

УДК 004.415.3:621.396.6

DOI: 10.31673/2412-9070.2022.033438

В. В. КОЗЛОВСЬКИЙ¹, доктор техн. наук, професор;М. А. ШТОМПЕЛЬ², доктор техн. наук, професор;В. П. ЛИСЕЧКО², канд. техн. наук, доцент,¹ Національний авіаційний університет, Київ² Український державний університет залізничного транспорту, Харків

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ДЕКОДУВАННЯ БЛОКОВИХ КОДІВ НА ОСНОВІ ПРОЦЕДУРИ ДИФЕРЕНЦІЙНОЇ ЕВОЛЮЦІЇ

Запропоновано підхід до м'якого декодування блокових кодів, заснований на визначенні найбільш надійного базису породжувальної матриці та застосуванні процедури диференційної еволюції. Вибір цієї методики пошукової оптимізації здійснено в результаті проведеного аналізу особливостей та наявних обмежень процедур еволюційної оптимізації. Наведено схему та сутність основних етапів розробленого методу м'якого декодування блокових кодів. На першому етапі формується жорстке рішення та обчислюється синдром для прийнятого слова. Після цього здійснюється ранжування прийнятих символів за надійністю та перетворення породжувальної матриці блокового коду у відповідний найбільш надійний базис. Далі застосовується процедура диференційної еволюції для пошуку найімовірнішого переданого інформаційного повідомлення та відповідного двійкового кодового слова. Декодування завершується зворотним перетворенням знайденого найбільш імовірного двійкового кодового слова через переставлення потрібних елементів. Показано, що ключовим етапом декодування є пошук переданого кодового слова з використанням процедури диференційної еволюції, а формування найбільш надійного базису породжувальної матриці блокового коду дає змогу підвищити ефективність декодування. Щоб уможливити технічну реалізацію цього методу декодування, розроблено відповідний алгоритм та наведено основні його кроки. Результати роботи можуть бути використані в процесі впровадження технологій радіозв'язку нового покоління для підвищення вірогідності передавання службових повідомлень. Також рекомендовано використовувати здобуті результати під час розв'язання задачі декодування інших завадостійких кодових конструкцій, що використовуються в сучасних телекомунікаційних технологіях.

Ключові слова: радіозв'язок; декодування; блоковий код; оптимізація; диференційна еволюція.

ВСТУП

Упровадження новітніх телекомунікаційних послуг передбачає перехід до технологій радіозв'язку нового покоління. У таких системах радіозв'язку для передавання службових повідомлень передбачається окремий канал зв'язку [1]. При цьому вимоги щодо вірогідності передавання повідомлень у такому каналі є досить жорсткими, що потребує застосування завадостійких кодових конструкцій. Нині в більшості використовуваних технологій для цього задіюють блокові коди [2]. Ефективність застосування блокових кодів у системах радіозв'язку безпосередньо залежить від використовуваного методу декодування. М'яке декодування завадостійких кодів забезпечує високий енергетичний вигравш, але вимагає більших обчислювальних ресурсів [3].

Це зумовлює актуальність і потребу в подальших дослідженнях щодо пошуку ефективних методів м'якого декодування блокових кодів із прийнятною обчислювальною складністю.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Задача м'якого декодування двійкових блокових кодів може бути розв'язана з використанням таких підходів — евристичного та оптимізаційного.

Перший підхід передбачає розроблення деяких евристичних процедур, що застосовуються в процесі декодування. Наприклад, у [4] запропоновано механізм подвійного повторного кодування для обчислення кодових слів у процесі декодування за алгоритмом Чейза. Проведені у праці дослідження показали, що такий підхід є ефективним для систематичних блокових кодів спеціальної структури, а здобуті результати близькі до декодування за максимумом правдоподібності.

У [5] подано модифікацію методу декодування блокових кодів на основі адаптивного поширення довіри, що додає деяку кількість нестабільних елементів прийнятого слова під час оброблення перевіральної матриці. Крім того, у статті запропоновано застосовувати два варіанти планування для додаткового поліпшення характеристик декодування порівняно зі стандартним методом.

У [6] запропоновано метод пошуку підмножин під час обчислення синдромів, використання якого дає змогу підвищити ефективність декодування спеціального типу блокових кодів порівняно з алгебраїчним декодуванням.

Отже, можна дійти висновку, що даний підхід спрямовано на вдосконалення наявних методів декодування, що істотно обмежує його можливості.

© В. В. Козловський, М. А. Штомпель, В. П. Лисечко, 2022

Водночас у разі оптимізаційного підходу задачу м'якого декодування блокових кодів можна подати як оптимізаційну задачу, для розв'язання якої застосовуються сучасні процедури пошукової оптимізації.

Зокрема, у [7] розроблено метод декодування двійкових блокових кодів із використанням генетичного алгоритму для різних моделей каналу зв'язку. Показано, що ефективність та обчислювальна складність розглядуваного методу є прийнятною та може додатково регулюватися параметрами декодера.

У [8] даний підхід набув подальшого розвитку завдяки застосуванню компактного генетичного алгоритму зі збільшеним розміром турніру під час здійснення м'якого декодування блокових кодів. Проведений аналіз обчислювальної складності розроблених методів декодування показав, що наведені модифікації не вносять істотних обмежень та значно підвищують ефективність декодування для вибраних блокових кодів.

У [9] узагальнено підхід до декодування блокових кодів на основі популяційних процедур пошукової оптимізації, до яких, зокрема, належать генетичні алгоритми. У статті наведено математичні основи та розглянуто загальні етапи декодування блокових кодів, що дають змогу представити єдиний концептуальний підхід до застосування механізмів та процедур біоінспірованої оптимізації у цьому напрямі.

Проте в наведених працях не розглядається можливість застосування для декодування блокових кодів інших ефективних оптимізаційних процедур, зокрема процедури диференційної еволюції, тому цьому питанню присвячено дану статтю.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є вдосконалення і розроблення методу декодування блокових кодів із використанням процедури диференційної еволюції.

Для досягнення поставленої мети розв'язано такі завдання:

- проаналізовано процедури еволюційної оптимізації та визначено особливості їх реалізації та обмеження;
- запропоновано та обґрунтовано схему методу м'якого декодування блокових кодів на основі процедури диференційної еволюції;
- розроблено алгоритм м'якого декодування блокових кодів, заснований на диференційній еволюції.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Аналіз процедур еволюційної оптимізації

Двома основними процедурами еволюційної оптимізації є генетичні алгоритми та диференційна еволюція.

Головна ідея генетичних алгоритмів полягає у відтворенні принципів природної селекції та правила виживання найбільш пристосованих особин. У процесі оптимізації рішення подаються хромосомами. Процедура оптимізації передбачає генерування початкової популяції хромосом та її оновлення через застосування операторів селекції, кросовера та мутації. Обчислення якості та ранжування хромосом здійснюється ітеративно за вибраною фітнес-функцією. Після досягнення заданого критерію (наприклад, кількості ітерацій) визначається найкраща хромосома, що відповідає знайденому решению.

Під час диференційної еволюції для подання можливих рішень застосовуються вектори. За цією оптимізаційною процедурою спочатку формується популяція векторів та обчислюється якість початкових рішень на основі фітнес-функції. Після цього вибирається цільовий вектор та відповідно до нього генерується пробний вектор із використанням операторів мутації та кросовера. Селекція вектора для наступної популяції здійснюється оцінюванням якості цільового та пробного векторів. Такий процес виконується ітеративно та завершується формуванням найкращого вектора, який вибирається як відшукане рішення [10].

Результати порівняльного аналізу даних процедур наведено в таблиці.

Порівняльний аналіз процедур еволюційної оптимізації

Показник ефективності	Генетичні алгоритми	Диференційна еволюція
Потреба в ранжуванні рішень	Так	Ні
Вплив розміру популяції на тривалість обчислень	Експоненційний	Лінійний
Вплив найкращого рішення на популяцію	Середній	Низький
Погіршення середнього значення фітнес-функції	Ні	Так
Тенденція передчасної конвергенції	Середня	Низька
Щільність простору пошуку	Менша	Більша
Відшукування кращого рішення без локального пошуку	Менша	Більша
Розмір популяції	Високий	Низький
Швидкість конвергенції	Менша	Більша
Точність здобутих рішень	Менша	Більша
Обчислювальна складність	Висока	Середня

З аналізу даних (див. таблицю) випливає, що процедура диференційної еволюції має низку переваг порівняно з генетичними алгоритмами, що зумовлює доцільність її застосування як пошуковий механізм під час декодування блокових кодів.

Схема декодування блокових кодів на основі процедури диференційної еволюції

У [9] розглянуто формалізований підхід до м'якого декодування блокових кодів на основі математичного апарату стохастичної пошукової оптимізації. Показано, що задачу декодування заданого блокового коду доцільно подати у вигляді оптимізаційної задачі з відповідними обмеженнями та цільовою функцією. На основі проведеного аналізу цільової функції визначено, що задача декодування блокового коду є задачею нелінійного програмування. Беручи це до уваги, було репрезентовано концепцію, що дає змогу застосовувати різні процедури пошукової оптимізації для розв'язання даної оптимізаційної задачі. Водночас вибір оптимізаційної процедури здійснюється залежно від реальних умов та наявних обмежень щодо типу блокового коду, моделі каналу зв'язку, обчислювальної складності реалізації та інших факторів.

З огляду на наведені переваги процедури диференційної еволюції розглянемо основні етапи розробленого методу м'якого декодування блокових кодів на базі даної оптимізаційної процедури.

Етап 1. Формування жорсткого рішення та обчислення синдрому для прийнятого слова.

На цьому етапі здійснюється первинне оброблення прийнятого з каналу зв'язку сигналу та формування відповідного двійкового прийнятого слова. Далі для сформованого слова обчислюється синдром на основі перевіряльної матриці блокового коду. Якщо синдром дорівнює нулю, то процес декодування завершується та робиться висновок, що прийняте слово є кодовим словом даного блокового коду. В іншому разі переходимо до наступного етапу декодування, що використовує наявну інформацію про прийнятий сигнал (м'яке рішення).

Етап 2. Визначення найбільш надійного базису породжувальної матриці блокового коду.

Цей етап передбачає ранжування прийнятих символів за надійністю (чисельним значенням м'якого рішення) та перетворення породжувальної матриці блокового коду у відповідний найбільш надійний базис. У цьому разі перші позиції модифікованої породжувальної матриці відповідають надійним елементам прийнятого слова, а інші позиції — частині прийнятого слова, що може містити помилки з більш високою ймовірністю.

Етап 3. Застосування процедури диференційної еволюції для пошуку передбачуваного кодового слова.

На початку цього етапу формується перша популяція векторів рішень, застосованих під час старту процедури диференційної еволюції. До складу такої популяції входить найнадійніше інформаційне повідомлення, що визначається на основі перших позицій відсортованого прийнятого слова, та випадкові інформаційні повідомлення. Після цього формуються можливі кодові слова через множення відповідного інформаційного повідомлення на модифіковану породжувальну матрицю блокового коду. Якість векторів рішень (та відповідних кодових слів) обчислюється на основі фітнес-функції, що відповідає цільовій функції оптимізаційної задачі декодування. Далі згідно з процедурою диференційної еволюції до векторів рішень застосовуються оператори мутації, кросовера та селекції, у результаті чого формується нова популяція. У подальшому цей процес відбувається ітеративно доти, доки не виконається вибраний критерій зупинення обчислень. Кінцевим результатом є знайдене найбільш імовірне інформаційне повідомлення, що відповідає деякому модифікованому кодовому слову.

Етап 4. Формування оцінки переданого кодового слова на основі зворотного перетворення.

Цей етап передбачає визначення оцінки переданого кодового слова заданого блокового коду (та відповідного інформаційного повідомлення) завдяки здійсненню зворотного перетворення знайденого на попередньому етапі модифікованого кодового слова. Це відбувається з урахуванням структури використовуваного найбільш надійного базису породжувальної матриці блокового коду.

Для узагальнення розглядуваного підходу до декодування блокових кодів розроблено відповідну схему (рис. 1).

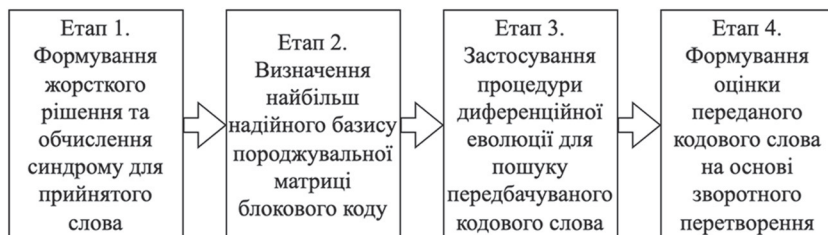


Рис. 1. Схема методу м'якого декодування блокових кодів на основі процедури диференційної еволюції

Слід зазначити, що у наведеному методі декодування блокових кодів ключовим є третій етап декодування, що фактично реалізує запропоновану логіку пошуку переданого кодового слова. Крім того, формування найбільш надійного базису породжувальної матриці блокового коду на другому етапі дає змогу додатково підвищити ефективність декодування завдяки формуванню та обробленню процедурою диференційної еволюції більш імовірних векторів рішень.

Алгоритм м'якого декодування блокових кодів, заснований на диференційній еволюції

Для технічної реалізації запропонованого методу декодування блокових кодів було розроблено відповідний алгоритм (рис. 2).

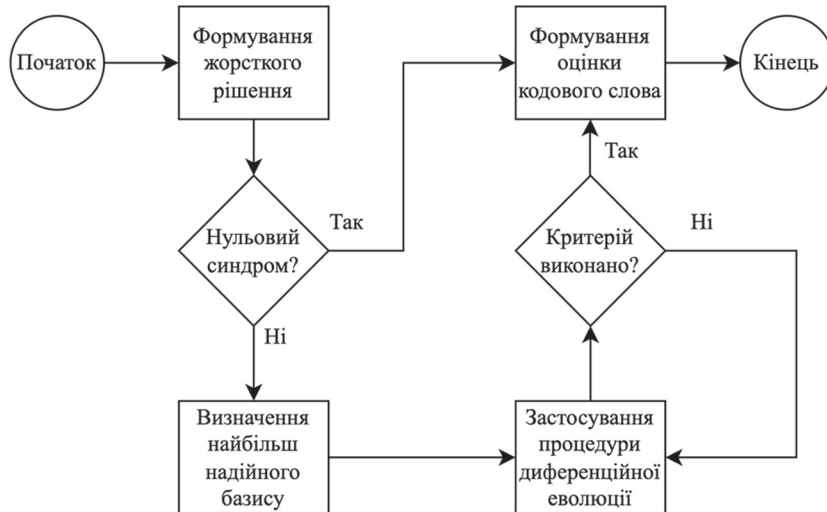


Рис. 2. Алгоритм м'якого декодування блокових кодів на основі процедури диференційної еволюції

Як вихідні дані для цього алгоритму було взято прийнятий сигнал, модель каналу зв'язку, параметри вибраного блокового коду та параметри процедури диференційної еволюції. Далі на основі прийнятого сигналу формується жорстке рішення, для якого обчислюється синдром. У разі нульового синдрому формується оцінка двійкового кодового слова на основі жорсткого декодування, в іншому разі — здійснюється перехід до м'якого декодування. Спочатку визначається найнадійніший базис із використанням м'якої інформації з прийнятого сигналу та переставлення елементів породжувальної матриці вибраного блокового коду. Після цього застосовується процедура диференційної еволюції для пошуку найбільш імовірного переданого інформаційного повідомлення та відповідного двійкового кодового слова. Такий пошук здійснюється ітеративним генеруванням популяції можливих інформаційних повідомлень із використанням операторів оптимізаційної процедури, формуванням відповідних кодових слів із застосуванням визначеного найбільш надійного базису та оцінюванням їх якості на основі обчислення заданої фітнес-функції. М'яке декодування завершується зворотним перетворенням знайденого найбільш імовірного двійкового кодового слова через переставлення відповідних елементів, здійсненого під час формування найбільш надійного базису. Вихідними даними цього алгоритму є сформована оцінка переданого двійкового кодового слова.

Результати дослідження методу декодування блокових кодів на основі процедури диференційної еволюції

Наведений метод декодування є частковим результатом узагальненого біоінспірованого підходу до декодування блокових кодів. Ключовою особливістю цього методу декодування є застосування як пошуковий механізм процедури диференційної еволюції. Розроблена схема та алгоритм декодування блокових кодів ілюструють загальну ідею запропонованого підходу та мають бути використанні в процесі практичної реалізації. У подальшому доцільно розробити програмну реалізацію та провести експериментальні дослідження ефективності даного методу декодування для заданих типів блокових кодів та вибраних моделей каналу зв'язку.

Висновки

У статті запропоновано метод м'якого декодування блокових кодів, заснований на визначенні найбільш надійного базису породжувальної матриці та застосуванні процедури диференційної еволюції. Вибір такої оптимізаційної процедури як пошуковий механізм обґрунтовано в результаті проведеного

аналізу особливостей та наявних обмежень процедур еволюційної оптимізації. Запропоновано схему та розглянуто сутність основних етапів методу м'якого декодування блокових кодів на основі процедури диференційної еволюції. З метою можливості технічної реалізації даного методу декодування розроблено відповідний алгоритм та наведено основні його кроки.

Результати статті можуть бути застосовані в процесі впровадження технологій радіозв'язку нового покоління для підвищення вірогідності передавання службових повідомлень. Також рекомендується послуговуватися здобутими результатами під час розв'язання задачі декодування інших завадостійких кодових конструкцій, що використовуються в сучасних телекомунікаційних технологіях.

Список використаної літератури

1. Saad W., Bennis M., Chen M. *A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems* // *IEEE Network*. 2020. Vol. 4, No 3. P. 134–142.
2. Toward 6G networks: Use cases and technologies / M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla [et al.] // *IEEE Communication Magazine*. 2020. Vol. 58, No 3. P. 55–61.
3. Ryan W., Lin S. *Channel codes: Classical and modern*. Cambridge University Press, 2009. 692 p.
4. Adde P., Toro D. G., Jago C. *Design of an efficient maximum likelihood soft decoder for systematic short block codes* // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2012. Vol. 60, No 7. P. 3914–3919.
5. *Perturbed adaptive belief propagation decoding for high-density parity-check codes* / L. Deng, Z. Liu, Y. L. Guan [et al.] // *IEEE Transactions on Communications*. 2021. Vol. 69, No 4. P. 2065–2079.
6. *On decoding of the (73, 37, 13) quadratic residue code* / Y. Li, H. Liu, Q. Chen, T.-K. Truong // *IEEE Transactions on Communications*. 2014. Vol. 62, No 8. P. 2615–2625.
7. *Genetic algorithm for decoding linear codes over awgn and fading channels* / H. Berbia, F. Elbouanani, R. Romadi [et al.] // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2011. Vol. 30, No 1. P. 35–41.
8. *Improved decoding of linear block codes using compact genetic algorithms with larger tournament size* / A. Berkani, A. Azouaoui, M. Belkasm, B. Aylaj // *International Journal of Computer Science Issues*. 2017. Vol. 14, No 1. P. 15 – 24.
9. *Метод декодування лінійних блокових кодів на основі популяційних процедур пошукової оптимізації* / А. С. Жученко, Н. Г. Панченко, С. В. Панченко, Н. А. Штомпель // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2016. Вип. 2 (117). С. 25–29.
10. Price K., Storn R. M., Lampinen J. A. *Differential evolution: A practical approach to global optimization*. Springer, 2005. 539 p.

V. V. Kozlovskiy, M. A. Shtompel, V. P. Lysechko

DEVELOPMENT OF METHOD OF DECODING BLOCK CODES BASED ON DIFFERENTIAL EVOLUTION PROCEDURE

The approach of soft decoding of block codes based on determining the most reliable basis of the generator matrix and applying the differential evolution procedure is proposed. The choice of this search optimization procedure was made as a result of the analysis of the features and limitations of evolutionary optimization procedures. The scheme and the essence of the main stages of the developed method of soft decoding of block codes are presented. At the first stage, a hard decision is formed and the received word syndrome is calculated. After that, the received symbols are ranked by reliability and the generator matrix of the block code is transformed into the corresponding most reliable basis. Next, a differential evolution procedure is applied to search for the most probable transmitted information message and a binary codeword. Decoding is completed by inverse transformation of the found most probable binary codeword by rearranging the corresponding elements. It is shown that the key stage of decoding is the search for the transmitted codeword using the differential evolution procedure, and the formation of the most reliable basis of the generator matrix of block code makes it possible to increase the decoding efficiency. In order to be able to technically implement this decoding method, an appropriate algorithm has been developed and its main steps are given. The results of the work can be used for the implementation of new generation radio communication technologies to improve the reliability of the transmission of service messages. It is also recommended to use the obtained results when solving the problem of decoding other error-correcting code structures that are used in modern telecommunication technologies.

Keywords: radio communication; decoding; block code; optimization; differential evolution.