

КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ ТА КОМПОНЕНТИ

УДК 519.72

Р. Н. Кветний, С. Г. Кривогубченко, Ю. Ю. Іванов

АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ MAX-LOG-MAP ТУРБО-ДЕКОДЕРА

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Анотація. Вимоги до швидкості та надійності переданих даних постійно зростають. Для підвищення енергетичної ефективності та вірогідності переданої інформації практично у всіх сучасних цифрових системах застосовується завадостійке кодування. Найбільш помітним досягненням у теорії завадостійкого кодування за останні роки є турбо-код. У статті розглядаються питання, пов'язані з сучасними методами турбо-кодування, перспективними для застосування у системах передавання даних різного функціонального призначення. Представлено математичний апарат субоптимального посимвольного методу турбо-декодування *max-log-MAP* та розроблено його апаратну архітектуру. Під час експериментальних досліджень визначено обчислювальну складність даного методу декодування. Показано моделювання роботи методу *max-log-MAP* для турбо-коду з різною довжиною блоку даних та при збільшенні ітерацій декодування, наведено результати передавання мультимедійних даних.

Ключові слова: завадостійке кодування, турбо-код, декодування, логарифм якобіана, апроксимація, *max-log-MAP*, передавання даних, апаратна архітектура, моделювання, мультимедійні дані.

Аннотация. Требования к скорости и надежности передаваемых данных постоянно растут. Для повышения энергетической эффективности и достоверности передаваемой информации практически во всех современных цифровых системах применяется помехоустойчивое кодирование. Наиболее заметным достижением в теории помехоустойчивого кодирования в последние годы является турбо-код. В статье рассматриваются вопросы, связанные с современными методами турбо-кодирования, перспективными для применения в системах передачи данных различного функционального назначения. Представлены математический аппарат субоптимального посимвольного метода турбо-декодирования *max-log-MAP* и разработана его аппаратная архитектура. Во время экспериментальных исследований определена вычислительная сложность данного метода декодирования. Показано моделирование работы метода *max-log-MAP* для турбо-кода с разной длиной блока данных и при увеличении итераций декодирования, приведены результаты передачи мультимедийных данных.

Ключевые слова: помехоустойчивое кодирование, турбо-код, декодирование, логарифм якобиана, аппроксимация, *max-log-MAP*, передача данных, аппаратная архитектура, моделирование, мультимедийные данные.

Abstract. The speed and reliability of the transmitted data is constantly increasing. In order to increase the energy efficiency and reliability of the transmitted information almost in all modern digital systems is employed an error-correcting coding. The most notable achievement in the theory of error-correcting coding in recent years is a turbo-code. In this article are considered the issues, related to the modern turbo-coding methods, promising for using in data transmission systems of different functional purposes. The mathematical apparatus of the sub-optimal symbol-by-symbol turbo-decoding method *max-log-MAP* is presented and its hardware architecture is developed. During experimental researches the computational complexity of this decoding method was determined. The simulation of the *max-log-MAP* method for the turbo-code with different data block lengths and with different decoding iterations is shown, and the results of the multimedia data transmission are presented.

Key words: error-correcting coding, turbo-code, decoding, Jacobian logarithm, approximation, *max-log-MAP*, data transmission, hardware architecture, simulation, multimedia data.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2018-43-3-48-53>.

Вступ

Процес передавання даних в інформаційних системах чутливий до помилок. Існують коди-детектори, що знаходять помилки, та коригуючі коди, які також і виправляють помилки. У симплексних каналах зв'язку усувають помилки за допомогою коригуючих кодів; у дуплексних – досить застосування кодів, що виявляють помилки. В основному доцільно розглядати двійкові коди. Для боротьби із завадами в системах передавання даних розробляються методи завадостійкого кодування [1].

Одним із найсучасніших кодів для високошвидкісного передавання великого обсягу даних з великою завадостійкістю є згортковий турбо-код (ТК), який має суттєву перевагу в тому, що дозволяє забезпечити надійний зв'язок з ефективністю дуже близькою до теоретичної межі К.Е. Шеннона. ТК мають перевагу перед існуючими коригуючими кодами, оскільки дозволяють досягти компромісу між високими показниками вірогідності та швидкості передавання даних у каналах з низькою енергетикою. Саме тому науковці намагаються удосконалити даний код у напрямі підвищення швидкості та надійності передавання даних. Компанії *France Telecom* і *Telediffusion de France* запатентували певний клас ТК, що обмежує можливість їх вільного застосування, але стимулює розвиток нових методів кодування, таких як код з низькою щільністю перевірок на парність (*LDPC – Low-Density Parity-check Code*) [2, 3].

Слід зазначити, що реалізація сучасних завадостійких систем передавання цифрової інформації неможлива без застосування кодеків, виконаних за сучасною технологією, здатних працювати на високих тактових частотах, що дозволяє підвищити ефективність використання апаратної реалізації, енергетичну ефективність, завадостійкість, а також позитивно позначається на економічному ефекті [4, 5]. Декодер ТК є найбільш ресурсомістким компонентом апаратури. Відповідно, під час роботи з даним кодом виникає проблема його декодування і реалізації цієї процедури.

Р. Н. Кветний, С. Г. Кривогубченко, Ю. Ю. Іванов, 2018

Турбо-коди з імовірнісними методами 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 тощо. Наприклад, дослідження *NASA JPL (Mars Reconnaissance Orbiter + Mars Science Laboratory)* дозволили отримати високоякісні фотографії і відеофайли поверхні Марса за допомогою марсохода *Curiosity* та турбо-кода (швидкість $R = 1/6$, кадр 8920 бітів) [3, 6, 7].

Найбільшого практичного поширення знайшли такі методи турбо-декодування, як *SOVA (Soft-Output Viterbi Algorithm* – алгоритм Вітербі з "м'яким" виходом); *MAP (Maximum A Posteriori Probability* – алгоритм декодування за максимумом апостеріорної імовірності) та модифікації для зниження обчислювальної складності, названі *log-MAP* та *max-log-MAP*. Мікросхеми, які реалізують ці методи, були створені компаніями *Advanced Hardware Architectures (AHA)* та *Altera* [6, 8, 9]

Актуальність

Таким чином, удосконалення методів роботи з ТК, приймання, а також формування даного коду з використанням обчислювальної потужності технічних пристроїв, дослідження ймовірнісно-енергетичних характеристик процесу передавання інформації є актуальними теоретичними і прикладними задачами.

Мета

Метою роботи є аналіз та експериментальне дослідження *max-log-MAP* декодера завадостійкого ТК, а також синтез апаратної архітектури для роботи з даним кодом в розподілених комп'ютерних системах різного функціонального призначення.

Задачі

Для досягнення мети необхідно виконати наступні задачі:

- 1) проаналізувати процес передавання даних;
- 2) розробити апаратні засоби та програмне забезпечення для роботи з ТК;
- 3) оцінити обчислювальну складність турбо-декодування;
- 4) провести комп'ютерне моделювання процесу передавання даних.

Метод турбо-декодування *max-log-MAP*

Ітеративний метод оптимального посимвольного декодування ТК кодів на трелліс-діаграмі, представлений у роботі [8], розглядає загальний випадок марківського джерела інформації (при фіксованому теперішньому майбутнє незалежне від минулого), яка передається дискретним каналом без пам'яті (вихідний символ у даний момент статистично залежить лише від відповідного вхідного символу). Даний метод дозволяє, використовуючи логарифмічне відношення функцій правдоподібності, теорему Байєса та ряд математичних перетворень, отримати правило ухвалення рішення відоме як максимум апостеріорної імовірності *MAP*, яке можна представити у вигляді правила мінімальної імовірності помилки з урахуванням априорної імовірності даних:

$$\Lambda(\bar{U}_i) = \log \left(\frac{p(\bar{U}_i = 1 | \bar{r})}{p(\bar{U}_i = 0 | \bar{r})} \right) = \log \left(\frac{\sum_m \sum_{m'} \alpha_{i-1}(m') \cdot \gamma_i^{(1)}(m', m) \cdot \beta_i(m)}{\sum_m \sum_{m'} \alpha_{i-1}(m') \cdot \gamma_i^{(0)}(m', m) \cdot \beta_i(m)} \right). \quad (1)$$

де $\alpha_i(m)$ та $\beta_i(m)$ – метрики прямого та зворотного шляхів; $\gamma_i^{(j)}(m', m)$ – метрика ребра;

\bar{U}_i – поданий інформаційний символ; \bar{r} – прийнята послідовність.

Застосування логарифмів метрик для формули (1) дає змогу перейти до методу декодування *log-MAP*, який має меншу обчислювальну складність, легко розпаралелюється і зберігає оптимальність методу декодування *MAP* (еквівалентний йому) [10]. Його значною перевагою є те, що він працює в логарифмічній області, де операція множення перетворюється на додавання. Отже, якщо здійснити логарифмування метрик ребра, прямого та зворотного шляху, при цьому ввівши позначення

$$\begin{cases} \log a_i(m) = A_i(m); \\ \log \gamma_i^{(j)}(m', m) = Y_i^{(j)}(m', m); \\ \log \beta_i(m) = B_i(m), \end{cases} \quad (2)$$

то у результаті спрощень можна отримати наступне логарифмічне відношення:

$$\Lambda(\bar{U}_i) = \log \left(\frac{\sum_{m'} \sum_m \exp(A_{i-1}(m') + Y_i^{(1)}(m', m) + B_i(m))}{\sum_m \sum_{m'} \exp(A_{i-1}(m') + Y_i^{(0)}(m', m) + B_i(m))} \right). \quad (3)$$

Для розкриття функції логарифму суми експоненціальних складових застосовують логарифм якобіана [10]:

$$\log(\exp(\Omega) + \exp(\Psi)) = \max(\Omega, \Psi) + \log(1 + \exp(-|\Omega - \Psi|)). \quad (4)$$

Нехтуючи обчисленням коректуючої частини (залишивши тільки операцію максимуму), отримаємо простий субоптимальний метод турбо-декодування *max-log-MAP*, який втрачає приблизно 10-20% ефективності. Загальний вираз для прийняття рішення про значення бінарного інформаційного символу можна записати таким чином [11]:

$$\Lambda(\bar{U}_i) \approx \max_{m', m} \{A_{i-1}(m') + Y_i^{(1)}(m', m) + B_i(m)\} - \max_{m', m} \{A_{i-1}(m') + Y_i^{(0)}(m', m) + B_i(m)\}. \quad (5)$$

Отже, отримавши "м'який" розв'язок, доцільно перейти до "жорсткого", використавши кусково-постійну функцію

$$\bar{U}_i = \text{sign}(\Lambda(\bar{U}_i)). \quad (6)$$

Для уточнення результату декодування декодована (зовнішня) інформація першого (другого) компонентного декодера з урахуванням перемішування π використовується як початкова (априорна або внутрішня) інформація для другого (першого) декодера. Принцип подачі вихідних даних назад на вхід аналогічний турбонаддуву двигуна з основним робочим елементом – турбокомпресором, тому ТК має таку назву. Також у цьому процесі використовується канална інформація. Такі дії, виконані багаторазово, поки вихідні рішення не сходяться на стабільному наборі значень, дозволяють підвищити ефективність декодування [6].

Розв'язання поставлених задач

Обчислювальну складність методу декодування *max-log-MAP*, що визначається як кількість елементарних математичних операцій (ЕМО), які необхідно виконати турбо-декодеру на цифровому сигнальному процесорі, представлено в табл. 1, де m – кількість комірок пам'яті згорткового кодера, а h – загальна кількість символів з його виходу [7, 9, 10, 12].

Таблиця 1 – Складність методу *max-log-MAP*

ЕМО	Параметри методу декодування <i>max-log-MAP</i>							
	$\gamma_k(s', s)$	$\alpha_k(s)$	$\beta_{k-1}(s')$	Нормалізація α та β		Λ	$\Lambda_{\text{зовн}}$	\bar{U}_i
<i>ADD</i>	$2^{m+1} \cdot h$	2^{m+1}	2^{m+1}	–	–	2^{m+2}	–	–
<i>SUB</i>	–	–	–	2^m	2^m	1	2	–
<i>MULT</i>	$2^{m+1} \cdot (h + 3)$	–	–	–	–	–	1	1
<i>RECIPS</i>	–	–	–	–	–	–	–	1
<i>MAX</i>	–	2^m	2^m	$2^m - 1$	$2^m - 1$	$2^{m+1} - 2$	–	–
<i>ABS</i>	–	–	–	–	–	–	–	1

Якщо визначити загальну суму всіх ЕМО, врахувавши, що класичний турбо-декодер складається з двох компонентних декодерів, то можна отримати вираз

$$f_{MLM}(m, h) = 2^{m+3} \cdot h + 44 \cdot 2^m + 6. \quad (7)$$

Для побудови апаратної архітектури доцільно задати специфікацію вимог [4, 5, 7]:

- рекурсивний систематичний згортковий кодер (*RSC – Recursive Systematic Convolutional*);
- двійкова фазова модуляція (*BPSK – Binary Phase-Shift Keying*);
- кодова швидкість $R = 1/3$ (перфорація бітів відсутня);
- канал з адитивним білим гаусівським шумом (*AWGN – Additive White Gaussian Noise*);

– кількість блоків оперативної запам'ятовувальної пам'яті дорівнює 2.

Апаратну архітектуру *max-log-MAP* декодера можна представити схемою, яка наведена на рис. 1.

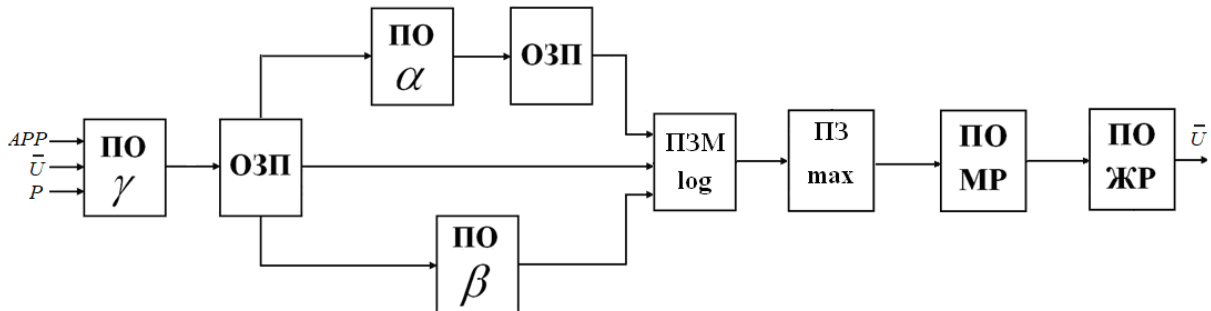


Рисунок 1 – Архітектура запропонованого *max-log-MAP* декодера:

APP – апостеріорна ймовірність для переданої інформації; *P* – біти парності; ПО – пристрій розрахунку метрик; ОЗП – оперативна запам'ятовувальна пам'ять; ПЗМ log – пристрій заміни метрик на їх логарифм; ПЗ max – пристрій для застосування апроксимації за максимумом; ПОМР – пристрій обчислення "м'яких" рішень; ПОЖР – пристрій для обчислення "жорстких" рішень

Використовуючи задану специфікацію вимог, можна провести моделювання роботи методу *max-log-MAP* для стандарту супутникового зв'язку *DVB-RCS (Digital Video Broadcasting – Return Channel via Satellite)* [1] з використанням різної довжини блоку ТК (96, 128, 424, 864, 1504 бінарних символів) та різної кількості ітераційних циклів (від 1 до 20, довжина блоку 544 біти). Результати, наведені на рис. 2 та 3, показують енергетичну ефективність та криву *BER (Bit Error Rate – коефіцієнт виникнення бінарних помилок)* як функцію від нормованого відношення сигнал/шум E_b/N_0 для методу декодування *max-log-MAP*.

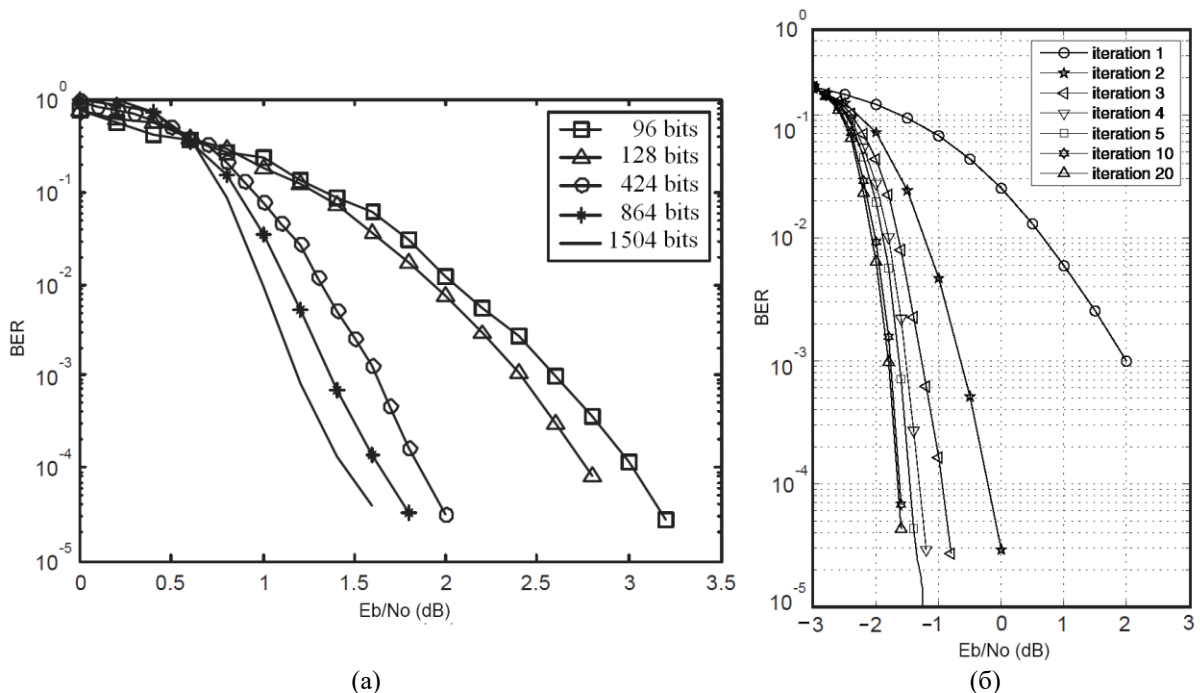


Рисунок 3 – Імітаційне моделювання методу декодування *max-log-MAP*: (а) – різна довжина кодового блоку; (б) – різна кількість ітераційних циклів роботи турбо-декодера

Оскільки кожна наступна крива *BER* проходить нижче за попередню, то можна стверджувати, що при збільшенні довжини кодового блоку та кількості ітерацій декодування характеристики завадостійкості системи покращуються, прямуючи до теоретично можливих показників.

Далі проведемо експерименти з мультимедійними даними. Виконаємо передавання кольорового зображення (768 фреймів по 4096 бітів) в умовах високих значень потужностей шумів ($E_b/N_0 = 1$ дБ). Результати роботи показані на рис. 4, де в лівому верхньому куті вказано кількість ітераційних циклів декодування Q , перше число знизу вказує на кількість помилок у бітах, а число в дужках – у символах.

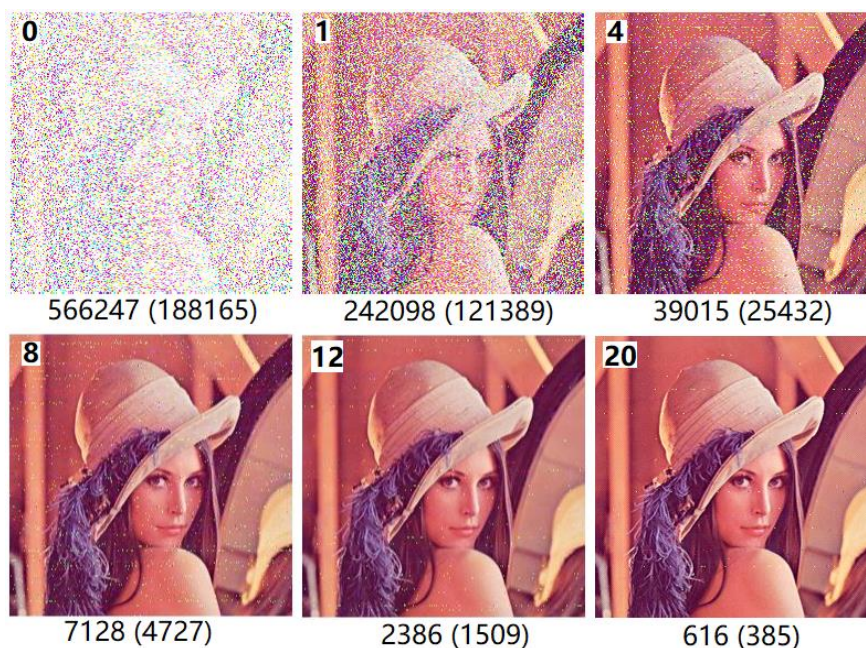


Рисунок 4 – Результати передавання мультимедійних даних

Зі збільшенням значення Q якість переданого зображення покращується (кількість помилок зменшується), причому, щоб отримати хороші результати при умові значної потужності шуму, необхідно виконати досить багато ітерацій декодування ($Q = 20$, $BER \approx 10^{-4}$, $SER \approx 10^{-3}$) [5].

Отже, схеми розподілу ресурсів *DVB-RCS* мережі забезпечують максимальну ефективність і гнучкість системи з мінімальними витратами. Даний стандарт характеризується можливістю ефективного захисту інформації в мережах передавання даних, які створюються на базі даної технології.

Висновки

1. Оптимальним методом турбо-декодування згорткових ТК є метод *MAP*. Еквівалентним до нього є *log-MAP*, у якому використовується логарифм якобіана, причому видалення у ньому компенсуючої функції дозволяє отримати субоптимальний метод *max-log-MAP*, який значно зменшує обчислювальну складність декодування, особливо під час реалізації на цифровому сигнальному процесорі.

2. Запропоновано апаратну архітектуру *max-log-MAP* декодера, яка дозволяє перейти до "м'яких" рішень.

3. Виконано імітаційне моделювання роботи *max-log-MAP* декодера в стандарті *DVB-RCS*. Визначено, що розглянутий код застосовують, щоб кодувати об'ємні інформаційні повідомлення для високошвидкісного передавання даних з великою завадостійкістю. Знизити ймовірність помилки у бінарному символі можна збільшенням довжини кодового блоку або кількості ітераційних циклів роботи турбо-декодера.

4. Експериментальні дослідження підтверджують ефективність методу турбо-декодування *max-log-MAP*, тобто його можна застосовувати на практиці, модифікувавши систему до реальних умов.

Список літератури

1. Кулик А. Я., Кривоугбченко Д. С., Іванов Ю. Ю. Декодування та реалізація алгоритму BCJR для турбо-коду стандартизованого в *DVB-RCS*. *Вісник Сумського державного університету*. 2012. Т. 4. С. 84-94.

2. Soleymani M. R., Gao Y., Vilaipornsawai U. *Turbo Coding for Satellite and Wireless Communications*. New York: Kluwer Academic, 2002. 231 p.

3. Hanzo L., Liew T. H., Yeap B. L. *Turbo Coding, Turbo Equalisation and Space-Time Coding for Transmission over Wireless Channels*. Southampton: Department of Electronics and Computer Science of UK, 2002. 746 p.

4. Кветний Р. Н., Іванов Ю. Ю., Кривоугбченко С. Г., Стукач О. В. Особливості оцінювання параметрів процесу передавання даних із використанням турбо-кодів. *Метрологія та прилади*. К: ВКФ «Фавор ЛТД», 2017. № 3 (65). С. 25-32.

5. Kvetny R. N., Bisikalo O. V., Ivanov Yu. Yu., Stukach O. V., Kulyk Ya. A., Romaniuk R. S., Sagymbekova A. Digital Image Transmission Simulation Using the PL-Log-MAP Turbo Decoding Algorithm. *Proc. on Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experi-*

ments. Wilga, 2018. P. 1-8. DOI.org/10.1117/12.2501501.

6. Woodard J., Hanzo L. Comparative Study of Turbo Decoding Techniques: An Overview. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2000. V. 49. P. 2208-2233.

7. Kvetny R. N., Ivanov Yu. Yu., Kulyk A. Ia., Sawicki D., Mekebayev N. A New Piecewise Linear Modification to log-MAP Turbo Decoding Algorithm: Comparative Analysis, Numerical Estimations and Simulation. *Proc. on Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*. Wilga, 2018. P. 1-13. DOI.org/10.1117/12.2501540.

8. Berrou C., Glavieux A., Thitimajshima P. Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo-Codes. *Proc. of ICC*. Geneva, 1993. P. 1064-1070. DOI: 10.1109/ICC.1993.397441.

9. Stukach O. V., Romanyuk A. N., Ivanov Yu. Yu. A Brief Overview and Experimental Researches of Novel PL-log-MAP Turbo Decoding Algorithm. *Proc. on XIII IEEE SIBCON*. Astana, 2017. P. 1-6. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998595.

10. Robertson P., Villebrun E., Hoeher P. A Comparison of Optimal and Sub-Optimal MAP Decoding Algorithms Operating in the Log Domain. *Proc. on ICC*. Seattle, 1995. P. 1009-1013. DOI: 10.1109/ICC.1995.524253.

11. Ivanov Yu. Yu., Romanyuk A. N., Kulyk A. Ia., Stukach O. V. A Novel Suboptimal Piecewise-Linear-log-MAP Algorithm for Turbo Decoding. *Proc. of IEEE SIBCON*. Omsk, 2015. P. 1-8. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147195.

12. Кулик А. Я., Кривогубченко С. Г., Иванов Ю. Ю. Порівняльний аналіз складності реалізації методів декодування турбо-кодів. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. Вінниця: ВНТУ, 2013. № 1 (26). С. 26-31.

Стаття надійшла: 12.11.18.

Відомості про авторів

Кветний Роман Наумович – д. т. н., професор, завідувач кафедру автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, член-кореспондент Національної академії педагогічних наук України, академік Академії метрології України, заслужений діяч науки і техніки, старший член Всесвітнього товариства інженерів з електроніки та електротехніки, Вінницький національний технічний університет.

Кривогубченко Сергій Григорович – к. т. н., доцент кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій.

Іванов Юрій Юрійович – к. т. н., старший викладач кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій.

Г. Н. Кветный, С. Г. Кривогубченко, Ю. Ю. Иванов

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ MAX-LOG-MAP ТУРБО-ДЕКОДЕР

Винницкий национальный технический университет, г. Винница

R. N. Kvyetnyy, S. G. Krivogubchenko, Yu. Yu. Ivanov

HARDWARE IMPLEMENTATION AND EXPERIMENTAL RESEARCHES OF MAX-LOG-MAP TURBO-DECODER

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia