійних блокових кодів можна записати у вигляді оптимізаційної задачі:

$$f(\bar{e}^*) = \min_{\bar{e} \in E(\bar{S})} f(\bar{e}), \quad (1)$$

$$f(\bar{e}) = \sum_{j=1}^n e_j |y_j|, \quad (2)$$

$$S_i = \sum_{j=1}^n h_{i,j} r_j \equiv 0 \pmod{2}, \quad i \in [1, n-k], \quad (3)$$

$$k = \text{const}, \quad n = \text{const}, \quad e_j \in \{0, 1\}, \quad (4)$$

$$y_j \in [-\infty, +\infty], \quad r_j \in \{0, 1\}, \quad h_{i,j} \in \{0, 1\}, \quad (5)$$

де  $\bar{e}^*$  – глобальний (локальний) мінімум, що відповідає «найкращому» двійковому вектору помилок, що обирається у якості вектору помилок для переданого кодового слова;  $y_j$ ,  $r_j$ ,  $e_j$ ,  $S_i$  – елементи прийнятого вектору м'яких рішень, двійкового вектору жорстких рішень, двійкового вектору синдрому відповідно;  $h_{i,j}$  – елементи перевірконої матриці  $H$ .

З аналізу функції (2) та обмежень (3–5) випливає, що сформульована задача мінімізації (1) є задачею цілочислового нелінійного програмування (обмеження (3) представляє собою нелінійну функцію через виконання операцій у кінцевому полі).

Для зменшення обчислювальної складності даної оптимізаційної задачі необхідно врахувати, що функція (2) містить  $n$  змінних, що відповідають помилкам, з яких тільки  $n-k$  є незалежними. При цьому інші  $k$  змінних двійкового вектору помилок можна визначити, використовуючи  $n-k$  відомих елементів та алгебраїчну структуру коду, що визначається перевірконою матрицею  $H$ .

Тоді формування передбачуваного двійкового вектору помилок, на основі якого обчислюється функція (2), доцільно здійснювати наступним чином:

$$\tilde{e} = (\bar{e}', \bar{e}''),$$

де  $\bar{e}'$  – частковий двійковий вектор помилок;  $\bar{e}''$  – додатковий двійковий вектор.

При цьому складність знаходження глобально-го мінімуму цільової функції (2) є достатньо високою для довгих лінійних блокових кодів, тому на практиці достатньо отримати локальне (субоптимальне) рішення даної оптимізаційної задачі, що можливо буде глобальним мінімумом. З урахуванням цього у [5] запропоновано метод м'якого декодування лінійних блокових кодів з високими швидкостями кодування, що заснований на модифікації перевірконої матриці з урахуванням інформації про надійність елементів прийнятого вектору м'яких рішень та узагальнених біоінспірованих процедур пошукової оптимізації.

Основні етапи даного біоінспірованого методу м'якого декодування лінійних блокових кодів на основі перевірконої матриці наведено нижче.

Етап 1. Жорстке декодування прийнятого вектору м'яких рішень  $\bar{y}$ .

Етап 2. Знаходження найменш надійного базису  $H'_s = \pi(H)$ , що обчислюється за допомогою перестановок елементів перевірконої матриці  $H$  згідно інформації про надійність елементів прийнятого вектору м'яких рішень  $\bar{y}$ , та упорядкованого вектору жорстких рішень  $\bar{t} = \pi(\bar{t})$ .

Етап 3. Пошук з використанням узагальнених біоінспірованих процедур пошукової оптимізації передбачуваного двійкового вектору помилок  $\tilde{e} = (e_1, e_2, \dots, e_n)$ , що забезпечує мінімальне значення цільової функції (2).

Етап 4. Формування оцінки переданого кодового слова за допомогою зворотного відображення  $\hat{f} = \pi^{-1}(\bar{t} + \tilde{e}^*)$  та завершення процесу декодування.

Таким чином, у процесі декодування згідно даного методу спочатку здійснюється жорстке рішення на основі прийнятого вектору м'яких рішень  $\bar{y}$ , у результаті якого формується двійковий вектор  $\bar{t}$ . Якщо синдром для даного вектору дорівнює нулю, то приймається рішення, що вектор  $\bar{t}$  є переданим кодовим словом та процес декодування завершується. У протилежному випадку здійснюється формування найменш надійного базису перевірконої матриці  $H'_s$  з використанням інформації про надійність прийнятих символів. Далі відбувається пошук серед групи двійкових векторів помилок  $\tilde{e} = (e_1, e_2, \dots, e_n)$  з використанням узагальнених популяційних процедур пошукової оптимізації та інформації про їх синдроми. Після досягнення максимальної кількості ітерацій  $L_{max}$  визначається найбільш ймовірний вектор помилок  $\tilde{e}^*$ , що забезпечує найменше значення функції (2). Процес декодування завершується формуванням оцінки переданого кодового слова  $\hat{f}$  шляхом зворотного перетворення виправленого двійкового вектору  $\bar{t}$ .

З розглянутого вище випливає, що на відміну від методу декодування, представленого у [4], що оперує у  $k$ -мірному просторі, що визначається породжувальною матрицею лінійного блокового коду, представлений метод декодування заснований на операціях у  $n - k$ -мірному просторі, що визначається перевірконою матрицею. Таким чином, дані методи декодування є еквівалентними, а доцільність застосування кожного з них визначається швидкістю кодування конкретного коду.

Більш детально особливості представленого методу декодування лінійних блокових кодів розглянуто у [5].

На рис. 1 наведена схема біоінспірованого методу м'якого декодування високошвидкісних лінійних блокових кодів на основі перевірконої матриці, що забезпечує візуалізацію основних його етапів та кроків.

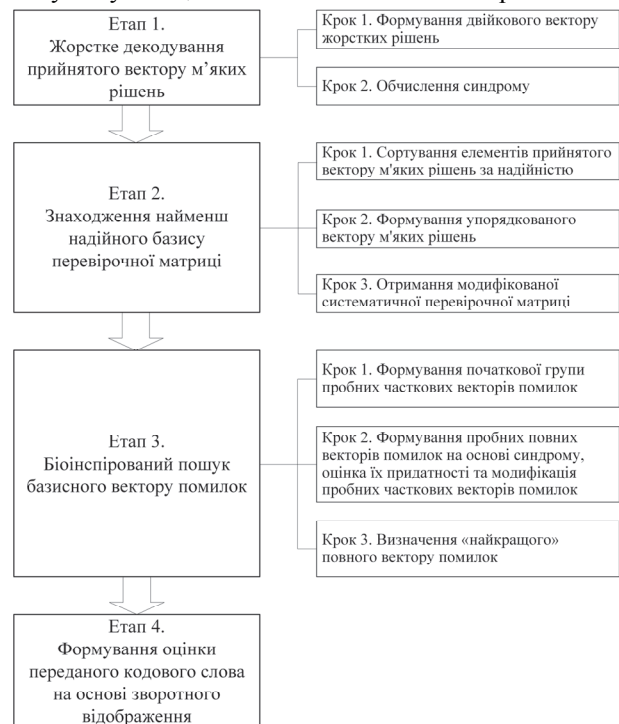


Рис. 1. Схема біоінспірованого методу м'якого декодування високошвидкісних блокових кодів

Виходячи з рис. 1, відмінністю даного методу декодування лінійних блокових кодів є застосування узагальненого біоінспірованого пошуку для визначення найбільш ймовірного базисного вектору помилок, що використовується для знаходження оцінки переданого кодового слова. При цьому інші етапи представленого методу декодування практично повністю відповідають [6]. Отже, обчислювальна складність даного методу декодування високошвидкісних лінійних блокових кодів значним чином залежить від застосовуваної біоінспірованої процедури та її параметрів. Тому при виборі конкретної біоінспірованої процедури необхідно враховувати параметри блокового коду, особливості каналу зв'язку, вимоги до ефективності декодування тощо.

Для програмної реалізації представленого біоінспірованого методу декодування лінійних блокових кодів запропоновані відповідні алгоритми, особливості та структура яких розглянуті нижче.

Схема алгоритму біоінспірованого м'якого декодування високошвидкісних лінійних блокових кодів, що заснований на використанні найменш надійного базису перевірконої матриці, наведена на рис. 2.

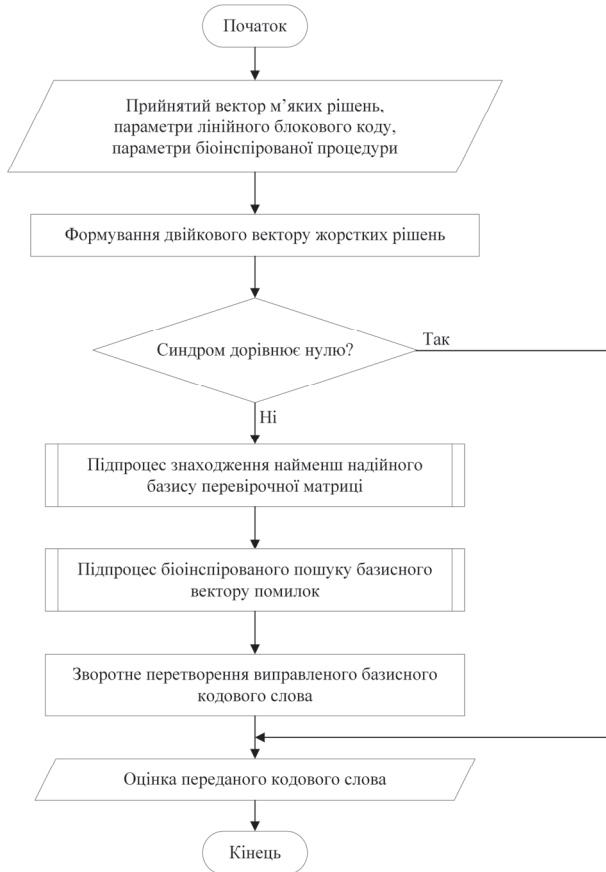


Рис. 2. Схема алгоритму біоінспірованого м'якого декодування високошвидкісних блокових кодів

З рис. 2 слідує, що у наведеному алгоритмі вхідними даними є прийнятий вектор м'яких рішень, параметри заданого лінійного блокового коду та параметри обраної біоінспірованої процедури. Даний алгоритм фактично має дві стадії: жорстке декодування та м'яке декодування. Спочатку робиться спроба здійснити декодування на основі двійкового вектору жорстких рішень та обчислення синдрому для нього. Потім у разі необхідності виконується м'яке декодування, що представляє собою послідовне виконання підпроцесу знаходження найменш надійного базису перевірконої матриці, підпроцесу біоінспірованого пошуку базисного двійкового вектору помилок та зворотного перетворення виправленого базисного кодового слова. На виході даний алгоритм формує оцінку найбільш ймовірного двійкового кодового слова, що обирається у якості переданого кодового слова.

Пояснення принципів реалізації підпроцесів основного алгоритму біоінспірованого м'якого декодування високошвидкісних лінійних блокових кодів наведено нижче.

Схема алгоритму підпроцесу знаходження найменш надійного базису перевірконої матриці представлена на рис. 3. Вхідними даними для даного алгоритму служать прийнятий вектор м'яких рішень та параметри обраного лінійного блокового коду. У першу чергу відбувається сортування елементів прийнятого вектору м'яких рішень відповідно до їх надійності, що визначається абсолютним значенням цих елементів. Потім здійснюються процеси формування модифікованої систематичної перевірконої матриці та визначення позицій часткового вектору помилок, які засновані на використанні наявної м'якої інформації у прийнятих символах. Наприкінці роботи алгоритму видаються такі вихідні дані: упорядковані вектори м'яких та жорстких рішень, позиції часткового вектору помилок та найменш надійний базис перевірконої матриці.

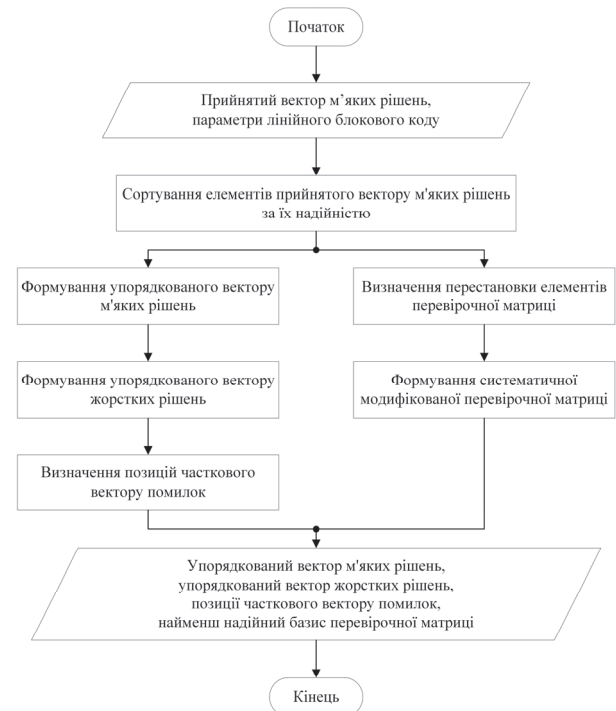


Рис. 3. Схема алгоритму підпроцесу знаходження найменш надійного базису перевірконої матриці

Вихідна інформація, що отримана у результаті виконання розглянутого вище підпроцесу, спільно з параметрами застосовуваної біоінспірованої процедури пошукової оптимізації служить вхідними даними для алгоритму підпроцесу біоінспірованого пошуку базисного вектору помилок. Даний алгоритм виконується задане число ітерацій та забезпечує знаходження базисного вектору помилок. Згідно даного алгоритму спочатку створюється початкова група пробних часткових векторів помилок, що складається з нульового вектору помилок та заданої кількості близьких до нього випадкових векторів. Після цього

формується повні вектори помилок на основі обчислення відповідних синдромів та відбувається оцінка якості даних векторів шляхом обчислення відповідної цільової функції, що заснована на інформації про найменш надійний базис перевірконої матриці. До досягнення максимальної кількості ітерацій здійснюється модифікація часткових векторів помилок шляхом застосування міграційних операторів обраної біоінспірованої процедури. Результатом роботи алгоритму є видача «найкращого» базисного вектору помилок, що в подальшому використовується для виправлення помилок в упорядкованому векторі жорстких рішень. Схема даного алгоритму наведена на рис. 4.

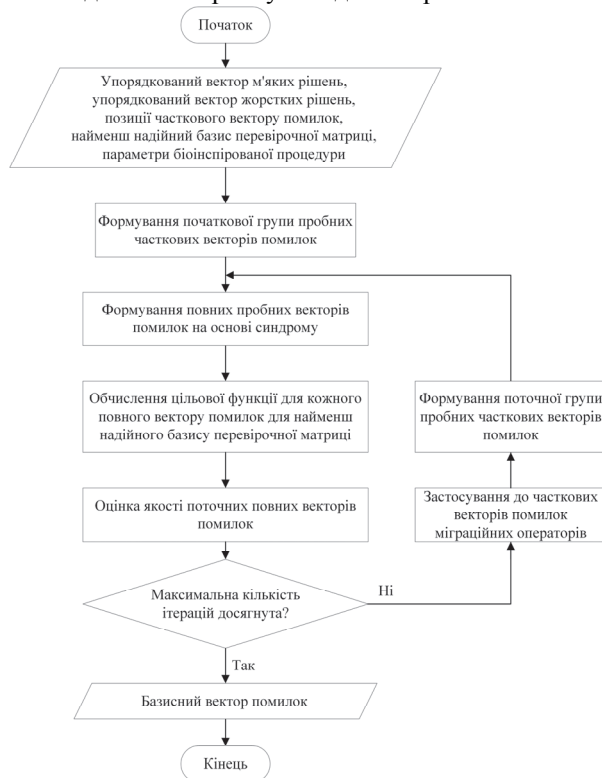


Рис. 4. Схема алгоритму підпроцесу біоінспірованого пошуку базисного вектору помилок

Таким чином, розроблені основний алгоритм та алгоритми допоміжних підпроцесів доцільно покласти в основу програмної реалізації біоінспірованого

методу м'якого декодування високошвидкісних лінійних блокових кодів.

## Висновки

Задачу м'якого декодування лінійних блокових кодів з високою швидкістю кодування формально можна представити у вигляді задачі цілочислового нелінійного програмування. Для ефективного вирішення даної оптимізаційної задачі доцільно використовувати біоінспірований підхід, що лежить в основі представленого методу декодування. Виходячи з основних етапів та кроків біоінспірованого методу декодування високошвидкісних лінійних блокових кодів, запропоновані принципи та наведені особливості його програмної реалізації.

## Список літератури

1. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение: пер. с англ. / Р. Морелос-Сарагоса. – М: Техносфера, 2005. – 320 с.
2. Maini H. Genetic Algorithms for Soft-Decision Decoding of Linear Block Codes / H. Maini, K. Mehrotra, C. Mohan and S. Ranka // Evolutionary Computation. – 1994. – Vol. 2, № 2. – P. 145-164.
3. Berbia H. Genetic Algorithm for Decoding Linear Codes over AWGN and Fading Channels / H. Berbia, F. Elbouanani, R. Romadi, H. Benazza, M. Belkasmii // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2011. – Vol. 30, № 1. – P. 35-41.
4. Жученко А.С. Метод декодирования линейных блоковых кодов на основе популяционных процедур поисковой оптимизации / А.С. Жученко, Н.Г. Панченко, С.В. Панченко, Н.А. Штомпель // Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті. – X: УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 2 (117). – С. 25-29.
5. Штомпель Н.А. Мягкое декодирование высокоскоростных блоковых кодов на основе популяционных процедур поисковой оптимизации / Н.А. Штомпель // Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті. – X: УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 4 (119). – С. 15-19.
6. Fossorier M.P.C. Reliability-Based Syndrome Decoding of Linear Block Codes / M.P.C. Fossorier, S. Lin, J. Snyders // IEEE Transactions on Information Theory. – 1998. – Vol. 44, № 1. – P. 388-398.

Надійшла до редколегії 24.03.2017

Рецензент: д-р техн. наук проф. С.І. Приходько, Український державний університет залізничного транспорту, Харків.

## ПРИНЦИПЫ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ БИОИНСПИРИРОВАННОГО МЕТОДА ДЕКОДИРОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЛИНЕЙНЫХ БЛОКОВЫХ КОДОВ

Н.А. Штомпель

Приведено формальное представление задачи мягкого декодирования линейных блоковых кодов с высокой скоростью кодирования. Рассмотрены основные этапы биоинспирированного метода декодирования данных кодов. Предложены принципы программной реализации данного метода декодирования высокоскоростных блоковых кодов.

**Ключевые слова:** блоковые коды, биоинспирированное декодирование, программная реализация, алгоритм.

## SOFTWARE IMPLEMENTATION PRINCIPLES OF BIOINSPIRED DECODING METHOD OF HIGH RATE LINEAR BLOCK CODES

M. Shtompel

The formal representation of the problem of soft decoding of linear block codes with a high coding rate is given. The main stages of the bioinspired decoding method of these codes are considered. The software implementation principles of this decoding method of high rate block codes are proposed.

**Keywords:** block codes, bioinspired decoding, software implementation, algorithm.