

**К.А. Федорчак**  
**А.В. Нікуліна**  
**І.Г. Чуйко**  
**Ю.Ю. Іванов**  
**С.Г. Кривогубченко**

## **ОГЛЯД ІТЕРАТИВНИХ МЕТОДІВ ДЕКОДУВАННЯ БЛОКОВИХ ТУРБО-КОДІВ НА SISO ТА HHO ДЕКОДЕРАХ**

Вінницький національний технічний університет

### **Анотація**

*У цій роботі проаналізовано структуру кодера та декодера блокового турбо-коду. Крім цього, представлено короткий огляд методів турбо-декодування на SISO та HHO декодерах в системах передавання даних.*

**Ключові слова:** завадостійке кодування, блоковий турбо-код, огляд, методи турбо-декодування, м'які та жорсткі рішення.

### **Abstract**

*In this work has been analyzed the structure of turbo-product encoder and decoder. Also has been presented a brief overview of the turbo-decoding methods on SISO and HHO decoders in data transmission systems.*

**Keywords:** error-correcting coding, block turbo-code, review, turbo-decoding methods, soft and hard decisions.

### **Вступ**

У час сучасних технологій відбувається інтенсивний розвиток цифрових систем передавання даних. Досить часто ці системи використовують для передавання бездротові канали, у яких на сигнал діють завади різної фізичної природи, які і створюють помилки у даних. Для усунення помилок Шеннон запропонував застосовувати *завадостійке кодування* [1]. Розробка методів і засобів захисту інформації на основі завадостійкого кодування набуває особливої важливості і актуальності. Одним із основних напрямів роботи науковців є дослідження послідовних та *паралельних каскадних конструкцій кодів* (або турбо-кодів, ТК). Розробка ТК розвивається за двома напрямками: *згорткові турбо-коди*, утворені шляхом паралельного з'єднання двох або більше згорткових кодерів, і *блокові турбо-коди*, утворені шляхом послідовного з'єднання двох або більше блокових кодерів [2-4]. Вперше згорткові ТК були представлені у 1993 р. на міжнародній конференції зв'язку групою вчених – Берру, Глав'є та Цітімаджімою [5]. По аналогії зі згортковими ТК в 1994 р. Піндайя запропонував використовувати блокові ТК або турбо-коди-добутки (TPC – Turbo-Product Codes) [6]. TPC є більш ефективними при відносно високих кодових швидкостях.

**Мета** роботи полягає в аналізі структури TPC та огляді методів, які допомагають розв'язати екстремальну задачу їхнього декодування в системах передавання даних.

### **Результати дослідження**

Кодова структура двовимірного TPC вимагає використання двох ідентичних компонентних блокових кодів (код з перевіркою на парність, Хеммінга, Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема, Ріда-Соломона тощо) для кодування рядків та стовпців відповідно. Два блокових коди з'єднують послідовно, а оскільки коди незалежні і працюють по рядках і стовпцях, що забезпечує випадковість коду, то інтерлівер непотрібний. При реалізації операції кодування TPC вихідні дані записуються в двомірний масив по рядках, після чого дані кодуються по рядках за допомогою першого коду, а потім дані і перевірочні біти (або тільки дані) першого коду кодуються за стовпцями другого коду. Для передавання в канал зв'язку дані з масиву зчитуються по рядках [7-11].

TPC допускають ітеративне декодування, коли на кожній ітерації за допомогою простих процедур декодування аналізуються дані, що належать простим парціальним кодам. Фактично

ітеративний декодер двовимірного TPC – це послідовне з'єднання двох елементарних декодерів, які виконують обчислення імовірності появи двійкового символу кодового слова. Ітеративна процедура декодування такого коду є двоетапною – горизонтальне та вертикальне декодування. В ході турбо-декодування на вхід елементарних декодерів надходять «м'які» оцінки, результат декодування на виході елементарних декодерів – також «м'яке» рішення. З цієї причини такі схеми отримали назву декодерів з м'яким входом і м'яким виходом (SISO – Soft-Input Soft-Output) [10, 12].

Основу математичного апарату методів декодування TPC складає *алгебра логарифма відношення функцій правдоподібностей* (log-likelihood ratio algebra). Існує дві основні групи методів декодування TPC на SISO декодерах. Перша з них мінімізує *ймовірність помилки біта* як максимум апостеріорної імовірності. Інша *мінімізує ймовірність помилки інформаційної послідовності* [8, 9]. Загалом існують наступні методи декодування TPC:

1. На основі *декодування за списком слів*:

- ☞ метод Чейза-Піндайя другого типу зі списком кодових слів [9, 11];
- ☞ метод Хартмана-Назарова зі швидким перетворенням Адамара [11];
- ☞ метод Фанга-Баттайла з упорядкуванням статистик [10].

2. На основі *декодування на графах Таннера*:

- ☞ метод Sum-Product [13];
- ☞ метод Min-Sum [13].

3. На основі *принципів Вольфа для блокових кодів на трелліс*:

- ☞ метод MAP (за максимумом апостеріорної імовірності) [14, 15];
- ☞ метод log-MAP та модифікації (PL-log-MAP, max-log-MAP тощо) [10, 14, 15];
- ☞ метод SOVA (метод декодування Вітербі з м'яким виходом) із застосуванням формули Хагенауера [14, 15].

Надійність м'яких рішень визначається їх абсолютним значенням, причому чим воно далі від нуля, тим вищою буде надійність рішення про прийнятий бінарний символ.

Слід зазначити, що існують методи декодування TPC з *жорсткими рішеннями* (НІНО – Hard-Input Hard-Output):

- ☞ метод Редді-Робінсона [11];
- ☞ метод інверсії бінарного символу або жорсткий метод Sum-Product [13].

Подальша робота всіх цих методів заснована на ітеративному визначенні певної зовнішньої інформації з декодерів та обміні нею для отримання надійного рішення на виході декодера.

## Висновки

У даній роботі проаналізовано структуру кодера та декодера двовимірного TPC. Проведено огляд методів декодування TPC (на SISO та НІНО декодерах), які допомагають розв'язати задачу декодування у системах передавання даних різного функціонального призначення.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. 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.
2. Федорчак К.А. Деякі аспекти завадостійкого кодування турбо-кодів-добутків у цифрових системах передавання даних: матер. IV міжнародної наукової конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» / К.А. Федорчак, Ю.Ю. Иванов. – Вінниця: ПП «ТД Едельвейс і К», 31 жовтня – 2 листопада, 2017 р. – С. 232.
3. Варгаузин В.А. Турбо-коды и итеративное декодирование: принципы, свойства, применение / В. А. Варгаузин, Л.Н. Протопопов // ТелеМультиМедиа. – 2000. – № 4. – С. 33-38.
4. Иванов Ю.Ю. О некоторых аспектах итеративной стратегии декодирования турбо-кодов: ретроспектива и «турбо»-принцип: матер. IV международной научно-практической конференции «Информационные технологии и компьютерная инженерия» / Ю.Ю. Иванов, А.Я. Кулик. – Винница: ВНТУ, 28–30 мая, 2014 г. – С. 157-160.
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: 1993. – P. 1064-1070.
6. Pyndiah R. Near-Optimum Decoding of Product Codes: Block Turbo Codes / R. Pyndiah // IEEE Transactions on Communications. – 1998. – V. 46. – P. 1003-1010.

7. Архипов А. Турбо-коды: мощные алгоритмы для современных систем связи / А. Архипов // Сети информации. – 2006. – С. 37.
8. Hagenauer J. Iterative Decoding of Binary Block and Convolutional Codes / J. Hagenauer, E. Offer, L. Papke // IEEE Transactions on Information Theory. – 1996. – V. 42. – № 2. – P. 429-445.
9. Soleymani M.R. Turbo Coding for Satellite and Wireless Communications / M.R. Soleymani, Y. Gao, U. Vilaipornsawai. – New York: Kluwer Academic, 2002. – 231 p.
10. Morelos-Zaragoza R. The Art of Error Correction Coding / R. Morelos-Zaragoza. – Chippenham: John Wiley & Sons, 2006. – P. 143-168.
11. Codes and Turbo Codes: edited by C. Berrou / C. Douillard, M. Jezequel, G. Battail and others. – Paris: Springer, 2010. – 424 p.
12. Иванов Ю.Ю. Вступ до Computer Science. Дискретна математика цікава та не дуже: лекції, алгоритми та задачі / Ю.Ю. Иванов. – 2018. – 89 с. – Режим доступу: [https://iq.vntu.edu.ua/method/read\\_url.php?tbl\\_num=2&url=/fdb/1166/Discrete\\_Math\\_by\\_IVANOV.djvu](https://iq.vntu.edu.ua/method/read_url.php?tbl_num=2&url=/fdb/1166/Discrete_Math_by_IVANOV.djvu).
13. Johnson S.J. Iterative Error Correction. Turbo, Low-Density Parity-Check and Repeat-Accumulate Codes / S.J. Johnson. – New York: Cambridge University Press, 2009. – 356 p.
14. Иванов Ю.Ю. Особливості апаратно-програмної реалізації турбо-кодів: порівняльний аналіз складності реалізації на цифровому сигнальному процесорі / Ю.Ю. Иванов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – № 3 (126). – С. 94-101.
15. 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 of UK, 2002. – 746 p.

**Федорчак Катерина Анатоліївна** — студентка групи ІСі-146, факультет комп'ютерних систем і автоматики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

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

**Чуйко Іван Геннадійович** — 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.

**Кривогубченко Сергій Григорович** — канд. техн. наук, доцент кафедри автоматики та інформаційно-вимірювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

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

**Fedorchak Katerina A.** — student, Faculty of Computer Systems and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

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

**Chuiko Ivan G.** — graduate student, Faculty of Computer Systems and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

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

**Krivogubchenko Sergiy G.** — Cand. Sc. (Eng), Docent, Faculty of Computer Systems and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

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