

# МОДИФІКАЦІЯ АЛГОРИТМУ SOVA ДЛЯ ТУРБО-ДЕКОДУВАННЯ З МІНІМІЗАЦІЄЮ ЙМОВІРНОСТІ ПОМИЛКИ БІНАРНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО СИМВОЛУ

Вінницький національний технічний університет

## *Анотація*

*Розроблено вдосконалений алгоритм турбо-декодування SOVA, який дозволить збільшити вірогідність передавання даних порівняно з класичним алгоритмом SOVA, а також зменшить затримку декодування під час переміщення вперед і назад на решітці згорткового коду за рахунок її сегментації та незалежного обчислення апостеріорних рішень за допомогою ковзного вікна певного розміру.*

**Ключові слова:** цифровий зв'язок, завадостійке кодування, турбо-код, алгоритм декодування SOVA, складність обчислень.

## *Abstract*

*An improved SOVA turbo-decoding algorithm has been developed. It will increase the likelihood of data transmission compared to the classical SOVA, as well as reduce the decoding delay on the forward and backward moves on the convolution code trellis due to its segmentation and independent computation of a posteriori decisions using a sliding window of certain size.*

**Keywords:** digital communication, error-correcting coding, turbo-code, SOVA decoding method, computations complexity.

## Вступ

У час сучасних технологій відбувається інтенсивний розвиток цифрових систем передавання даних (супутниковий і мобільний зв'язок, цифрове телебачення, програмовані радіосистеми тощо). Досить часто ці системи використовують для передавання даних бездротові канали, у яких на сигнал діють завади різної фізичної природи, які створюють помилки у даних [1, 2]. Для усунення помилок К. Шеннон запропонував застосовувати завадостійке кодування (error-correcting coding) [3]. Одним із основних та найбільш перспективних напрямів в розвитку теорії завадостійкого кодування є захист інформації на основі паралельних каскадних конструкцій згорткових кодів або турбо-кодів. У роботі [4] розглянуті теоретичні залежності коефіцієнту бітової помилки BER від відношення сигнал/шум  $E_b/N_0$ , як асимптоти кодової відстані для різних кодів та показано, що при високому показнику  $BER = 10^{-5}-10^{-7}$  (від 0 до 3 дБ), кращим з розглянутих кодів є турбо-код. Причому на високих значеннях BER даний код дозволяє досягти енергетичного виграшу близько 7-9 дБ. Практично всі світові експерти в області комунікацій (Altera, France Telecom, LG Electronics, Samsung, Texas Instruments, ViaSat) використовують саме даний код. Термін "турбо" та математичний апарат для турбо-коду вперше запропонувала у 1993 р. група вчених, підсумувавши роботу, яку вели математики, а також фахівці з апаратних, програмних засобів ЕОМ та проблем передавання інформації, розробивши технологію, яка дозволяла досягти рекордної ефективності [5]. У 1997 р. німецький вчений J. Hagenauer ввів поняття "турбо"-принципу для опису стратегії, яка втілена в ітеративному турбо-декодуванні, а також в обмінних ймовірнісних методах для кодів з низькою щільністю перевірок на парність та турбо-подібних кодів [6]. Турбо-код виявляється найбільш ефективним методом роботи з інформацією в каналах з низькою енергетикою (цифрове телебачення, телеметрія, бездротові локальні мережі, космічні і мобільні комунікації, системи з джаммінгом) [7].

Всі алгоритми декодування турбо-подібних кодів можна інтерпретувати як реалізацію техніки, відомої як обмінні ймовірнісні алгоритми (MPA – message passing algorithms). Для декодування турбо-коду можна застосувати алгоритм під назвою SOVA, представлений J. Hagenauer та P. Hoeher, у 1989 році на основі звичайного алгоритму декодування А. Viterbi. В англійській літературі для VA можна зустріти назву Min-Sum (алгоритм мінімуму суми) [8, 9].

**Метою** роботи є розробка модифікованого алгоритму декодування ISOVA, що дозволить підвищити вірогідність передавання даних порівняно з класичним алгоритмом SOVA, а також зменшити затримку декодування на прямому та зворотному проходах решітки згорткового коду за рахунок її розбиття на сегменти і незалежного обчислення апостеріорних оцінок з використанням ковзного вікна розміром  $\delta$ .

### Результати дослідження

Під час роботи турбо-кодера в канал зв'язку передаються два кодові блоки: перший блок, який складається з інформаційної частини  $d_k$  і перевіркової частини  $d_{k,2}$  кодера 1, і другий кодовий блок, що складається з перемішаної інформаційної частини  $\pi(d_k)$  і перевіркової частини  $d_{k,3}$  з кодера 2. При декодуванні турбо-декодером із загального потоку даних виділяють два зашумлені кодові блоки  $(x_k, x_{k,2})$  та  $(x_k, x_{k,3})$ , причому інформаційні частини цих двох блоків через систематичне кодування і з урахуванням перемішування ідентичні. Декодовану інформацію першого (другого) декодера  $LLR_{зовн}(d_k)$  (зовнішня інформація) з урахуванням перемішування  $\pi$  можна використовувати як апіорну інформацію  $LLR_{анп}(d_k)$  для другого (першого) декодера з метою уточнення результату декодування, тобто інформація обертається петлею до того моменту, поки м'які рішення не сходяться на стабільному наборі значень. Крім того, для уточнення апостеріорного  $LLR(d_k)$  використовується каналне  $LLR_{кан}$  [9, 10]. Розглянемо алгоритм декодування SOVA у побітовій формі J. Hagenauer.

Слід зазначити, що алгоритм декодування SOVA пов'язаний з динамічним програмуванням, основою якого є принцип оптимальності (principle of optimality), сформульований Р.Е. Беллман у 1953 р [11]. Алгоритм максимізує кореляційну метрику замість мінімізації відстані. Для роботи алгоритму декодування SOVA потрібно використати метрики ребер на решітці та блок операцій додати-порівняти-вибрати (ACS – Add-Compare-Select) [12, 13]. Алгоритм застосовує метрику шляху вперед, яка вибирається за допомогою операцій ACS до кінця решітки

$$M_k(s_k) = \max_{d_k = \pm 1}^{(s', s)} (M_{k-1}(s_{k-1}) + M_k(s', s)), \quad (1)$$

де  $M_{k-1}(s_{k-1})$  – поточна метрика у вершині решітки коду; а  $M_k(s', s)$  – метрика ребра, яка виражається як

$$M_k(s', s) = \frac{1}{2} \cdot \left( d_k \cdot LLR_{анп}(d_k) + d_k \cdot LLR_{кан} \cdot x_k + \sum_{k=2}^n d_{k,v} \cdot LLR_{кан} \cdot x_{k,v} \right). \quad (2)$$

Далі виконується операція для оцінки надійності бінарного символу за принципом J. Hagenauer на отриманому максимально правдоподібному шляху на решітці [14]. Порівнюються два конкуруючі шляхи (операція XOR), які проходять через мітку  $\lambda$  на певному етапі ґратки. Якщо бінарний символ вижившого шляху співпадає з конкуруючим (0), то на відповідному місці ставиться  $\infty$ , інакше  $(1) - \lambda$ . Далі складається матриця надійностей рішень та знаходиться мінімум на кожному етапі діаграми згорткового коду. Розрахунок м'яких апостеріорних рішень можна представити у вигляді

$$LLR_{SOVA}(d_k) \approx d_k \cdot \min_{d_k \neq d_k^i} \lambda_k^i \approx LLR_{анп}(d_k) + LLR_{кан} \cdot x_{\xi_{k,1}} + LLR_{зовн}(d_k). \quad (3)$$

Подальша робота алгоритму SOVA заснована на ітеративному визначенні зовнішньої інформації  $LLR_{зовн}(d_k)$  з декодера за формулою (3). Також можна виконати нормалізацію метрик в станах, щоб зменшити числовий бар'єр.

Запропонована модифікація даного алгоритму виконується вперед та назад за формулами (1) та (3). Далі зберігаються значення  $M_k(s_k)$  вперед, назад та транзитна метрика  $M_k(s', s)$ , а також знаходяться величини м'якого виходу алгоритму декодування  $LLR_{ISOVA}$  для бінарного інформаційного символу на сегменті решітки з ковзним вікном розміром  $\delta$

$$LLR_{ISOVA}(d_k) = \begin{cases} LLR_{SOVA}^{\rightarrow}(d_k), & \text{if } LLR_{SOVA}^{\rightarrow}(d_k) > LLR_{SOVA}^{\leftarrow}(d_k), \\ LLR_{SOVA}^{\leftarrow}(d_k), & \text{if } LLR_{SOVA}^{\leftarrow}(d_k) > LLR_{SOVA}^{\rightarrow}(d_k). \end{cases} \quad (4)$$

де  $LLR_{SOVA}^{\rightarrow}(d_k)$ ,  $LLR_{SOVA}^{\leftarrow}(d_k)$  – апостеріорні рішення, які знайдено відповідно за прямим та зворотним алгоритмом SOVA на сегменті решітки коду з ковзним вікном розміром  $\delta$ .

Залежність  $f$  складності розглянутих алгоритмів декодування [15] від кількості комірок пам'яті  $m$  рекурсивного систематичного згорткового кодера для різної кількості бітів  $q$  на виході кодера та розміру ковзного вікна на  $5 \cdot (m-1)$  можна задати виразами

$$f_{SOVA}(m, q) = 2^{m+2} \cdot q + 11 \cdot 2^m + 5 \cdot m + 11, \quad (5)$$

$$f_{ISOVA}(m, q) = 2^{m+2} \cdot q + 2^{m+4} + 10 \cdot m + 17. \quad (6)$$

Запропонований алгоритм ISOVA складніший за класичний SOVA на  $\Theta = 5 \cdot 2^m + 5 \cdot m + 6$ , але працює швидше на проходах по решітці, оскільки використовується менша глибина обчислень. Даний алгоритм дозволить точніше оцінювати надійність бінарних символів з виходу декодера за рахунок подвійного проходження решітки, що підвищить вірогідність передавання даних порівняно з класичним алгоритмом SOVA.

### Висновки

У даній роботі запропоновано модифікований двонаправлений алгоритм турбо-декодування ISOVA. Він дозволяє підвищити вірогідність передавання даних порівняно з класичним алгоритмом SOVA та дещо спростити кількість обчислень під час проходження по решітці з використанням ковзного вікна розміром  $\delta$ . Отриманий вираз (6) для оцінки складності роботи алгоритму доцільно використовувати для аналізу складності реалізації турбо-декодера з метою вибору елементної бази.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Нікуліна А.В. Методи внутрішнього аналізу ефективності використання основних алгоритмів в відеокодеках [Електронний ресурс]: матер. XLVI науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету за участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області / А.В. Нікуліна, В.В. Гармаш. – Вінниця: ВНТУ, 23 березня, 2017. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2017/paper/view/2135/2629>.
2. Channel Coding: Theory, Algorithms, and Applications / D. Declercq, M. Fossorier, E. Biglieri and others. – Academic Press Library in Mobile and Wireless Communications, Elsevier, 2014. – 690 p.
3. Shannon C.E. A Mathematical Theory of Communication / C.E. Shannon // Reprinted from The Bell System Technical Journal. – 1948. – V. 27. – P. 379–423, 623–656.
4. Розенвассер Д.М. Сравнение помехоустойчивых кодов ВОСП / Д.М. Розенвассер // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2010. – № 1. – С. 134–137.
5. Berrou C. Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo-Codes / C. Berrou, A. Glavieux, P. Thitimajshima // Proceedings of the ICC'93. – Switzerland, Geneva: 1993. – P. 1064–1070.
6. Hagenauer J. The Turbo Principle: Tutorial Introduction and State of the Art / J. Hagenauer // Proclaimed on the International Symposium on Turbo Codes and Related Topics. – 1997. – 11 p.
7. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – М.: Вильямс, 2003. – 1004 с.
8. Channel Coding in Communication Networks. From Theory to Turbocodes: edited by A. Glavieux / C. Berrou, C. Douillard, M. Jezequel, A. Picart. – Chippenham: ISTE, 2007. – 437 p.
9. Hanzo L. Turbo Coding, Turbo Equalisation and Space-Time Coding for Transmission over Wireless Channels / L. Hanzo, T.H. Liew, B. L. Yeap. – Southampton: Department of Electronics and Computer Science, 2002. – 746 p.
10. Іванов Ю.Ю. Особливості апаратно-програмної реалізації турбо-кодів: порівняльний аналіз складності реалізації на цифровому сигнальному процесорі / Ю.Ю. Іванов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – № 3 (126). – С. 94–101.
11. Іванов Ю.Ю. Вступ до Computer Science. Дискретна математика цікава та не дуже: лекції, алгоритми та задачі / Ю.Ю. Іванов. – 2018. – 89 с. – Режим доступу: [https://iq.vntu.edu.ua/method/by2.php?card\\_id=568](https://iq.vntu.edu.ua/method/by2.php?card_id=568).

12. Ivanov Y. A Viterbi Algorithm as a Key to Decoding Turbo-Code / Y. Ivanov, A. Kulyk, S. Krivogubchenko // Nauka i studia. – Przemysl: Nauka i studia, 2012. – № 11(56). – P. 60–65.
13. Кулик А.Я. Апаратна реалізація декодера SOVA з «м'яким» 3-бітовим квантованим виходом / А.Я. Кулик, Ю.Ю. Іванов // Цифрові технології. – Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2012. – № 12. – С. 15–22.
14. Orlovic D. Turbo kod uporenivanje MAP i SOVA dekodovanja / D. Orlovic. – Ljubljana: University of Ljubljana, Faculty of Electrical Science. – 2009. – 11 p.
15. Кулик А.Я. Порівняльний аналіз складності реалізації методів декодування турбо-кодів / А.Я. Кулик, С.Г. Кривогубченко, Ю.Ю. Іванов // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – № 1 (26). – С. 26–31.

***Нікуліна Анна Володимирівна*** — магістрант групи ІАКІТ-17м, факультет комп'ютерних систем і автоматики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

***Іванов Юрій Юрійович*** — канд. техн. наук, асистент кафедри автоматики та інформаційно-вимірювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: Yura881990@i.ua.

Науковий керівник: ***Іванов Юрій Юрійович*** — канд. техн. наук, асистент кафедри автоматики та інформаційно-вимірювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

***Nikulina Anna V.*** — graduate student, Faculty of Computer Systems and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

***Ivanov Yuriy Yu.*** — Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor, Faculty of Computer Systems and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: Yura881990@i.ua.

Supervisor: ***Ivanov Yuriy Yu.*** — Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor, Faculty of Computer Systems and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.