

М. А. Штомпель

Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

БІОІНСПІРОВАНА ОПТИМІЗАЦІЯ НЕДВІЙКОВИХ КОДІВ З МАЛОЮ ЩІЛЬНІСТЮ ПЕРЕВІРОК НА ПАРНІСТЬ

Анотація. У роботі запропоновано біоінспірований підхід до оптимізації недвійкових кодів з малою щільністю перевірок на парність. На першому етапі розробленого методу оптимізації задаються характеристики передавання інформації та параметри обраної процедури біоінспірованої оптимізації. Ключовий етап методу полягає у ітеративному пошуку перевіркою матриці з використанням обраної біоінспірованої процедури оптимізації із застосуванням комп'ютерного моделювання. Моделювання процесу передавання інформації проводиться для заданого методу модуляції та обраних параметрів каналу зв'язку. Побудова наборів перевіркою матриць недвійкових кодів з малою щільністю перевірок на парність здійснюється на основі методу progressive edge growth. Оцінювання ефективності кожної згенерованої перевіркою матриці засновано на обчисленні коефіцієнту помилок за результатами ітеративного декодування на основі розповсюдження довіри. Для програмної реалізації запропонованого підходу розроблено алгоритм біоінспірованої оптимізації недвійкових кодів з малою щільністю перевірок на парність. Представлений метод оптимізації даних недвійкових кодів доцільно використовувати для підвищення ефективності систем радіозв'язку нового покоління.

Ключові слова: біоінспірована оптимізація, ефективність, коди з малою щільністю перевірок на парність, недвійкові коди, системи радіозв'язку.

Вступ

Постановка проблеми. Технології радіозв'язку нового покоління передбачають надання сучасних послуг електронних комунікацій, серед яких можна виділити Інтернет речей, віртуальну та доповнену реальність тощо. Впровадження цих послуг висуває підвищені вимоги до достовірності передавання інформації, затримки обробки даних у вузлах мережі та досягнення високої пропускнуєї спроможності [1, 2]. З метою забезпечення даних вимог пропонуються новітні методи оброблення інформації, зокрема, методи завадостійкого кодування. Серед наявних завадостійких кодових конструкцій важливу роль у сучасних засобах радіозв'язку відіграють коди з малою щільністю перевірок на парність (МЩПП-коди). Дані коди характеризуються високою ефективністю методів кодування та декодування з прийнятною обчислювальною складністю [3]. Довгі випадкові двійкові МЩПП-коди дозволяють практично досягти меж пропускнуєї спроможності для деяких моделей каналу зв'язку при використанні методу ітеративного декодування на основі розповсюдження довіри. З іншого боку, на практиці у сучасних технологіях радіозв'язку застосовуються відносно короткі МЩПП-коди. Перевірочні матриці даних кодів характеризуються наявністю коротких циклів, що значно погіршує ефективність декодування за розповсюдженням довіри. Для подолання цього обмеження застосовуються різноманітні процедури, спрямовані на оптимізацію структури перевіркою матриці МЩПП-коду з обраними параметрами. Відомо, що недвійкові МЩПП-коди мають кращу корегувальну здатність порівняно з еквівалентними двійковими кодами, тому актуальним завданням є розширення їх застосування у системах радіозв'язку нового покоління [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У [5] запропоновано новітній підхід до побудови МЩПП-кодів на базі схеми передавання зовнішньої

інформації протографу для систем радіозв'язку з рознесеними передавальними та приймальними антенами. Отримані у роботі коди мають вищу енергетичну ефективність та кращі показники у діапазоні високого відношення сигнал/завада.

У сучасних системах радіозв'язку застосовуються різні типи просторовозв'язаних МЩПП-кодів, що потребують оптимізації для заданих умов застосування. Наприклад, у [6] побудова та оптимізація усічених кільцевих МЩПП-кодів даного класу, що декодуються за розповсюдженням довіри з перетасуванням, здійснюється на основі адаптованої схеми передавання зовнішньої інформації. Подальший розвиток оптимізації просторовозв'язаних МЩПП-кодів та підвищення їх ефективності при застосуванні віконного декодування засновано на впровадженні нової метрики – віконного середнього параметру [7]. Для обґрунтування, отриманих у роботі результатів, додатково було визначено структурні характеристики оптимізованих кодів.

У [8] запропоновано підхід до побудови квазіциклічних регулярних МЩПП-кодів на базі евристичної процедури імітації відпалу, що дозволяє отримати коди з покращеними характеристиками у діапазоні високого відношення сигнал/завада.

У [9] представлена біоінспірована оптимізація нерегулярних двійкових МЩПП-кодів з використанням процедури кажанів, що ґрунтується на сформульованій оптимізаційній задачі нелінійного програмування.

Оптимізація недвійкових МЩПП-кодів для систем радіозв'язку з рознесеними передавальними та приймальними антенами високої розмірності, що базується на запропонованій символній схемі передавання зовнішньої інформації, дозволяє підвищити їх ефективність для циклічного симетричного каналу зв'язку з адитивним білим гаусовим шумом [10]. У [11] представлено підхід до оптимізації недвійкових МЩПП-кодів з використанням методології матриці узгодження ваги для спеціальних моделей каналу

зв'язку та систем збереження інформації. У роботі запропоновано новітнє представлення загальних поглинальних наборів, що відіграють критичну роль у даній методології, та проведено алгебраїчний аналіз характеристик отриманих недвійкових МЦПП-кодів. Застосування алгебраїчного підходу до оптимізації недвійкових МЦПП-кодів має ряд обмежень, тому доцільно розглянути можливість біоінспірованої оптимізації даного класу кодів, що можуть бути запроваджені у системах радіозв'язку нового покоління.

Мета статті: розроблення методу біоінспірованої оптимізації недвійкових МЦПП-кодів.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо етапи оптимізації недвійкових МЦПП-кодів на основі біоінспірованого підходу.

Етап 1. Встановлення параметрів недвійкового МЦПП-коду, методу модуляції, каналу зв'язку та біоінспірованої процедури оптимізації.

На даному етапі обирається швидкість коду, довжина кодового слова, довжина інформаційного повідомлення, а також задається метод модуляції та значення відношення сигнал/завада для обраних умов передавання інформації. Крім того, обирається біоінспірована процедура для здійснення оптимізації та задаються її параметри.

Етап 2. Біоінспірована оптимізація перевірконої матриці недвійкового МЦПП-коду.

На цьому етапі спочатку застосовується обрана процедура біоінспірованої оптимізації спільно з методом progressive edge growth (PEG) для формування набору перевірконих матриць недвійкового коду із заданими параметрами. Далі для кожної з отриманих перевірконих матриць генеруються кодові слова та здійснюється комп'ютерне моделювання передавання інформації через канал зв'язку з використанням відповідного методу модуляції. Для декодування прийнятої з каналу інформації застосовується класичний метод ітеративного декодування на основі розповсюдження довіри. В якості критерію ефективності сформованої перевірконої матриці МЦПП-коду використовується підрахований коефіцієнт помилок. Далі до початкових перевірконих матриць застосовуються міграційні оператори, які визначаються обраною біоінспірованою процедурою, та формується новий набір перевірконих матриць, для якого даний процес повторюється. Проведення моделювання завершується при досягненні заданого числа ітерацій біоінспірованої оптимізації.

Етап 3. Формування оптимізованої перевірконої матриці недвійкового МЦПП-коду.

Даний етап передбачає визначення перевірконої матриці, для якої забезпечується найменше значення коефіцієнту помилок за результатами етапу 2. Отримана перевіркона матриця розглядається як близька до оптимальної для обраних параметрів передавання інформації.

Ключова особливість представленого методу оптимізації недвійкових МЦПП-кодів полягає у застосуванні деякої біоінспірованої процедури для визначення оптимальної перевірконої матриці за критерієм мінімізації коефіцієнту помилок для об-

раних умов передавання інформації. Алгоритм методу наведений на рис. 1.

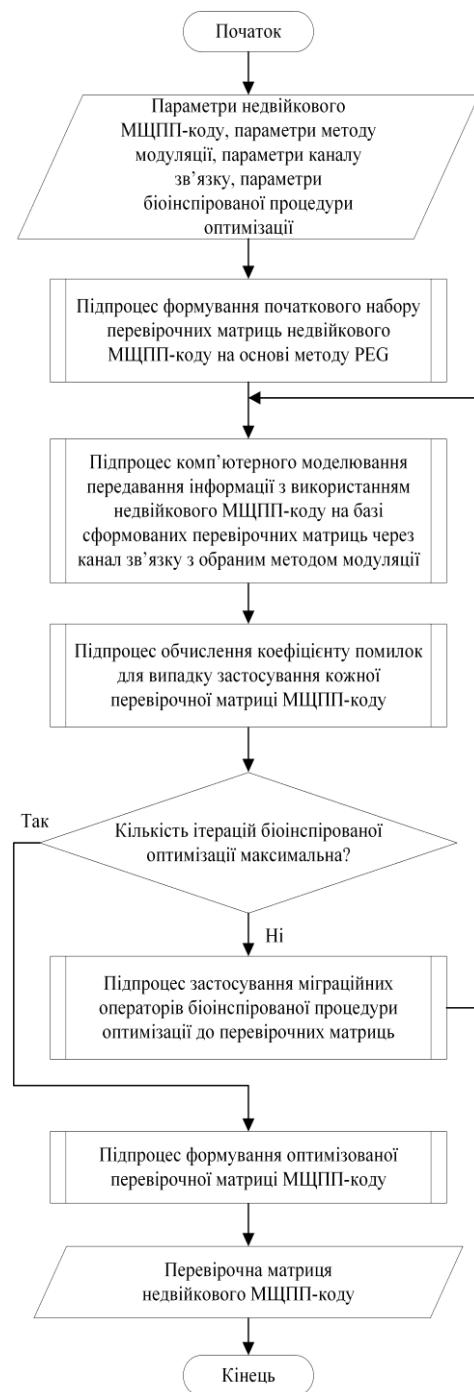


Рис. 2. Схема алгоритму біоінспірованої оптимізації недвійкових МЦПП-кодів

У даному алгоритмі вхідними даними є характеристики передавання інформації (параметри недвійкового МЦПП-коду, методу модуляції та каналу зв'язку) та параметри обраної процедури біоінспірованої оптимізації. Відповідно до алгоритму створюється початковий набір перевірконих матриць, що будуються з використанням методу PEG, для заданих параметрів недвійкового МЦПП-коду (довжини кодового слова, довжини інформаційного повідомлення та швидкості кодування). Отримані перевірконі матриці недвійкового МЦПП-коду використовуються

при проведенні комп'ютерного моделювання передавання інформації з обраним методом модуляції через канал зв'язку у заданому діапазоні сигнал/завада. За результатами проведеного моделювання обчислюється коефіцієнт помилок, що досягається при використанні кожної перевірконої матриці МЩПП-коду, при застосуванні ітеративного декодування на основі розповсюдження довіри. Якщо максимальна кількість ітерацій оптимізації не досягнута, то застосовуються міграційні оператори обраної біоінспірованої процедури для формування нового набору перевірочних матриць недвійкового МЩПП-коду та наведені вище кроки алгоритму повторюються. У результаті роботи алгоритму визначається перевірна матриця недвійкового МЩПП-коду, для якої забезпечується найменша величина коефіцієнту помилок для заданих умов передавання інформації.

Для програмної реалізації представленого алгоритму оптимізації можуть бути використані стандартні мови програмування або спеціалізовані програмні середовища моделювання.

Висновки

Недвійкові МЩПП-коди різних типів використовуються у технологіях радіозв'язку нового покоління. Структура перевірконої матриці коротких МЩПП-кодів потребує оптимізації при використанні ітеративного декодування на основі розповсюдження довіри. У роботі запропоновано біоінспірований підхід до оптимізації недвійкових МЩПП-кодів. Ключовою особливістю даного підходу є ітеративний пошук перевірконої матриці з використанням біоінспірованої процедури оптимізації та методу побудови РЕГ шляхом комп'ютерного моделювання для заданих умов передавання інформації. В якості критерію ефективності обрано коефіцієнт помилок, що визначається для кожної згенерованої перевірконої матриці МЩПП-коду. Також для практичної реалізації представленого підходу розроблено алгоритм біоінспірованої оптимізації. Запропонований метод може бути використано для підвищення ефективності передавання інформації у новітніх системах радіозв'язку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Aslam A. M., Chaudhary R., Bhardwaj A., Kumar N., Zeadally S. Metaverse for 6G and beyond: the next revolution and deployment challenges. *IEEE Internet of Things Magazine*. 2023. Vol. 6. No. 1. P. 32-39. <https://doi.org/10.1109/IOTM.001.2200248>.
2. Zhang H., Tong W. Channel coding for 6G extreme connectivity – requirements, capabilities, and fundamental tradeoffs. *IEEE BITS the Information Theory Magazine*. 2023. Vol. 3. No. 1. P. 54-66. <https://doi.org/10.1109/MBITS.2023.3322978>.
3. Geiselhart M., Krieg F., Clausius J., Tandler D., Ten Brink S. 6G: a welcome chance to unify channel coding? *IEEE BITS the Information Theory Magazine*. 2023. Vol. 3. No. 1. P. 67-80. <https://doi.org/10.1109/MBITS.2023.3322974>.
4. Noor-A-Rahim M., Liu Z., Guan Y. L., Hanzo L. Finite-length performance analysis of LDPC coded continuous phase modulation. *IEEE Trans. on Vehicular Techn.* 2020. Vol. 69. No. 10. P. 12277-12280. <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3012727>.
5. Vu H. D., Nguyen T. V., Nguyen D. N., Nguyen H. T. On design of protograph LDPC codes for large-scale MIMO systems. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 46017-46029. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2979156>.
6. Yang Z., Fang Y., Cai G., Zhang G., Chen P. Design and optimization of tail-biting spatially coupled protograph LDPC codes under shuffled belief-propagation decoding. *IEEE Communications Letters*. 2020. Vol. 24. No. 7. P. 1378-1382. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.2985773>.
7. Kwak H.-Y., Kim J.-W., Park H., No J.-S. Optimization of SC-LDPC codes for window decoding with target window sizes. *IEEE Trans. on Communications*. 2022. Vol. 70. No. 5. P. 2924-2938. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2022.3158307>.
8. Sariduman A., Pusane A. E., Taskin Z. C. On the construction of regular QC-LDPC codes with low error floor. *IEEE Communications Letters*. 2020. Vol. 24, No. 1. P. 25-28. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2019.2953058>.
9. Shtompel M., Prykhodko S., Shefer O., Halai V., Zakharchenko R., Topikha B. Performance analysis of the bioinspired method for optimizing irregular codes with a low density of parity checks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 6(9 (108)). P. 34-41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.216762>.
10. Liu Q., Feng Z., Xu J., Zhang Z., Liu W., Ding H. Optimization of non-binary LDPC coded massive MIMO systems with partial mapping and REP detection. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 17933-17945. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3147273>.
11. Hareedy A., Lanka C., Guo N., Dolecek L. A combinatorial methodology for optimizing non-binary graph-based codes: theoretical analysis and applications in data storage. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2019. Vol. 65. No. 4. P. 2128-2154. <https://doi.org/10.1109/TIT.2018.2870437>.

Received (Надійшла) 00.00.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 00.00.2024

Bio-inspired optimization of non-binary low-density parity-check codes

M. Shtompel

Abstract. The paper proposes a bio-inspired approach to the optimization of non-binary low-density parity-check codes. At the first stage of the developed optimization method, the characteristics of information transmission and the parameters of the selected bio-inspired optimization procedure are set. The key stage of the method consists in iterative search of the parity-check matrix using the selected bio-inspired optimization procedure based on computer simulation. Modeling of the information transmission process is carried out for a given modulation method and selected parameters of the communication channel. The construction of sets of parity-check matrices of non-binary low-density parity-check codes is based on the progressive edge growth method. The evaluation of the performance of each generated parity-check matrix is used the calculation of the error rate based on the results of iterative belief propagation decoding. For the software implementation of the proposed approach, an algorithm of bio-inspired optimization of non-binary low-density parity-check codes has been developed. The presented method of optimizing these non-binary codes is advisable to use to improve the efficiency of new generation radio communication systems.

Keywords: bio-inspired optimization, efficiency, low-density parity-check codes, non-binary codes, radio communication systems.