УДК 621.391.82-048.34:621.396.94 DOI: 10.31673/2412-4338.2024.017987

Треньова Катерина Олександрівна
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ
ORCID 0009-0005-9729-2373

ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ПРИЙОМУ СИГНАЛІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ШИРОКОСМУГОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ

Анотація: *У сучасних умовах широкосмугові системи зв'язку набувають особливої актуальності. Завдяки своїй здатності забезпечувати високу пропускну спроможність та надійність, широкосмугові системи активно застосовуються у різноманітних областях, включно з мобільним зв'язком, супутниковою комунікацією та бездротовими мережами. Широкосмугові сигнали піддаються впливу завад, які можуть суттєво погіршувати якість передачі даних. Завадостійкість системи, яка характеризує її здатність зберігати ефективність передачі сигналів попри наявність завад, стає ключовим показником її надійності.*

У статті здійснено дослідження впливу адитивних завад, до яких відносяться флуктиативні, зосереджені за спектром, а також зосереджені в часі завади, і які є реалістичним вираженням ефектів зовнішнього середовища. Основна мета статті полягає у порівнянні ефективності різних методів прийому сигналів за умов впливу зазначених завад, щоб визначити оптимальні стратегії для підвищення завадостійкості широкосмугових систем зв'язку.

В статті проаналізовано зіставлення некогерентного прийому з некогерентним накопиченням (для двійкових систем) і методи прийому сигналів з фазорізницевою модуляцією. Описані математичні моделі використовують ймовірнiстний підхід для виведення функцій, що дозволяють одержати вирази для оцінки ймовірності помилки у передачі сигналів.

Значну увагу приділено впроваджено математичним алгоритмам для обчислення показників завадостійкості. Представлено розрахунки імовірностей помилок в умовах реалізації різних видів завад, а також оцінено швидкість збіжності обраних характеристик до нормального закону розподілу.

Ключові слова: *широкосмугові системи зв’язку, завадостійкість, адитивна завада, ймовірность помилки, відношення сигнал-шум, надійність, фазоварізницева модуляція, некогерентний прийом.*

Trenova Kateryna
State university of information and communication technologies, Kyiv
ORCID 0009-0005-9729-2373

OPTIMIZATION OF SIGNAL RECEPTION METHODS TO IMPROVE THE NOISE IMMUNITY OF BROADBAND COMMUNICATION SYSTEMS

Abstract*: In modern conditions, broadband communication systems are gaining special relevance. Due to their ability to provide high bandwidth and reliability, broadband systems are widely used in various fields, including mobile communications, satellite communications, and wireless networks. Broadband signals are subject to interference, which can significantly degrade the quality of data transmission. The noise immunity of a system, which characterizes its ability to maintain the efficiency of signal transmission despite the presence of interference, is becoming a key indicator of its reliability.*

The article investigates the impact of additive interference, which includes fluctuating, spectrum-centered, and time-centered interference, and which is a realistic expression of environmental effects. The main purpose of the article is to compare the effectiveness of different methods of signal reception under the influence of these interferences in order to determine the optimal strategies for improving the noise immunity of broadband communication systems.

The article analyzes the comparison of incoherent reception with incoherent accumulation (for binary systems) and methods of receiving signals with phase-difference modulation. The described mathematical models use a probabilistic approach to derive functions that allow obtaining expressions for estimating the probability of error in signal transmission.

Considerable attention is paid to the implementation of mathematical algorithms for calculating the noise immunity indicators. The calculations of error probabilities under the conditions of various types of interference are presented, and the speed of convergence of the selected characteristics to the normal distribution law is estimated.

Keywords: *broadband communication systems, interference immunity, additive interference, error probability, signal-to-noise ratio, reliability, phase-difference modulation, incoherent reception.*

1. Вступ.

Широкосмугові системи зв'язку використовуються в різних каналах зв'язку. Для кожного з цих каналів зв'язку характерні свої види завад. Тому дослідження питань завадостійкості широкосмугових систем зв'язку при різних методах прийому є актуальним.

Широкосмугові системи дозволяють ефективно боротися з зосередженими завадами і завадами, викликаними багатопроменевим характером поширення сигналу. Проте вплив цих завад усувається не повністю і вони знижують достовірність передачі інформації. Тому виникають труднощі, з якими стикаються при дослідженні реальної завадостійкості широкосмугових систем зв'язку.

В статті досліджено завадостійкість систем до адитивних. До адитивних відносяться флуктиативні, зосереджені за спектром і зосереджені в часі (імпульсні) завади. Аналіз завадостійкості при флуктиативних завадах дозволить порівняти різні методи прийому складених сигналів і показати граничні можливості кожного методу.

2. Основна частина.

Некогерентний прийом в цілому з некогерентним накопиченням (двійкові системи)

Визначимо ймовірність помилки при некогерентному прийомі з некогерентним накопиченням ортогональних в посиленому сенсі сигналів для випадку системи з активною паузою. Правило рішення про прийом першого сигналу при цьому має вид

$$\sum_{k=1}^{N} V_{k1}^2 > \sum_{k=1}^{N} V_{k2}^2 \tag{1}$$

де

$$V_{k1} = \sqrt{\left[\int_0^T x(t) s_{k1}(t) dt\right]^2 + \left[\int_0^T x(t) s_{k1}^*(t) dt\right]^2}$$

Нехай передавався сигнал $s_1(t)$ виду

$$s_1(t) = \sum_{k=1}^{N} s_{k1}(t) = \sum_{k=1}^{N} a_k \, sin(\omega_{k1} + \varphi_{k1}) \tag{2}$$

Тоді

$$x(t) = \sum_{k=1}^{N} a_k \, sin(\omega_{k1} t + \varphi_{k1} +_k) + \xi(t) \tag{3}$$

де k – невизначена фаза k-го елемента;

$\xi(t)$ – реалізація нормального випадкового процесу.

Використовуючи (4.12) і (4.13), представимо V_{k1}^2 наступним чином

$$V_{k1}^2 = \left[\int_0^T \sum_{i=1}^{N} a_i \, sin(\omega_{i1} t + \varphi_{i1} +_{i1}) \, sin(\omega_{k1} t + \varphi_{k1}) \, dt + \int_0^T \xi(t) \, sin(\omega_{k1} t + \varphi_{k1}) \, dt\right]^2 +$$

$$+\left[\int_0^T \sum_{i=1}^{N} a_i\, sin(\omega_{i1}t+\varphi_{i1}+_i)\, cos(\omega_{k1}t+\varphi_{k1})\, dt + \int_0^T \xi(t)\, cos(\omega_{k1}t+\varphi_{k1})\, dt\right]^2 \quad (4)$$

Перший і третій інтеграли у виразі (4) – табличні. З урахуванням того, що елементи складеного сигналу взаємоортогональні, отримуємо

$$V_{k1}^2 = [a_k\, cos_k + \beta\theta_{1k}]^2 + [a_k\, sin_k + \beta\theta_{2k}]^2 \quad (5)$$

де $a_k = \frac{\alpha_k T}{2}$; $\beta = \frac{\nu_0\sqrt{T}}{2}$;

θ_{1k} і θ_{2k} – незалежні нормальні випадкові величини з нульовим середнім і дисперсією, яка дорівнює одиниці.

З урахуванням ортогональності варіантів сигналу нерівності (1) можна представити в наступному вигляді:

$$\sum_{k=1}^{N}([a_k\, cos_k + \beta\theta_{1k}]^2 + [a_k\, sin_k + \beta\theta_{2k}]^2) > \sum_{k=1}^{N}([\beta\theta_{3k}]^2 + [\beta\theta_{4k}]^2)^2 \quad (6)$$

де θ_{3k} і θ_{4k} – випадкові величини, аналогічні θ_{1k} і θ_{2k} незалежні по відношенню до них.

Перенесемо всі випадкові величини в праву частину нерівності (6):

$$\sum_{k=1}^{N} a_k^2 > \beta^2\theta - \beta^2\theta - \sum_{k=1}^{N} 2a_k\beta(cos_k\, \theta_{1k} + sin_k\, \theta_{2k}) \quad (7)$$

де

$$\theta = \sum_{k=1}^{N}(\theta_{1k}^2 + \theta_{2k}^2), \theta = \sum_{k=1}^{N}(\theta_{3k}^2 + \theta_{4k}^2)$$

Для визначення ймовірності помилки знайдемо закон розподілу випадкової величини θ, що стоїть в правій частині нерівності (7).

Випадкові величини θ підпорядковані χ^2-розподілу з $2N$ ступенями свободи як сума квадратів незалежних нормальних випадкових величин з нульовими середніми і з дисперсіями, рівними одиниці. Відомо [1], що зі збільшенням числа ступенів свободи χ^2-розподіл наближається до нормального розподілу. Так як $2N>>1$ (в широкосмугових системах число елементів сигналу N приблизно дорівнює базі $2FT>>1$; зазвичай $2FT = 200 \div 1000$. Будемо вважати, що величини θ - нормальний розподіл з наступними параметрами:

$$m_1(\theta) = m_1(\theta) = 2N \quad (8)$$

$$M_2(\theta) = M_2(\theta) = 4N \quad (9)$$

Оцінимо швидкість збіжності χ^2 за нормальним законом в залежності від числа ступенів свободи $2N$. Обчислимо для цього коефіцієнти асиметрії k і експреса γ цього розподілу, які у нормального закону дорівнюють нулю. Обчислюючи всі необхідні початкові і центральні моменти розглянутого розподілу, отримаємо наступні вирази:

$$k = \frac{M_3}{\sqrt{M_2^3}} = \frac{16N}{\sqrt{64N^3}} = \frac{2}{\sqrt{N}}, \quad (10)$$

$$\gamma = \frac{M_4}{M_2^2} - 3 = \frac{48N^2 + 96N}{16N^2} - 3 = \frac{6}{N}. \quad (11)$$

Для прийнятного наближення χ^2- розподілу до нормального достатньо мати $k \leq 0{,}1$. Тоді з (10) отримуємо $N \geq 400$. Коефіцієнт γ при цьому також досить малий.

При дослідженні випадкових величин виразу (7) мова йде про швидкість збіжності до нормального закону різниці випадкових, незалежних однаково розподілених величин θ. Відомо, що розподіл різниці двох незалежних однаково розподілених випадкових величин завжди симетричний. Отже, коефіцієнт асиметрії k розподілу різниці величин θ дорівнює нулю. Знайдемо коефіцієнт розподілу різниці величин θ. Характеристична функція цього розподілу дорівнює

$$\theta(\nu) = \frac{1}{(1+4\nu^2)^N}. \tag{12}$$

Диференціюючи функцію (12), одержуємо такі значення центральних моментів розподілу різниці

$$M_2 = 8N; M_4 = 8N(24N+24). \tag{13}$$

Тоді коефіцієнт ексцесу розподілу різниці дорівнює

$$\gamma = \frac{M_4}{M_2^2} - 3 = \frac{8N(24N+24)}{64N^2} - 3 = \frac{3}{N}. \tag{14}$$

Щоб $\gamma \leq 0{,}1$ достатньо мати $N \geq 30$. Таким чином, розподіл різниці випадкових величин величин θ та θ при числі елементів N=30 в достатній мірі наближається до нормального.

Можна показати, що випадкові величини θ та θ незалежні, так як є сумами квадратів незалежних величин. Випадкові величини θ_{1k} та θ_{2k} взаємно незалежні при будь-яких k. Випадкова величина θ незалежна з величинами θ_{1k} та θ_{2k}, так як вона є сумою незалежних з θ_{1k} та θ_{2k} величин θ_{3k}^2 та θ_{4k}^2. Залишається довести незалежність величин θ величинами θ_{1k} та θ_{2k}. Всі ці випадкові величини є нормальними і, отже, для цього достатньо довести їх некорельованості, тобто що математичне очікування добутку цих величин дорівнює добутку математичного очікування.

Так як $m_1(\theta_{1k}) = m_1(\theta_{2k}) = 0$, то необхідно довести, що $m_1(\theta\theta_{1k}) = m_1(\theta\theta_{2k}) = 0$.

Обчислимо $m_1(\theta\theta_{1k})$

$$m_1(\theta\theta_{1k}) = m_1\left[\sum_{i=1}^{N}(\theta_{1i}^2 + \theta_{2i}^2)\theta_{1k}\right] = \tag{15}$$

$$= m_1\left[\left(\sum_{i=1}^{N}\theta_{1i}^2\right)\theta_{1k}\right] + m_1\left[\left(\sum_{i=1}^{N}\theta_{2i}^2\right)\theta_{1k}\right] = m_1\left[\sum_{i=1}^{N}\theta_{1i}^2\,\theta_{1k}\right] m_1\left[\sum_{i=1}^{N}\theta_{2i}^2\,\theta_{1k}\right]$$

Очевидно, що

$$m_1\left[\sum_{i=1}^{N}\theta_{2i}^2\,\theta_{1k}\right] = \sum_{i=1}^{N} m_1(\theta_{2i}^2\theta_{1k}) = \sum_{i=1}^{N} m_1(\theta_{2i}^2) m_1(\theta_{1k}) = 0, \tag{16}$$

так як величини θ_{2i}^2 та θ_{1k} незалежні при будь-яких i і k. При $i \neq k$

$$m_1\left[\sum_{i=1}^{N}\theta_{1i}^2\,\theta_{1k}\right] = \sum_{i=1}^{N} m_1(\theta_{1i}^2\theta_{1k}) = \sum_{i=1}^{N} m_1(\theta_{1i}^2) m_1(\theta_{1k}) = 0, \tag{17}$$

так як величини θ_{1k} взаємно незалежні при різних індексах. При $i = k$

$$m_1(\theta_{1i}^2\theta_{1k}) = m_1(\theta_{1k}^3) = m_3(\theta_{1k}). \tag{18}$$

Початковий момент третього порядку нормальної випадкової величини з нульовим середнім дорівнює нулю. Отже, величини θ та θ_{1k} взаємно незалежні. Аналогічно доводиться незалежність величин θ та θ_{2k}

Отже, величина θ, дорівнює правій частині нерівності (7) є нормальною випадковою величиною як сума незалежних нормальних величин [2]. Характеристики цієї величини можна визначити як суми відповідних характеристик, доданків

$$\left.\begin{aligned} m_1(\theta) &= 2N\beta^2 - 2N\beta^2 = 0 \\ M_2(\theta) &= 8N\beta^4 + 4\beta^2 \sum_{k=1}^{N} a_k^2 \end{aligned}\right\} \tag{19}$$

Таким чином, імовірність невиконання нерівності (8), тобто ймовірність помилки

$$\rho_{\text{опт}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi M_2(\theta)}} \int_{-\infty}^{-\sum_{k=1}^{N} a_k^2} exp\left(-\frac{x^2}{2M_2(\theta)}\right) dx = F\left(\frac{h}{\sqrt{2}\sqrt{1+\frac{N}{h^2}}}\right), \tag{20}$$

де

$$h^2 = \sum_{k=1}^{N} h_k^2 = \frac{P_c T}{\nu_0^2} = \frac{\sum_{k=1}^{N} a_k^2 T}{2\nu_0^2}.$$

При однакових енергіях всіх елементів отримаємо

$$a_k = a, h^2 = Nh_k = N\frac{a^2 T}{2\nu_0^2},\ \rho_{\text{опт}} = F\left(\frac{\sqrt{N}h_k}{\sqrt{2}\sqrt{1+\frac{1}{h_k^2}}}\right). \tag{21}$$

Як видно з виразу (20), завадостійкість некогерентного прийому з некогерентним накопиченням складених сигналів залежить від числа елементів сигналу N. При $h^2 >> N$ ймовірність помилки буде визначатися виразом

$$\rho_{\text{опт}} = F\left(\frac{1}{\sqrt{2}}h\right) \tag{22}$$

і не залежить від числа елементів.

При використанні складеного сигналу, енергії елементів якого не однакові, додавання елементів повинно провадитися з вагою, пропорційною енергії кожного елемента. Правило рішення (1) в цьому випадку має вигляд

$$\sum_{k=1}^{N} a_{k1}^2 V_{k1}^2 > \sum_{k=1}^{N} a_{k2}^2\, V_{k2}^2. \tag{23}$$

Ймовірність помилки при прийомі ортогональних складених сигналів відповідно до (23) дорівнює

$$\rho_{\text{опт}} = F\left(\frac{\sum_{k=1}^{N} h_k^4}{\sqrt{2}\sqrt{\sum_{k=1}^{N} h_k^6\left(1+\frac{1}{h_k^2}\right)}}\right). \tag{24}$$

Розрахунки по формулам (20) і (24) показують, що прийом за алгоритмом (24) володіє практично тією ж завадостійкістю, що і прийом по алгоритму (1). Це відбувається внаслідок того, що алгоритми (1) і (23) є лише наближеними до оптимального правила

$$\sum_{k=1}^{N} lnI_0\left(2\frac{a_k}{\nu_0^2}V_{k1}\right) > \sum_{k=1}^{N} lnI_0\left(2\frac{a_k}{\nu_0^2}V_{k2}\right) \tag{25}$$

При малих h_k^2 окремих елементів, коли апроксимація $ln\,I_0\,(x) \approx x^2$ досить точна, ймовірність помилки (24) менша, ніж (20). Однак і в цьому випадку поліпшення якості прийому при використанні алгоритму (23) мале. Практично в будь-якому випадку доцільно використовувати більш просте правило рішення (1) [3,5].

Перейдемо тепер до визначення ймовірності помилки при некогерентному прийомі з некогерентним накопиченням складених сигналів з однократною фазорізницевою модуляцією (ФРМ). Правило прийняття рішення про знак переданого символу при цьому має вид

$$singI = sing\sum_{k=1}^{N}\left[\int_0^T x_n(t)sin(\omega_k t+\varphi_k)dt\int_0^T x_{n-1}(t)sin(\omega_k t+\varphi_k)dt + \right.$$
$$\left. + \int_0^T x_n(t)sin(\omega_k t+\varphi_k)dt\int_0^T x_{n-1}(t)sin(\omega_k t+\varphi_k)dt\right] \tag{26}$$

При флуктуативних завадах *n*-та посилка сигналу, що надходить на вхід приймача, може бути записана у вигляді

$$x_n(t) = \sum_{k=1}^{N} a_k\, sin(\omega_{k1}t + \varphi_{k1} +_{kn}) + \xi_n(t), \tag{27}$$

де kn – невизначена фаза k-го елемента на *n*-ій посилці, що включає зміну фази між двома посилками.

Підставляючи (27) в алгоритм роботи приймача (26), отримаємо з урахуванням ортогональності елементів сигналу і позначень (5), знак переданого символу визначається наступною величиною:

$$singI = sing\sum_{k=1}^{N}[(a_k cos_{nk} + \beta\theta_{nk})\left(a_k cos_{(n-1)k} + \beta\theta_{(n-1)k}\right)$$
$$+ (a_k sin_{nk} + \beta\theta_{nk})\left(a_k sin_{(n-1)k} + \beta\theta_{(n-1)k}\right)] \tag{28}$$

де θ_{nk}, $\theta_{(n-1)k}$, θ_{nk}, $\theta_{(n-1)k}$, парно незалежні при всіх k нормальні випадкові величини з нульовим середнім і дисперсією, яка дорівнює одиниці.

Проводимо необхідні операції множення, представимо (28) в наступному вигляді:

$$signI = sign[\sum_{k=1}^{N} a_k^2\, cos\Delta_k + \theta + \theta] = sign[\sum_{k=1}^{N} a_k^2\, cos\Delta_k + \theta], \tag{29}$$

де Δ_k – стрибок фази між n-ою і (n-1)-ою посилками в k-му елементі (передбачається, що невизначена фаза між двома посилками не змінюється):

$$\theta = \sum_{k=1}^{N} a_k \beta \left(cos_{(n-1)k} \theta_{nk} + cos_{nk} \theta_{(n-1)k} + sin_{(n-1)k} \theta_{nk} + sin_{nk} \theta_{(n-1)k} \right),$$

$$\theta = \sum_{k=1}^{N} \beta^2 \left(\theta_{nk} \theta_{(n-1)k} + \theta_{nk} \theta_{(n-1)k} \right)$$

Так як всі елементи складеного сигналу передають одну й ту ж інформацію, то

$$cos\,\Delta_k = cos\,\Delta.$$

При однократній ФРМ з варіантами різниць фаз $\Delta = 0$ і $\Delta = \pi$ очевидно, що помилка у визначенні знака переданого символу буде відбуватися в тому випадку, якщо виконується наступна нерівність:

$$\theta < -\sum_{k=1}^{N} a_k^2 \tag{30}$$

Імовірність появи помилки знаходимо, як імовірність виконання нерівності (4.40). Для цього необхідно знайти закон розподілу та числові характеристики випадкової величини $\theta = (\theta + \theta)$.

Випадкова величина θ є нормальною випадковою величиною як сума незалежних нормальних випадкових величин і має наступні характеристики:

$$m_1(\theta) = 0, \qquad M_2(\theta) = \sum_{k=1}^{N} 2 a_k^2 \beta^2. \tag{31}$$

Випадкова величина θ представляє собою суму попарних добутків незалежних нормальних випадкових величин. Всі складові цієї суми підпорядковуються однаковим законом, незалежні як добутки незалежних величин, і так як їх число $2N$ велике, то на підставі граничної теореми можна вважати, що випадкова величина θ підпорядковуються нормальному закону розподілу з наступними параметрами:

$$m_1(\theta) = 0, \qquad M_2(\theta) = 2\beta^4 N. \tag{32}$$

Оцінимо швидкість збіжності величини θ до нормальної.

Для визначення необхідного виконання умов нормалізації числа елементів N обчислимо коефіцієнти асиметрії і ексцесу розподілу випадкової величини θ.

Використовуючи теорему про числові характеристики сукупностей випадкових величин [4], отримаємо

$$\left.\begin{array}{r} m_1(\theta) = 0,\ M_2(\theta) = 2N \\ M_3(\theta) = 0,\ M_4(\theta) = 12N^2 + 12N \end{array}\right\} \tag{33}$$

Отже, розподіл випадкової величини θ симетричний. Коефіцієнт ексцесу γ, розподілу θ дорівнює

$$\gamma = \frac{M_4}{M_2^2} - 3 = \frac{12N^2 + 12N}{4N^2} - 3 = \frac{3}{N} \tag{34}$$

нормалізації величини θ виконується при N>>3, практично $N \geq 30$.

Отже, випадкова величина θ як сума двох нормальних випадкових величин також є нормальною. Характеристики нормальної величини θ можна знайти як суму відповідних характеристик величин θ та θ так як вони незалежні. Незалежність випадкової величини θ з будь-яким з доданків θ аналогічно доказу незалежності випадкових величин, зробленому вище (вирази (16)-(19). Для величини θ маємо:

$$m_1(\theta) = 0, M_2(\theta) = 2\beta^4 N + \sum_{k=1}^{N} 2a_k^2\,\beta^2. \tag{35}$$

Імовірність помилки при прийомі сигналів з однократною фазорізницевою модуляцією (ФРМ)

$$\rho_{\text{ФРМ}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi M_2(\theta)}} \int_{-\infty}^{-\sum_{k=1}^{N} a_k^2} exp\left(-\frac{x^2}{2M_2(\theta)}\right) dx = F\left(\frac{h}{\sqrt{1+\frac{N}{h^2}}}\right) \tag{36}$$

При $a_k = a$

$$\rho_{\text{ФРМ}} = F\left(\frac{\sqrt{N}h_k}{\sqrt{1+\frac{1}{2h_k^2}}}\right) \tag{37}$$

$2h^2 >> N$ для ймовірності помилки можна спростити

$$\rho_{\text{ФРМ}} = F(h) \tag{38}$$

Як видно з виразу (36), завадостійкість некогерентного прийому з некогерентним накопиченням складених сигналів з фазорізницевою модуляцією залежить від числа елементів сигналу N.

3. Висновки.

Результати обчислення завадостійкості систем передавання інформації при впровадженні різних методів прийому у системах широкосмугового зв’язку дозволяють обрати шляхи оптимізації алгоритмів прийому. Це покращить їх ефективность в умовах завад. Розробку вказаних методик доцільно застосувати в проектуванні надійних та ефективних систем зв'язку останнього покоління.

Список використаної літератури

1. Беркман Л. Інтелектуальна система управління інфокомунікаційними мережами / Беркман Л., Барабаш О., Ткаченко О., Лаптієв О., Саланда І. // Міжнародний журнал нових тенденцій в інженерних дослідженнях, 2020. - № 8 (5). - П. 1920-1925.

2. Goldsmith, "Wireless Communications", Cambridge University Press, 2017.

3. T. S. Rappaport et al., “Millimeter Wave Wireless Communications”, Pearson Education, 2017.

4. M. K. Simon, "Probability Distributions Involving Gaussian Random Variables: A Handbook for Engineers, Scientists, and Mathematicians", Springer, 2018.

5. Q. Zhu, G. Li, "Statistical Signal Processing for Wireless Communication and Positioning", CRC Press, 2019.

6. B. Sklar, "Digital Communications: Fundamentals and Applications", Prentice Hall, 2020.

7. Zhurakovskyi B., Toliupa S., Druzhynin V., Bondarchuk A., Stepanov M. Calculation of Quality Indicators of the Future Multiservice Network/ Lecture Notes in Electrical EngineeringЭта ссылка отключена., 2022, 831, p. 197–209

8. Anakhov P., Zhebka V., Bondarchuk A., Storchak K., Sablina M. Increasing the Reliability of a Heterogeneous Network using Redundant Means and Determining the Statistical Channel Availability Factor / CEUR Workshop ProceedingsЭта ссылка отключена., 2023, 3421, p. 231–236

9. Anakhov P., Zhebka V., Popereshnyak S., Skladannyi P., Sokolov V. Protecting Objects of Critical Information Infrastructure from Wartime Cyber Attacks by Decentralizing the Telecommunications Network / CEUR Workshop ProceedingsЭта ссылка отключена., 2023, 3550, p. 240–245

References

1. Berkman L. Intelligent system of management of information communication networks / Berkman L., Barabash O., Tkachenko O., Laptiyev O., Salanda I. // International journal of new trends in engineering research, 2020. - No. 8 (5). - P. 1920-1925.

2. Goldsmith, "Wireless Communications", Cambridge University Press, 2017.

3. T. S. Rappaport et al., “Millimeter Wave Wireless Communications”, Pearson Education, 2017.

4. M. K. Simon, "Probability Distributions Involving Gaussian Random Variables: A Handbook for Engineers, Scientists, and Mathematicians", Springer, 2018.

5. Q. Zhu, G. Li, "Statistical Signal Processing for Wireless Communication and Positioning", CRC Press, 2019.

6. B. Sklar, "Digital Communications: Fundamentals and Applications", Prentice Hall, 2020.

7. Zhurakovskyi B., Toliupa S., Druzhynin V., Bondarchuk A., Stepanov M. Calculation of Quality Indicators of the Future Multiservice Network/ Lecture Notes in Electrical Engineering This link is disabled., 2022, 831, p. 197–209

8. Anakhov P., Zhebka V., Bondarchuk A., Storchak K., Sablina M. Increasing the Reliability of a Heterogeneous Network using Redundant Means and Determining the Statistical Channel Availability Factor / CEUR Workshop Proceedings This link is disabled., 2023, 3421, p. 231–236

9. Anakhov P., Zhebka V., Popereshnyak S., Skladannyi P., Sokolov V. Protecting Objects of Critical Information Infrastructure from Wartime Cyber Attacks by Decentralizing the Telecommunications Network / CEUR Workshop Proceedings This link is disabled., 2023, 3550, p. 240–245