

УДК 681.5

doi:10.20998/2413-4295.2023.04.02

ОЦІНКА ЙМОВІРНІСНИХ ТА СТАТИСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІНФОРМАЦІЙНОГО СТАНУ КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ

В. А. КРИЛОВА*, Р. О. КОТКО

кафедра автоматики та управління в технічних системах, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

*e-mail: vika_hpi@outlook.com

АНОТАЦІЯ Представлено методи визначення інформаційного стану каналу зв'язку, що базуються на оцінці ймовірнісних і статистичних характеристик помилок на виході каналу. Для адаптивних методів захисту інформації в цифрових системах зв'язку, у яких параметри кодера змінюються залежно від стану каналу передачі даних, необхідно використовувати методи контролю якості мережі на основі визначення статистичних характеристик каналу. Показано, що ймовірність помилки біта в каналі є постійною для представленого процесу формування помилок та не залежить від способу розбиття інформації на кодові блоки. Розглянуті методи оцінки статистичних характеристик каналу ґрунтуються на топологічному представленні процесів формування помилок на довжині кодових блоків. Показано, що при встановленому значенні довжини кодової послідовності при фіксуванні постійного значення ймовірності помилок на біт на виході інформаційного каналу відповідають різні розподіли помилок на множені n -послідовностей. При відомому числі станів матриці вірогідності переходів запропоновано розрахунок інтервалів спостереження для підрахунку помилкових блоків. Представлений метод дослідження статистичних характеристик, що базується на припущенні про незалежність помилок, дозволяє розробляти алгоритми та процедури оцінювання стану дискретних каналів зв'язку. Виконана у роботі оцінка потенційних меж та статистичні характеристики для ймовірності помилки декодування дозволяє встановити зв'язок між топологічними характеристиками розбиття послідовності помилок на блоки з параметрами кодів. У роботі підтверджено, що запропонований метод дозволяє синтезувати алгоритми визначення параметрів кодів, числові значення яких визначаються на основі мінімізації значень потенційної ймовірності помилки декодування.

Ключові слова: канал зв'язку; статистика помилок; ймовірність помилки декодування; параметри кодера; адаптивне кодування

ESTIMATION OF PROBABILISTIC AND STATISTICAL CHARACTERISTICS OF THE INFORMATIONAL STATE OF A COMMUNICATION CHANNEL

V. KRYLOVA, R. KOTKO

Department of Automation and control in technical systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The methods for determining the informational state of a communication channel based on the assessment of probabilistic and statistical characteristics of errors at the channel output are presented. Adaptive information protection methods in digital communication systems, where encoder parameters change depending on the channel state, require the use of network quality control methods based on determining the statistical characteristics of the channel. It is shown that the bit error probability in the channel is constant for the presented error generation process and is independent of the method of dividing information into code blocks. The methods for assessing the statistical characteristics of the channel are based on the topological representation of error generation processes over the length of code blocks. It is demonstrated that, with a fixed code sequence length and a constant bit error probability at the output of the information channel, different error distributions correspond to sets of n -sequences. With a known number of states in the likelihood transition matrix, calculation of observation intervals for counting erroneous blocks is proposed. The presented method of researching statistical characteristics, based on the assumption of error independence, allows for the development of algorithms and procedures for assessing the state of discrete communication channels. The evaluation of potential bounds and statistical characteristics for the decoding error probability enables establishing a connection between the topological characteristics of error sequence partitioning and code parameters. The work confirms that the proposed method allows the synthesis of algorithms for determining code parameters, whose numerical values are determined based on minimizing potential decoding error probabilities.

Keywords: communication channel; error statistics; decoding error probability; encoder parameters; adaptive coding

Вступ

Теоретичні та експериментальні дослідження середовища передачі даних розподілених обчислювальних мереж висвітлені в багатьох роботах. Однак практика підтверджує необхідність проведення подальших досліджень, спрямованих на розробку

методів оцінки статистичних характеристик каналів зв'язку, призначених для передачі даних в автоматизованих системах управління. Одним із методів контролю каналів передачі даних є оцінка за допомогою вторинних статистичних характеристик – статистики помилок у послідовності дискретних елементів та блоках інформації з урахуванням

залежного характеру їх спотворень. Для оцінки невідомої ймовірності, як правило, використовується коефіцієнт помилок по окремих елементах (кодовим комбінаціям) [1,2]. Однак його застосування доцільне лише на каналах із розподілом помилок, близьким до незалежного. Оцінка стану каналів, які характеризуються групуванням помилок елементів (що призводить до взаємозв'язку спотворень переданих блоків інформації) при використанні вказаного методу стає явно недостатньою і призводить до значних помилок контролю. Таким чином, застосовність цього методу обмежується періодом квазістаціонарності стану каналу зв'язку [3].

Під час аналітичного дослідження або статистичного випробування каналів передачі інформації широко використовуються ймовірнісні характеристики потоку помилок на виході каналу зв'язку [3, 4]. Знання цих характеристик, по перше, дозволяє встановити властивості реальних цифрових каналів передачі даних та розробити імітаційні моделі, алгоритми яких описують з достатньою точністю відгук середовища поширення на форму та вигляд сигналів, що передаються. По друге, ці характеристики дозволяють оцінити ймовірності помилкового декодування при використанні кодів з визначеною кодовою відстанню у режимі виправлення помилок за мінімальною відстанню Хемінга, не проводячи складних процедур кодування та декодування. Зазвичай в якості таких характеристик використовуються: усереднена ймовірність виникнення помилки на множині вихідних символів; ймовірність спотворення кодової послідовності на множині кодових послідовностей; функція кратності помилок, яка визначається як ймовірність виникнення m помилок на кодовій послідовності довжини [5]. Тим не менше, ці характеристики не надають жодної інформації щодо топології помилок на виході каналу зв'язку та їх розподілу на довжині кодової послідовності. Канали зв'язку при однаковій ймовірності елементарної помилки або ймовірності спотворення кодової послідовності можуть значно відрізнятися топологією помилок на кодовій послідовності, що має важливе значення при встановленні способів підвищення достовірності передачі інформації у інформаційних каналах [6,7].

Мета роботи

Метою роботи є дослідження методів оцінки якості каналу з урахуванням ймовірнісних характеристик потоку помилок в інформаційних системах з адаптивним алгоритмом кодування/декодування. Встановлення та визначення параметрів двійкових завадостійких кодів, що є оптимальними до статистичних характеристик та стану каналу зв'язку та відповідають характеристикам (n, m) розбиття послідовності помилок.

Виклад основного матеріалу

Підвищення достовірності контролю при заданих часових характеристиках може бути досягнуто за рахунок врахування групового характеру розподілу помилок у каналі. Представлений метод дослідження статистичних характеристик, що базується на припущенні про незалежність помилок, дозволяє розробляти алгоритми та процедури оцінювання стану дискретних каналів зв'язку.

Задача контролю вірності інформації та оцінки стану дискретного каналу на основі статистики помилок у прийнятій послідовності дискретних елементів може розглядатися як статистична проблема [8]. При цьому задача контролю зводиться до оцінки невідомої ймовірності на основі експериментальних даних та прийняття відповідного рішення про стан каналу шляхом порівняння отриманої оцінки з встановленим пороговим значенням.

Методи аналізу статистичних характеристик дискретного каналу зв'язку ґрунтуються на представленні множини помилкових символів на виході дискретного каналу. При розбитті послідовності помилок на n -послідовності, кількість помилкових символів може бути представлена

$$E = \sum_{i=1}^n i \cdot S_i^{[n]}, \quad (1)$$

де i – вага n -послідовності $e^{[n]}(t)$; $S_i^{[n]}$ – кількість n -послідовностей $e^{[n]}(t)$ з помилкою ваги i .

Зміна довжини n -послідовності призводить до перерозподілу помилок для визначеної множини помилкових символів. Для характеристики цього явища вводиться поняття вектора топології помилок:

$$\vec{S}^{[n]} = \{S_1^{[n]}, S_2^{[n]}, \dots, S_m^{[n]}, \dots, S_{2^n}^{[n]}\}, \quad (2)$$

а значення компонент $S_i^{[n]}$ вектора співвідносяться кількості n -послідовностей з помилкою ваги i .

У цьому випадку значення компонент вектора відповідають кількості n -послідовностей з похибками ваги i . Вектор топології помилок дозволяє описувати розподіл помилок на виході дискретного каналу при передачі даних кодовими послідовностями, а також пов'язувати ймовірність помилки біта з функцією кратності помилок [9]

$$p_\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n i \cdot S_i^{[n]}}{E}. \quad (3)$$

Практичний інтерес представляє розгляд питання, яким чином змінюється топологія помилок на $e^{[n]}(t)$, при зміні довжини кодової послідовності і пов'язані з цим змінами в топології статистичних характеристик $P(\geq 1, n)$ і $P(i, n)$ при зміні n . Отримані

відношення дозволять, до певної міри, наблизитися до розв'язання завдання вибору кодів, при реалізації яких ймовірність помилки декодування мінімізується в контексті розподілу потоку помилок на виході дискретного каналу зв'язку.

Формула, яка пов'язує ймовірність помилки біта з функцією кратності помилок

$$p_{\sigma} = P(\geq 1, n) - \sum_{i=1}^{n-1} \left(1 - \frac{i}{n}\right) \cdot P(i, n). \quad (4)$$

Аналіз відношень між ймовірністю помилки на біт, функцією кратності помилок і вектором топології помилок для різних значень n дозволив виявити ряд закономірностей [10, 11]. Перше твердження полягає в тому, що при визначеному значенні довжини кодової послідовності одному і тому ж значенню ймовірності помилки на біт на виході дискретного каналу відповідають різні топології помилок на множині n -послідовностей помилок. Так, якщо припустити, що два дискретних канали зв'язку (можливо, різних типів) мають на виході однакове значення ймовірності помилки на біт, це не означає, що вони мають однаковий розподіл помилок на довжині кодових послідовностей.

Функція послідовності помилок $E_j(i)$ на виході дискретного каналу визначається виразом

$$E_j(i) = \sum_{i=1}^n i \cdot S_i^{[n]}, \quad (5)$$

де $S_i^{[n]}$ – кількість n -послідовностей з помилкою ваги i при розбитті $E_j(i)$ на блоки довжиною n .

Для довільної j -ї реалізації при розбитті $E(i)$ на послідовності довжиною m та n можна записати

$$\sum_{i=1}^m i \cdot S_i^{[m]} = \sum_{i=1}^n i \cdot S_i^{[n]}, \quad (6)$$

де m і n визначають верхню межу вагової функції помилок на послідовностях m і n .

При виконанні умови

$$\sum_{i=m+1}^n i \cdot S_i^{[n]} = 0 \quad (7)$$

впливає, що

$$\sum_{i=1}^m i \cdot S_i^{[m]} = \sum_{i=1}^m i \cdot S_i^{[n]}. \quad (8)$$

Оскільки верхня межа сумування для лівої та правої частини (8) однакова, то вагова функція помилок n -послідовностей $e^{[n]}(i)$ дорівнює ваговій функції m -послідовностей $e^{[m]}(i)$, то є на довжині

послідовності $e^{[n]}(i)$ не виникає помилок вагою більше, ніж m . Якщо умова (8) не виконується для будь-яких значень m і n , що відповідають статистиці помилок каналу, то необхідним є пошуку такої пари значень m і n , при якій права частина (8) є мінімальною.

Ймовірність помилки декодування (n, k) -коду залежить від ймовірності помилки біта та інформаційної швидкості коду. R . Щоб отримати вираз для $P_{\text{пом.дек}}$ в явному вигляді, зробимо припущення, що при зміні та адаптації довжини кодового блоку значення ймовірності помилки \bar{p}_{σ} для j -реалізації послідовності помилок $E(i, j)$ на виході дискретного каналу не залежать від цих змін, тому:

$$P_{\text{пом.дек}}^* = \bar{p}_{\sigma} - \sum_{i=1}^m \frac{i}{n} \cdot P(i, n). \quad (9)$$

Потенційна ймовірність помилки процесу декодування кодової послідовності є функцією каналу зв'язку. Вона визначається статистикою помилок на виході каналу та встановлює міру можливостей корегуючих властивостей кодів під час її реалізації [12]. Як міра, вона повинна відображати функціональну залежність від ймовірності помилки біта та мати топологічні характеристики (тобто характеристики розбиття послідовності помилок на блоки), адекватні параметрам помилковості-стійких кодів. Межі для потенційної ймовірності помилки декодування кодової послідовності визначаються

$$0 \leq P_{\text{пом.дек}}^* \leq \bar{p}_{\sigma}. \quad (10)$$

Рівність нулю в наведеному рівнянні досягається при виконанні умови (8), тобто коли на множині розбиттів $E_j(i)$ послідовності існують такі значення (n, m) , при яких на довжині n -послідовності не виникають помилки ваги більше m , при цьому

$$\bar{p}_{\sigma} = \sum_{i=1}^m \frac{i}{n} \cdot P(i, n) \text{ і } P_{\text{пом.дек}}^* = 0. \quad (11)$$

Наприклад, для каналу зв'язку, що має незалежні помилки та характеризується вектором топології виду

$$\vec{V}_d = \{V_1^{[n]}, 0_2, 0_3, \dots, 0_m, \dots, 0_{n-1}, 0_n\},$$

тобто коли при заданому m на довжині n -послідовностей формуються лише одноразові помилки

$$\sum_{d=1}^m \frac{d}{n} \cdot P(d, n) = \frac{P(1, n)}{n} = \bar{p}_{\sigma} \cdot \frac{n}{n} = \bar{p}_{\sigma}. \quad (12)$$

Права межа для потенційної ймовірності помилки декодування може бути досягнутою асимптотичним наближенням її значень до \bar{p}_{σ} .

Також, треба зауважити, що потенційна ймовірність дорівнює ймовірності помилки біта за умови

$$\sum_{i=1}^m \frac{i}{m} \cdot P(i, n) = 0 \tag{13}$$

i

$$P_{ном.дек}^* = \bar{p}_\sigma \tag{14}$$

Для каналу з групуванням помилок, для виконання цієї умови, вектор помилок повинен мати вигляд

$$\vec{V}_d = \{0_1, 0_2, \dots, 0_{m-1}, 0_m, \dots, 0_{n-1}, V_n^{[n]}\}$$

тобто при заданому значенні m на довжині n -послідовності в каналі зв'язку формуються $n - m$ кратні помилки.

В межах зазначених меж значення потенційної ймовірності помилки декодування визначаються топологією помилок на множині $\{n, m\}$ - розбиттів послідовності помилок і рівність нулю $P_{ном.дек}^*$ виконуються всякий раз, коли при $m < n$ на довжині n -послідовності не виникає помилок кратності більше, ніж m .

Відомо, що суттєвим обмеженням при виборі параметрів кодера є те, що з трьох параметрів апріорі два повинні бути задані [13,14].

$$R \leq 1 - \frac{\log_2 \sum_{j=1}^{i_g-1} C_{n-1}^j}{n} \tag{15}$$

Це обставина є суттєвим обмеженням при виборі коду, оптимального для статистики помилок в реальних каналах зв'язку [15]. Виконана в роботі оцінка потенційних меж для ймовірності помилки декодування кодової послідовності дозволяє зняти обмеження вибору параметрів коду в адаптивних системах захисту інформації. Також ця оцінка дозволяє пов'язати топологічні характеристики розбиття послідовності помилок на блоки з параметрами блокових кодів. Це впливає з рівностей (6 і 9) при виконанні умови (7). При цьому довжина n -послідовності помилок $e^{[n]}(i)$ адекватна довжині кодового блоку n , а m є ваговою функцією помилки на $e^{[m]}(i)$. Таким чином, використовуючи формулу (15), можна визначити параметри помилковості-стійких кодів, адекватні топологічним характеристикам (n, m) -розбиттів послідовності помилок $E(i)$ на виході дискретного каналу і оптимальні до неї статистичним характеристикам.

У той самий час за результатами імітаційного моделювання показано, що умова (7) виконується для певного множини $\{n_j\}$ $j = \overline{1.. \xi}$ значень довжин розбиттів при фіксованій ваговій функції $m(i)$ послідовностей помилок $e^{[n]}(i)$. З урахуванням цієї властивості вираз (15) може бути записаний у вигляді системи рівнянь

$$\left\{ k = n_j - \log_2 \sum_{i=0}^m C_{n_j}^i \right\} \left. \begin{matrix} n \equiv \text{var} \\ m \equiv \text{const} \\ j = \overline{1, \xi} \end{matrix} \right\} \tag{16}$$

Вираз (16) є «камнем витратним» у визначенні параметрів кодера, що адаптується до стану каналу зв'язку, оскільки дозволяє змінювати (перфорувати) довжину кодового блоку n , тим самим коригуючи властивості коду залежно від змін статистики помилок у каналі зв'язку.

Обговорення результатів

Для експериментального дослідження представлених методів оцінки статистичних характеристик каналу були отримані базові та ймовірнісні форми векторів топології помилок для законів розподілу помилок, що використовуються, а також сімейства кривих потенційної ймовірності помилки декодування.

У табл. 1 наведено значення залежності максимальної ваги помилки від кодової довжини блоку з біноміальним розподілом помилок для $p_0=0,02$, $p_0=0,002$. Як очевидно з табл. 1, в деякому діапазоні параметрів вага помилок має тенденцію до утримання певного значення, яке визначає можливість переходу до кодування з використанням надлишкових символів для забезпечення підвищеної стійкості до перешкод.

Таблиця 1 – Максимальна вага помилки

	$p_0=0,02$						$p_0=0,002$							
n	6	8	10	12	14	16	18	6	8	10	12	14	16	18
max	3	5	7	8	9	9	9	1	3	3	3	3	2	3

Це означає, що при збільшенні довжини кодового блоку за рахунок введення надмірності максимальна вага помилки не збільшиться (такому випадку відповідають горизонтальні ділянки наведених графіків на рис. 1). Це яскраво свідчить про вірність розробленої методики та її відповідність реальним процесам у дискретних каналах зв'язку, а, отже, і доцільність її використання щодо найбільш оптимального алгоритму кодування при адаптації до завадостійкої обстановки в даний момент часу.

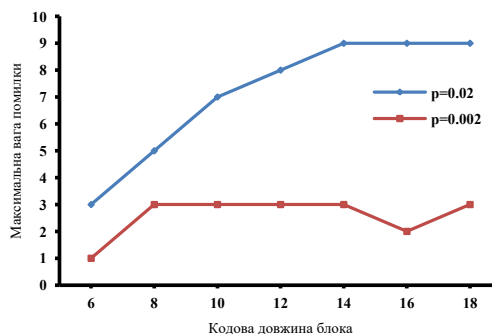


Рис. 1 – Залежність максимальної ваги помилки від довжини кодового блоку

Вигляд імовірнісних та базових форм векторів топології повністю підтверджує відомі раніше теоретичні припущення про те, що при збільшенні кодової довжини блоку кількість помилок у ньому збільшується і прагне середньої частоти помилок у каналі, а частка блоків, кількість помилок у якій значно відрізняється від цього середнього значення стає дуже малою.

Висновки

При збільшенні кодової довжини блоку і незмінної кратності помилок, що виправляються, максимальна вага помилок залишається незмінною. Цей факт дозволяє реалізувати алгоритм кодування декодування, оптимальний до завадостійкої обстановки в досліджуваному каналі зв'язку при заданій інформаційній швидкості, тобто перейти до кодування з більшою інформаційною швидкістю за незмінної ймовірності помилки декодування.

Отже, параметри блокових кодів, адекватні (n, m) -розбиттям послідовності помилок на виході дискретного каналу зв'язку, визначаються відношенням (16) з використанням потенційних меж для вагової функції помилок послідовностей. Вираз (16) вказує на можливість синтезувати стійкий до помилок код зі змінними параметрами виграшу/швидкості, що адаптується до топології помилок на виході дискретного каналу зв'язку.

Аналіз результатів моделювання показав:

– відповідність теоретичних положень розробленої методики оцінки статистичних характеристик дискретного каналу зв'язку з результатами імітаційного моделювання потоку помилок на його виході;

– можливість вибору та визначення параметрів завадостійких блокових кодів оптимальних до статистики помилок на виході каналу передачі даних;

– можливість отримання заданих значень достовірності передачі, вираженої через ймовірність помилки декодування, у широкому діапазоні змін значень ймовірності помилки на біт.

Усі результати експериментів повною мірою відповідають отриманим раніше теоретичним положенням розробленої методики.

Список літератури

1. Щуровська А. Ю. *Статистичні методи в галузі зв'язку: навчальний посібник*. Одеса. ОНАЗ, 2014. 204 с.
2. Бараник З. П. *Статистика: навчальний посібник для дистанційного навчання*. Київ. Університет «Україна», 2005. 268 с.
3. Волошко С. В., Дегтярьова Л. М., Курчанов В. М., Семенов В. М. Контроль параметрів цифрових каналів та трактів на мережах зв'язку України. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2017. №3(30). С. 14–18. doi: 10.33099/2311-7249/2017-30-3-14-17.
4. Kuchak V. M., Tromsyuk V. D. Initial data processing algorithms of bit error rate testers. *Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer*

science (TCSET'2016): *proceedings of the Int. Conf., Lviv-Slavsko, February, Lviv*. Publishing House of Lviv Polytechnic, 2016. doi: 10.1109/TCSET.2016.7452117.

5. Ilchenko M., Uryvsky L., Moshynska A., Osypchuk S. Empirical and analytical energy thresholds of Modulation-Coding Schemes research in IEEE 802.11n devices. *14th International Conference on Advanced Trends in RadioElectronics, Telecommunications and Computer Engineering* (TCSET). 2018. doi:10.1109/TCSET.2018.8336361.

6. Mykhalevskiy D. V. Investigation of wireless channels of 802.11 standard in the 5GHz frequency band. *Latvian journal of physics and technical sciences*. 2019. № 1. P. 51. doi: 10.2478/lpts-2019-0004.

7. Benchimol I. B., Pimentel C., Souza R. D., and Uchôa-Filho B. F. A new computational decoding complexity measure of convolutional codes. *EURASIP J. Adv. Signal Process.* 2014. No. 1. P. 173. doi:10.1186/1687-6180-2014-173.

8. Šljivo D., Kerkhove L., Tian J., Munteanu A., Moerman I. Performance evaluation of IEEE 802.11 ah networks with high-throughput bidirectional traffic. *Sensors*. 2018. Vol. 18. No. 2. P. 1–28. doi:10.3390/s18020325.

9. Wang Y., Li M. The statistical analysis of IEEE 802.11 wireless local area network-based received signal strength indicator in indoor location sensing systems. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2017. 13 (12). doi: 10.1177/1550147717747858.

10. Dhawankar P., Le-Minh H., Aslam N. Throughput and Range Performance Investigation for IEEE 802.11a, 802.11n and 802.11ac Technologies in an On-Campus Heterogeneous Network Environment. *11th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP)*. 2018. P. 1-6. doi: 10.1109/csndsp.2018.8471865.

11. Miroschnyk M., Korytchinko T., Demihev O., Krylova V., Karaman D., Filippenko I. Practical methods for de Bruijn sequences generation using non-linear feedback shift registers. *14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*. 2018. P. 1157-1161. doi: 10.1109/TCSET.2018.8336400.

12. Uryvsky L., Shmihel B. Boundary Parameters for a Qualitative Assessment of Digital Communication Channels with Specified Reliability Characteristics. *IEEE International Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*. 2020. P. 659-662. doi: 10.1109/PICST51311.2020.9468045.

13. Sinha T., Bhaumik J. Error-rate analysis of polar code designs using genetic algorithm for additive white Gaussian noise channel. *International Journal of Communication Systems*. 2023. P. e5611. doi: 10.1002/dac.5611.

14. Wilkinson T. A., Jones A. E. Minimisation of the peak to mean envelope power ratio of multicarrier transmission schemes by block coding. *Proc. 21st IEEE 45th Veh. Technol. Conf. Countdown Wireless*. 1995. Vol. 2. P. 825–829. doi: 10.1109/VETEC.1995.504983.

15. Jiang T., Wu Y. An overview: Peak-to-average power ratio reduction techniques for OFDM signals. *IEEE Trans. Broadcast*. 2008. Vol. 54. No. 2. P. 257–268. doi:10.1109/TBC.2008.915770.

References (transliterated)

1. Shhurovska A. Yu. *Statystychni metody v galuzi zvyazku: navchalnyj posibnyk [Statistical methods in the field of communication: a study guide]*. Odessa. OНАЗ, 2014, 204 p.

2. Baranyk Z. P. *Statystyka: navčalnyj posibnyk dlja dystancijnogo navčannja [Statistics: A Study Guide for Distance Learning]*. Kyiv. Universytet „Ukraina”, 2005, 268 p.
3. Voloshko S. V., Degtyarova L. M., Kurchanov V. M., Semenov V. M. Kontrol parametriv cyfrovix kanaliv ta traktiv na mrezhax zvyazku Ukrainy. [Control of the parameters of digital channels and paths on the communication networks of Ukraine]. *Suchasni informacijni tehnologiyi u sferi bezpeky ta oborony*, 2017, № 3(30), pp. 14–18, doi: 10.33099/2311-7249/2017-30-3-14-17.
4. Kychak V. M., Tromsyuk V. D. Initial data processing algorithms of bit error rate testers. *Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science (TCSET'2016): proceedings of the Int. Conf., Lviv-Slavsko, February, Lviv*. Publishing House of Lviv Polytechnic, 2016, doi: 10.1109/TCSET.2016.7452117.
5. Ilchenko M., Uryvsky L., Moshynska A., Osypchuk S. Empirical and analytical energy thresholds of Modulation-Coding Schemes research in IEEE 802.11n devices. *14th International Conference on Advanced Trends in RadioElectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, 2018, doi:10.1109/TCSET.2018.8336361.
6. Mykhalevskiy D. V. Investigation of wireless channels of 802.11 standard in the 5GHz frequency band. *Latvian journal of physics and technical sciences*, 2019, no. 1, p. 51, doi: 10.2478/lpts-2019-0004.
7. Benchimol I. B., Pimentel C., Souza R. D., Uchôa-Filho B. F. A new computational decoding complexity measure of convolutional codes. *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, 2014, no. 1, p. 173, doi:10.1186/1687-6180-2014-173.
8. Šljivo D., Kerkhove L., Tian J., Munteanu A., Moerman I. Performance evaluation of IEEE 802.11 ah networks with high-throughput bidirectional traffic. *Sensors*, 2018, Vol. 18, no. 2, pp. 1–28, doi:10.3390/s18020325.
9. Wang Y., Li M. The statistical analysis of IEEE 802.11 wireless local area network-based received signal strength indicator in indoor location sensing systems. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2017, 13 (12), doi: 10.1177/1550147717747858.
10. Dhawankar P., Le-Minh H., Aslam N. Throughput and Range Performance Investigation for IEEE 802.11a, 802.11n and 802.11ac Technologies in an On-Campus Heterogeneous Network Environment. *11th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP)*, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/csndsp.2018.8471865.
11. Miroschnyk M., Korytchinko T., Demihev O., Krylova V., Karaman D., Filippenko I. Practical methods for de Bruijn sequences generation using non-linear feedback shift registers. *14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*, 2018, pp. 1157-1161, doi: 10.1109/TCSET.2018.8336400.
12. Uryvsky L., Shmihel B. Boundary Parameters for a Qualitative Assessment of Digital Communication Channels with Specified Reliability Characteristics. *IEEE International Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, 2020, pp. 659-662, doi: 10.1109/PICST51311.2020.9468045.
13. Sinha T., Bhaumik J. Error-rate analysis of polar code designs using genetic algorithm for additive white Gaussian noise channel. *International Journal of Communication Systems*, 2023, pp. e5611, doi: 10.1002/dac.5611.
14. Wilkinson T. A., Jones A. E. Minimisation of the peak to mean envelope power ratio of multicarrier transmission schemes by block coding, in *Proc. 21st IEEE 45th Veh. Technol. Conf. Countdown Wireless*, 1995, Vol. 2, pp. 825–829, doi: 10.1109/VETEC.1995.504983.
15. Jiang T., Wu Y. An overview: Peak-to-average power ratio reduction techniques for OFDM signals. *IEEE Trans. Broadcast.*, 2008, Vol. 4, no. 2, pp. 257–268, doi:10.1109/TBC.2008.915770.

Відомості про авторів (About authors)

Крилова Вікторія Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри Автоматика та управління в технічних системах; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4540-8670>; e-mail: vika_hpi@outlook.com

Krylova Viktoriia – candidate of technical sciences, associate professor at the Automation and Control in Technical Systems Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4540-8670>; e-mail: vika_hpi@outlook.com.

Котко Роман Олегович – аспірант кафедри Автоматика та управління в технічних системах, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: roman.kotko@cit.khpi.edu.ua.

Kotko Roman – PhD student of the Automation and Control in Technical Systems Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv; e-mail: roman.kotko@cit.khpi.edu.ua.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Крилова В. А., Котко Р. О. Оцінка ймовірнісних та статистичних характеристик інформаційного стану каналу зв'язку. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2023. № 4 (18). С. 13-18. doi:10.20998/2413-4295.2023.04.02.

Please cite this article as:

Krylova V., Kotko R. Estimation of probabilistic and statistical characteristics of the informational state of a communication channel. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2023, no. 4(18), pp. 13-18, doi:10.20998/2413-4295.2023.04.02.

*Надійшла (received) 18.10.2023
Прийнята (accepted) 22.10.2023*