

# ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ТУРБО-КОДІВ

Вінницький національний технічний університет

## Анотація

Розроблені програмні засоби для системи передавання даних з турбо-кодеком, які дозволяють виконувати гнучке налаштування параметрів експериментів, оцінювати та забезпечувати необхідну вірогідність обміну даними з використанням різних методів турбо-декодування при певному рівні нормованого відношення сигнал/шум у каналі передавання даних.

**Ключові слова:** завадостійке кодування, турбо-кодек, ітеративні декодери, програмний комплекс, експериментальні дослідження.

## Abstract

Software for data transmission system with turbo-codec have been developed, that allowed to perform flexible configuration for experiments options, evaluate and ensure the required reliability for data exchange using different turbo-decoding methods at the certain level of normalized signal/noise ratio in the data channel.

**Keywords:** error-correcting coding, turbo-codec, iterative decoders, software, experimental researches.

## Вступ

У даній роботі розглядається один із найбільш потужних завадостійких кодів – турбо-код. Термін "турбо" та математичний апарат для турбо-коду вперше запропонований у фундаментальній праці К. Берру [1], в якій показано результати досягнення  $BER = 10^{-5}$  зі швидкістю кодування  $R = 0,5$ , двійкова фазова модуляція (BPSK – binary-phase shift keying) в каналі з адитивним білим гаусівським шумом (AWGN – additive white Gaussian noise) при відношенні енергії біта  $E_b$  до спектральної щільності потужності шуму  $N_0$  на рівні 0,7 дБ. Сучасні технічні можливості вийшли на новий рівень розвитку та дозволяють застосовувати складні обчислювальні алгоритми турбо-декодування, які забезпечують високий ступінь виправлення помилок. Всі алгоритми декодування турбо-подібних кодів можна інтерпретувати як реалізацію техніки, відомої як обмінні ймовірнісні алгоритми (MPA – message passing algorithms) або алгоритм з розповсюдженням довіри (BPA – belief propagation algorithm). Для опису стратегії, яка втілена в ітеративному декодуванні турбо-кодів, німецький вчений J. Hagenauer ввів поняття "турбо"-принципу [2]. Турбо-коди з імовірнісними алгоритмами декодування дозволяють здійснити високоефективне передавання даних практично в будь-якій системі зв'язку: телебаченні (DVB-RCS, DVB-RCT, DVB-SSP), телеметрії, бездротових локальних мережах (WiMAX), SDR системах (software defined radio – програмно-визначених радіосистемах), мобільних (3G, 4G LTE, Inmarsat) і космічних (CCSDS) комунікаціях. Дослідження NASA JPL (Mars Reconnaissance Orbiter+Mars Science Laboratory), які виконані у 2016 році, дозволили отримати 24 Гб інформації, включаючи високоякісні фотографії і відеофайли поверхні Червоної планети за допомогою марсохода Curiosity та турбо-кода ( $R = 1/6$ ,  $k = 8920$  біт) [3 – 5].

У роботі [6] розглянуті теоретичні залежності BER від відношення  $E_b/N_0$ , 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. Оскільки відсутній адекватний математичний апарат, який дозволив би розрахувати практичні характеристики завадостійкості турбо-коду, то використовують комп'ютерне імітаційне моделювання [7]. Для цього необхідно розробити програмне забезпечення. Отже, **метою** даної роботи є розробка програмного комплексу для системи передачі інформації, який здатний структурно адаптуватися до різних моделей кодерів та методів турбо-декодування, дозволяє здійснювати гнучке налаштування параметрів турбо-кодів при проведенні експериментів, що дає можливість отримати порівняльні характеристики методів турбо-декодування з урахуванням впливу завад.

## Результати дослідження

У ході проведення науково-дослідної роботи на кафедрі автоматики та інформаційно-виміральної техніки ВНТУ в середовищі Matrix Laboratory був розроблений програмний комплекс, який дозволяє застосувати турбо-кодек у розподілених комп'ютерних системах різного функціонального призначення [8 – 10]. Програма дозволяє виконувати моделювання процесу передавання даних, а також застосовується для роботи у реальних умовах. Крім інтерфейсної частини, необхідний набір програмних модулів для системи передавання даних включає в себе: модуль для турбо-кодування даних з використанням RSC-кодів; модуль для роботи інтерлівера у складі турбо-кодека; модуль для роботи модема; модуль для моделювання передавання даних каналом зв'язку; модуль для турбо-декодування з вибором методу декодування. У разі зміни специфіки роботи системи можливе ускладнення програмного забезпечення. Залежно від поставлених вимог, додатково можна застосовувати модулі ущільнення даних (методи Хаффмана, Лемпеля-Зіва-Велча, арифметичне кодування, DEFLATE, bzip тощо) та криптографічного закриття інформації (DES, AES, RSA тощо).

В якості даних з джерела інформації можна використати реальні дані (текстовий файл, мультимедіа дані) або виконати моделювання із застосуванням генератора псевдовипадкових послідовностей  $\text{rand}(\dots)$  з генерацією рівномірно розподілених випадкових величин за методом S.K. Park та K.W. Miller. Для цього потрібно задати розмір фрейму та вказати величину  $E_b/N_0$ . Якщо виконується моделювання роботи системи передавання даних з турбо-кодеком, то приймач даних отримує їх декодовану версію, а лічильник підраховує помилки в бінарних інформаційних символах за ідеальним теоретичним критерієм "магії джинна" (magic GENIE). Далі розраховується коефіцієнт BER у вигляді відношення визначених помилок до загальної кількості бінарних символів [7].

Для розробки модуля турбо-кодування застосовано принципи побудови турбо-кодера. Існує можливість задання кількостей комірок пам'яті  $m$  та перевірочних символів  $h$  з виходу RSC-кодера, вибору генератора коду  $g$  та його швидкості  $R$ . Після закінчення кодування інформаційного блоку в програмі застосовано термінацію кодерів за допомогою "хвостовика" з  $m$  бінарних символів, оскільки чисельні результати моделювання показують істотну перевагу характеристик завадостійкості турбо-кодів з такими параметрами.

Формування послідовності бінарних інформаційних символів розміром  $q$  з виходу інтерлівера  $\pi$  у процесі роботи турбо-кодека підкоряється псевдовипадковому закону [11]. За замовчуванням встановлено метод генерації псевдовипадкових величин аналогічний до того, який використовується для джерела інформації (псевдовипадковий). Але існує можливість вибору закону генерації величин з наступного набору: за стандартом JPL та ECSS-E-ST-50-01C, Berrou-Glavieux, золотий, лінійний, блокувий, діагональний інтерлівери.

У програмі для модему реалізовано використання модуляції з невисокими кратностями, наприклад BPSK та QPSK. За замовчуванням встановлено BPSK-модем.

У програмному модулі для моделювання каналу зв'язку реалізовано гаусівський розподіл завад AWGN, що означає статистичну незалежність потоку помилок за центральною граничною теоремою. Для реальних каналів зв'язку це припущення не завжди правильне, оскільки помилки в таких системах мають виражену тенденцію до групування у пакети помилок. Існує можливість вибору в процесі моделювання методу генерації нормально розподілених псевдовипадкових величин. Користувач може вибрати один з методів генерації значень шуму у каналі зв'язку з AWGN, таких як метод Box-Muller, полярний метод G. Marsaglia, метод Ziggurat та генерація за центральною граничною теоремою. Ці методи допомагають генерувати псевдовипадкові значення шуму за нормальним законом розподілу ймовірностей у каналі з AWGN, не вимагаючи великих обчислювальних потужностей [7].

Найбільш складним для програмної реалізації є турбо-декодер [7, 8, 12, 13]. У програмному модулі, який реалізує турбо-декодер застосовано принцип ітеративного ймовірнісного декодування з використанням м'яких рішень. Користувач програмного забезпечення може вибрати один із методів декодування залежно від вимог, які висуваються до вірогідності передавання даних та величини нормованого відношення сигнал/шум. Реалізовано такі методи декодування як MAP, log-MAP, PL-log-MAP, max-log-MAP, SOVA та Bi-SOVA [3, 4, 13 – 15]. Існує можливість вибору критерію зупинки процесу декодування та встановлення кількості ітерацій декодування залежно від заданих вимог. Результатом роботи програмного комплексу є послідовність отриманих символів (текстовий

файл, мультимедіа дані); значення BER залежно від  $E_b/N_0$ ; величина часу, впродовж якого передавались дані; швидкість передавання в біт/с; графічні експериментальні залежності  $BER = f(E_b/N_0)$  або  $BER = f(Q)$ , де  $Q$  – кількість ітерацій декодування даних. Користувач може взаємодіяти з програмою у діалоговому режимі та переглянути результати роботи на екрані комп'ютера у віконному інтерфейсі. На рис. 1 показано головне інтерфейсне вікно програми, яке дозволяє у діалоговому режимі впливати на параметри турбо-кодера.

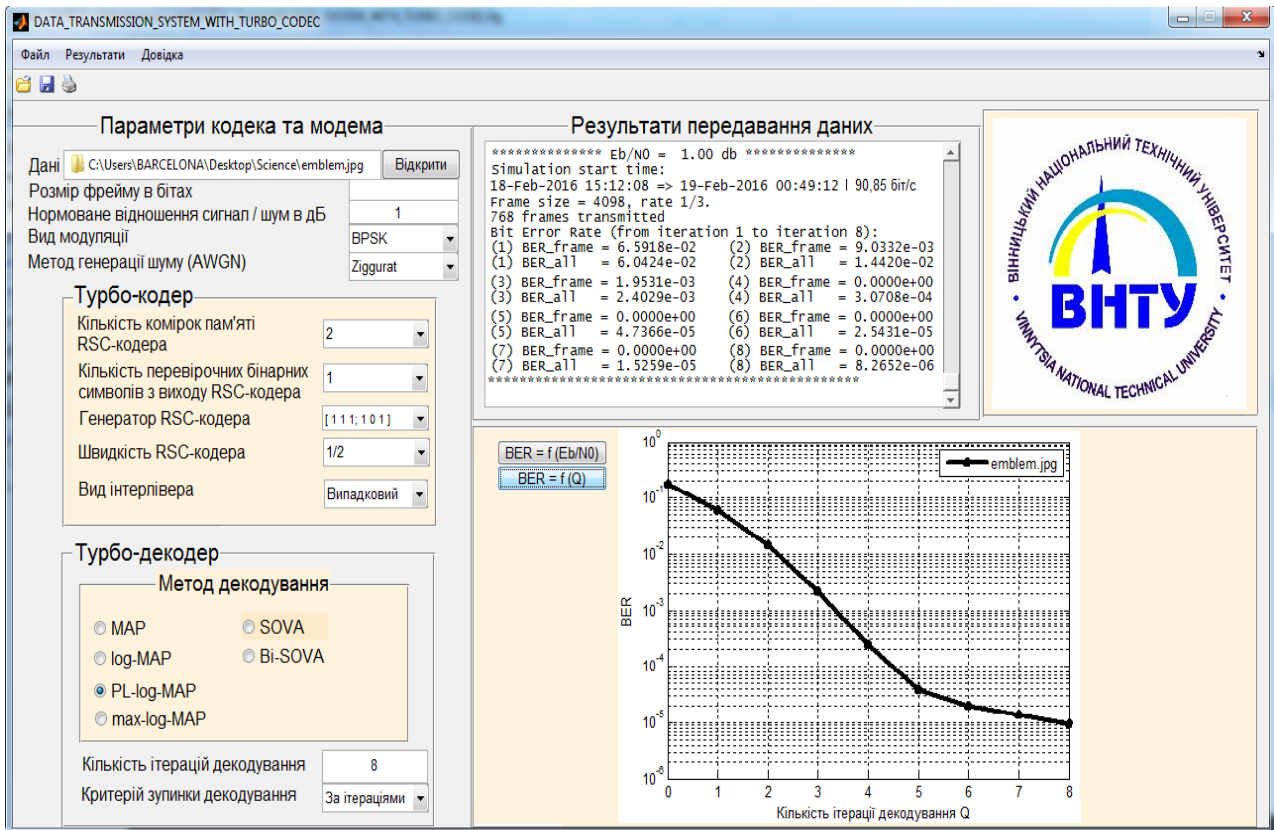


Рисунок 1 – Повна форма віконного інтерфейсу програмного забезпечення з результатами роботи

Під час роботи з програмним забезпеченням користувач повинен ввести та вибрати необхідні для роботи вхідні дані в зазначених для цього місцях інтерфейсу програми. Після цього натиснути на кнопку-перемикач  $BER = f(E_b/N_0)$  або  $BER = f(Q)$  у правій нижній панелі результатів для початку роботи програмних модулів. Програма починає видавати детальну статистику роботи у верхній правій панелі результатів. Після закінчення процесу передавання даних можна переглянути графічні відображення залежно від вибору користувача. Виконавши всі необхідні операції, користувач може зберегти необхідні результати, роздрукувати їх або закрити вікно програми, закінчивши роботу з нею. Схема програми та інструкція для роботи з нею наведена у роботі [8].

Деталізація результатів даної роботи представлена у праці [7], де проведено експериментальні дослідження над мультимедіа даними, а також надано рекомендації щодо використання програмного комплексу під час роботи розподіленої комп'ютерної системи у реальних умовах. Результати дослідження впроваджено у роботу ряду підприємств міста Вінниці, а також ВНМУ ім. М.І. Пирогова та ВНТУ.

### Висновки

Таким чином, розроблено програмний комплекс, який допомагає розв'язати задачу оцінювання ефективності роботи турбо-кодів з використанням різних методів декодування. Програму можна використати для комп'ютерного імітаційного моделювання у ході оцінювання характеристик процесу передавання даних з використанням турбо-коду або під час роботи розподіленої комп'ютерної системи зв'язку в реальних умовах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Berrou C. Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo-Codes / C. Berrou, A. Glavieux, P. Thitimajshima // Proc. In ICC'93. – Geneva, Switzerland: 1993. – P. 1064-1070.
2. 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 (ИТКИ)” / Ю.Ю. Иванов, А.Я. Кулик – Винница: ВНТУ, 28-30 мая, 2014 года. – С. 157-160.
3. Channel Coding: Theory, Algorithms, and Applications / D. Declerq, M. Fossorier, E. Biglieri and others. – Academic Press Library in Mobile and Wireless Communications, Elsevier, 2014. – 690 p.
4. Ivanov Yu.Yu. A Novel Suboptimal Piecewise-Linear-log-MAP Algorithm for Turbo Decoding / Yu.Yu. Ivanov, A.N. Romanyuk, A.Ia. Kulyk, O.V. Stukach // Proceedings on XI IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015). – Omsk: Omsk State Technical University, 21-23 May, 2015. – 8 p. – Access mode: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84941086462&origin=inward&txGid=0>.
5. Иванов Ю.Ю. Декодуння та реалізація алгоритму ВСJR для турбо-коду стандартизованого в DVB-RCS / Ю.Ю. Иванов, А.Я. Кулик, Д.С. Кривогубченко // Вісник Сумського державного університету. Серія: Технічні науки. – Суми: СУМДУ, 2012. – Т. 4. – № 1. – С. 84-94.
6. Розенвассер Д.М. Сравнение помехоустойчивых кодов ВОСП / Д.М. Розенвассер // Наукові праці ОНАЗ імені О.С. Попова. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2010. – № 1. – С. 134-137.
7. Иванов Ю.Ю. Експериментальне дослідження завадостійкості турбо-кодів: числові оцінки та імітаційне моделювання нового субоптимального алгоритма PL-log-MAP / Ю.Ю. Иванов // Науковий журнал ”Вісник Вінницького політехнічного інституту”. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – № 5. – С. 76-84.
8. Иванов Ю.Ю. Завадостійке декодування турбо-кодів у розподілених комп’ютерних системах: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / Иванов Ю.Ю.; Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2016. – 174 с.
9. А.с. № 60431 України. Комп’ютерна програма “Цифрова система передавання даних з використанням турбо-кодових конструкцій в медичному телеметричному комплексі” / Ю.Ю. Иванов, І.Ю. Иванов. – К.: Державний департамент інтелектуальної власності України. – Опубл. 01.07.2015.
10. А.с. № 60433 України. Комп’ютерна програма “Емулятор роботи цифрової розподіленої комп’ютерної системи зв’язку з використанням турбо-кода та субоптимального кусочно-лінійного алгоритму декодування log-MAP” / Ю.Ю. Иванов. – К.: Державний департамент інтелектуальної власності України. – Опубл. 01.07.2015.
11. Кулик А.Я. Методи оцінювання ефективності інтерліверів у турбо-кодовій конструкції / А.Я. Кулик, Ю.Ю. Иванов // Матер. III науково-технічної конференції “Обчислювальні методи і системи перетворення інформації”: тези доповідей. – Львів, 2014. – С. 161-164.
12. Кулик А.Я. Порівняльний аналіз складності реалізації методів декодування турбо-кодів / А.Я. Кулик, С.Г. Кривогубченко, Ю.Ю. Иванов // Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія. – 2013. – № 1(26). – С. 26-31.
13. Иванов Ю.Ю. Особливості апаратно-програмної реалізації турбо-кодів: порівняльний аналіз складності реалізації на цифровому сигнальному процесорі / Ю.Ю. Иванов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 3(126). – С. 94-101.
14. Ivanov Y. A Viterbi Algorithm as a Key to Decoding Turbo-Code / Y. Ivanov, A. Kulyk, S. Krivogubchenko // Nauka i studia. – 2012. – № 11(56). – P. 60-65.
15. Soleymani M.R. Turbo Coding for Satellite and Wireless Communications / M.R. Soleymani, Y. Gao, U. Vilaipornsawai. – New York: Kluwer Academic, 2002. – 231 p.

**Іванов Юрій Юрійович** — асистент кафедри автоматичної та інформаційно-вимірювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: Yura881990@yandex.ru;

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

**Ivanov Yurii Yu.** — Assistant Professor, Faculty of Computer Systems and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: Yura881990@yandex.ru;

**Krivogubchenko Sergei G.** — Cand. Sc. (Eng), Associate Professor of Automation and Information-Measuring Devices Department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.