УДК 621.391 **doi: 10.26906/SUNZ.2019.6.111**

О.А. Серков[1], К. А. Трубчанінова[2], Б. О. Лазуренко[1]

[1] Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна
[2] Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

МЕТОД ОЦІНКИ ІМОВІРНОСТІ БІТОВОЇ ПОХИБКИ В СИСТЕМАХ НАДШИРОКОСМУГОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

Анотація. Предметом вивчення є процеси забезпечення безпроводової завадостійкої передачі дискретної інформації на грунті надширокосмугових сигналів з високою інформаційною ємністю. **Мета** – розробка аналітичних співвідношень для розрахунку імовірності бітової похибки в залежності від співвідношення сигнал/шум в каналі з адитивною гаусовою завадою. **Задача** – забезпечення усталеної та надійної роботи НШС системи зв'язку в умовах завад. Використані **методи**: методи аналітичного, імітаційного моделювання та цифрового кодування сигналів. Отримані наступні **результати**. На грунті аналізу функціонування НШС системи радіозв'язку виявлено, що зміни енергії та автокореляційної функції прийнятих сигналів в потоці інформаційних бітів є причиною виникнення внутрішньо системних завад, які викликають збільшення бітової похибки та деградацію імовірнісних характеристик системи зв'язку. Отримані аналітичні співвідношення дозволяють обчислити залежності імовірності похибки на біт в залежності від співвідношення сигнал/шум в каналі чи при різноманітних значеннях бази сигналу. Виявлено існування локальних екстремумів для характеристик бітової похибки при оптимальних значеннях бази НШС сигналів, коли імовірність бітової похибки стає найменшою Це дозволяє обгрунтовано обирати найкращі значення бази НШС сигналу та мати високу завадостійкість та надійність системи передачі цифрової інформації. **Висновки.** Використання технології НШС сигналів дозволяє здійснити безпроводову приховану передачу інформації з малою потужністю випромінювання на швидкості 1-2 Мб/с з імовірністю похибки на біт менш, ніж 10^{-5}. Причому, за умов використання великої бази сигналу B = 500 – 1000 отримуємо імовірність бітової похибки на рівні 10^{-4} - 10^{-6} при суттєво менших одиниці відношеннях сигнал/шум. Таким чином система НШС радіозв'язку з кодовою модуляцією в передавачі та спектральною обробкою в приймачі має високу завадостійкість, що дозволяє здійснювати надійну передачу цифрової інформації в умовах завад.

Ключові слова: передача інформації; завадостійкість; прихованість; спектральна обробка; кореляція.

Вступ

Середовище розповсюдження є фізичним шляхом між передавачем та приймачем для безпроводових каналів зв'язку. Якість передачі сигналів з високою інформаційною ємністю обумовлюють характеристики каналу передачі інформації, серед яких найбільш суттєвими є ширина смуги частот випромінювання та рівень зовнішніх та внутрішньо системних завад. Найбільш оптимальним та розповсюдженим для безпроводових систем радіозв'язку є діапазон частот від 1 до 10 ГГц. [1]. Визначені межі діапазону смуги частот обумовлені тим, що на частотах менше, ніж 1 ГГц мають місце значні завади з боку промислових та побутових електронних пристроїв. У той же час на частотах вище 10 ГГц виникає значне поглинання сигналу середовищем розповсюдження за рахунок виникнення резонансів на краплинах дощу, туману чи пилу.

Технологія надширокосмугового (НШС) зв'язку полягає у передачі малопотужних кодованих імпульсів в дуже широкій смузі частот без несучої частоти. При цьому випромінюють не гармонічне коливання, а надкороткий імпульс, тривалість якого знаходиться у межах 0,2 – 2,0 нС, а період імпульсної послідовності складає 10 – 100 нС. Зазвичай, такі сигнали мають форму ідеалізованих гаусівських моноциклів, основна частина спектру якого знаходиться у смузі частот від 1 до 10 ГГц. Так, наприклад, використання у якості кодуючого імпульсу моноциклу Гауса тривалістю Δt від 2,0 до 0,1 нС, ширина смуги частот складе відповідно від 500 МГц до 10 ГГц, а спектр сигналу буде при цьому займає всю смугу частот від 0 до $\Delta F \approx 1/\Delta t$ [2-4].

Аналіз технічних рішень

Застосування технології надширокосмугового зв'язку здійснюють шляхом попереднього перетворення відносно вузькосмугових інформаційних сигналів з ефективною смугою спектра Δf на широкосмугові з шириною спектру ΔF, за умов збереження його загальної енергії E. При цьому спектральну щільність енергії канального сигналу упереджено зменшують у $\Delta F/\Delta f$ рази, яка у цьому випадку складатиме $E/\Delta F$. Таким чином база канального сигналу зростає у $\Delta F/\Delta f$ разів. Слід також зазначити, що базою надкороткого імпульсу є добуток тривалості сигналу на ширину його спектру. Найбільш простим та зручним методом розширення бази сигналу є пряме розширення спектру частот. При цьому, чим вище застосована частота, тим вища потенційна швидкість передачі інформації.

Телекомунікаційні системи з розширенням спектру характеризують висока швидкість передачі інформації, високий рівень електромагнітної сумісності та завадостійкості по відношенню до зовнішніх завад та шкідливої інтерференції за умов багатопроменевого розповсюдження сигналів [4-6]. В системах радіозв'язку з розширенням спектру здійснюють оптимальну обробку прийнятих сигналів із використанням когерентного опорного сигналу, який передається по каналу зв'язку одночасно з модульованим інформаційним сигналом. В системах надширокосмугового радіозв'язку із розподіленням та затримкою інформаційних сигналів (time delay diversity) за малий час визначають автокореляційну функцію прийнятих сигналів у вигляді суми опорного та інформаційного сигналів [7]. Енергія НШС

© Серков О. А., Трубчанінова К. А., Лазуренко Б. О., 2019

сигналів, прийнятих протягом тривалості кожного біту інформації змінюється випадковим чином та не зберігається постійною в потоці бітів. Крім того, суттєвий вплив на імовірнісні характеристики системи надширокосмугового радіозв'язку мають зовнішні завади та флуктуація енергії прийнятих НШС сигналів. Таким чином, нагальною задачею є розробка рекомендацій щодо підвищення рівня завадостійкості та прихованості каналу НШС радіозв'язку з адитивним гаусовим білим шумом.

Метод оцінки імовірності бітової похибки в системах надширокосмугового зв'язку

Внесення цифрової інформації в передавачі здійснюють з розширенням спектру за рахунок кодової спектральної модуляції НШС сигналів. До безпроводового каналу зв'язку одночасно поступають як опорний сигнал $n(t)$, так і інформативні сигнали $n(t - T_1)$ чи $n(t - T_0)$ із затримкою на малі часові інтервали T_1 чи T_0 згідно потоку інформаційних бітів – одиниці чи нуля. В приймачі визначають автокореляційний відгук прийнятих сигналів з кодовою спектральною модуляцією та за часовими зсувами кореляційних піків здійснюють однозначне відтворення переданих бітів інформації. Розширення спектра переданого сигналу у декілька разів у порівнянні з спектром інформаційного повідомлення необхідно, але недостатньо для створення системи зв'язку на грунті технології НШС сигналів. В приймаче слід виконати когерентний стиск НШС сигналів у полосу частот переданої інформації.

В системі за результатами подвійної спектральної обробки обчислюється комплексна кореляційна функція прийнятого сигналу.

$$R_Z(\tau) = 2\pi k^2 \times \\ \times\left[2R_n(\tau) + R_n(\tau - T_{1,0}) + R_n(\tau + T_{1,0})\right] + R_s(\tau), \quad (1)$$

яка має інформаційний пік із зсувом на час T_1 чи T_0 згідно потоку бітів одиниця чи нуль, а також кореляційну функцію адитивних гаусових завад $R_s(\tau)$ в каналі зв'язку. Детектор максимального рівня обчислює для співвідношення (1) модулі кореляційних піків $R_s(\tau;T_{1,0})$ при $\tau = T_1$ та $\tau = T_0$, різницю яких порівнюють із нульовим порогом U_n=0 для прийняття рішення про визначення переданого біту [7-11].

Позначимо модулі кореляційних піків через r_0 і r_1 та запишемо їх для гіпотез H_0 та H_1.

Так при гіпотезі H_0 :

$$r_0(T_0) = \left|R_z(T_0;T_0)\right|, \\ r_1(T_0) = \left|R_z(T_1;T_0)\right|. \quad (2)$$

При гіпотезі H_1 :

$$r_0(T_1) = \left|R_z(T_0;T_1)\right|; \\ r_1(T_1) = \left|R_z(T_1;T_1)\right|. \quad (3)$$

В демодуляторі здійснюють порівняння цих модулів один з одним. При цьому спочатку визначають $r_0 > r_1$ і $r_0 < r_1$ чи їх різницю $r_0 - r_1$ та порівнюють її з нульовим порогом. Для визначення імовірності похибки при передачі двійкового символу необхідно отримати значення сумісних двомірних щільностей імовірності випадкових амплітуд r_0 і r_1 комплексних кореляційних функцій для двох гіпотез H_0 та H_1. Позначаєо їх через $W(r_0, r_1 / H_0)$ та $W(r_0, r_1 / H_1)$. Тоді умовні імовірності похибки при передачі бітів нуль і одиниця та застосування вирішуючого правила на грунті порівняння модулів матиме наступний вигляд:

$$P(r_0 < r_1 / H_0) = \int_0^\infty \left(\int_{r_0}^\infty W(r_0, r_1 / H_0)\, dr_1 \right) dr_0, \\ P(r_0 > r_1 / H_1) = \int_0^\infty \left(\int_0^{r_0} W(r_0, r_1 / H_1)\, dr_1 \right) dr_0. \quad (4)$$

Зважаючи на те, що НШС інформаційний сигнал $n(t)$ і адитивні завади $s(t)$ є стаціонарними гаусовими випадковими процесами, отримуємо остаточні співвідношення для умовних імовірностей похибки (4) у вигляді:

$$P(r_0 < r_1 / H_0) = \\ = \int_0^\infty y \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(y^2 + \alpha_{00}^2\right)\right\} \times \\ \times I_0(\alpha_{00}, y) Q(\alpha_{00}, y\gamma_0)\, dy, \quad (5)$$

де $I_0(x)$ – функція Бесселя нульового порядка від уявного аргументу,

$$\alpha_{k\nu} = \frac{m_к(T_\nu)}{\sqrt{N_{кк}(T_\nu)}}, \\ y_\nu = \sqrt{\frac{N_{00}(T_\nu)}{N_{11}(T_\nu)}}, \quad (6) \\ k = 0,1;\ \ \nu = 0,1\cdots$$

При отриманні співвідношення (5) використана формула Q- функції Маркума:

$$Q(\alpha,\beta) = \int_\beta^\infty x\, exp\left[-\frac{1}{2}\left(x^2 + \alpha^2\right)\right] I(\alpha x)\, dx. \quad (7)$$

До складу співвідношення (6) входять складові $m_к(T_\nu)$ та $N_{11}(T_\nu)$, які є середніми значеннями і дисперсіями для оцінки кореляційної функції $R_z(\tau_1;T_{10})$ при $k = 0,1$; $\nu = 0,1$. За умов рівності апріорних імовірностей гіпотез $P(H_0) = P(H_1) = 0,5$, повна імовірність похибки визначається у вигляді:

$$P_0 = 0,5 \times \\ \times\left[P(r_0 < r_1 / H_0) + P(r_0 > r_1 / H_1)\right]. \quad (8)$$

Співвідношення 5, 6, 7 дозволяють розрахувати повну імовірність похибки (8) при передачі бітів в

каналі з адитивними гаусовими завадами для безпровідної системи надширокосмугового зв'язку з кодовою спектральною модуляцією в передавачі.

Розраховані залежності імовірностей похибок від співвідношення потужностей корисного сигналу та завади в каналі зв'язку наведені на рис. 1.

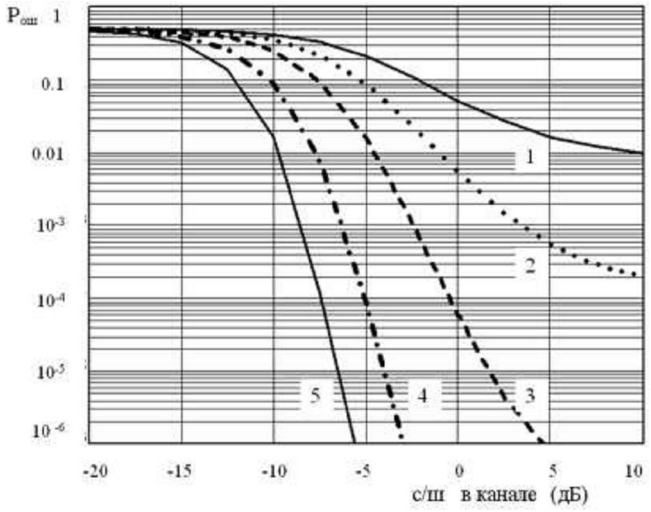

Рис. 1. Залежності імовірності похибки ***P*** від співвідношення сигнал/шум при різній базі сигналу: (**1** – B=50; **2** – B=100; **3** – B=200; **4** – B=500; **5** – B=1000).

Співвідношення потужностей корисного сигналу та завади в каналі зв'язку за різною базою НШС сигнала $B = \Delta f \cdot T_b = \Delta f / C_b$, визначається наступним співвідношенням:

$$q = 2\sigma_n^2 / \sigma_s^2 . \qquad (9)$$

У цьому співвідношенні σ_n^2 та σ_s^2 є дисперсії інформаційних сигналів $n(t)$ та адитивних гаусових завад $s(t)$, T_b – тривалість біту, $C_b = 1/T_b$ – швидкість передачі бітів.

Таким чином завадостійкість, електромагнітна сумісність та прихованість безпроводової системи передачі цифрової інформації визначають залежності імовірності бітової похибки від співвідношення сигнал/шум в каналі зв'язку (рис. 1).

За умов фіксованої смуги частот, наприклад, $\Delta f = 1000$ МГц наведені залежності являють собою вірогідність передачі інформації в системі НШС зв'язку із швидкістю передачі бітів $C_b = 10$ *Mb/s*, 5 *Mb/s,* 2 *Mb/s* та 1 *Mb/s,* у відповідності з базою сигнала B = 50, 100, 200, 500, 1000. Із збільшенням швидкості передачі бітів C_b, за умов фіксованої смуги частот Δf, спостерігається зсув вправо залежностей так, що імовірність похибки зростає при зменшенні значень співвідношення сигнал/шум в каналі зв'язку.

При великій швидкості передачі бітів C_b залежності 1 і 2 зазнають обмеження знизу так, що імовірність бітової похибки є не меншою, ніж 10^{-2} при швидкості передачі $C_b = 20$ *Mb/s* та не нижче величини 10^{-4} при швидкості передачі $C_b = 10$ *Mb/s*. У той же час залежності 3, 4, 5 зазнають обмеження на більш низькому рівні для імовірності похибки під час передачі бітів з меншою швидкістю $C_b = 5$ *Mb/s,* 2 *Mb/s* та 1 *Mb/s.*

Аналіз

Аналіз BER – характеристик доводить, що імовірність бітової похибки не прагне наблизитися до нуля навіть за відсутності завад в каналі. Оцінка параметра прихованості для цифрової системи зв'язку здійснюється за параметром ***q***, який визначає відношення потужності інформаційного сигналу до потужності завад в каналі при заданій імовірності бітової похибки.

Імовірність бітової похибки залежить від бази сигналу.

Так для сигналів з великою базою, наприклад, 500, 1000, імовірність бітової похибки стає нижчою за 10^{-5} - 10^{-6} навіть при негативному значенні параметра ***q*** в інтервалі значень -3…-6 дБ.

Таким чином, при великій базі сигналу B > 300, коли інтенсивність прийнятих сигналів знаходиться нижче рівня завад, включаючи власні шуми приймача, надійна передача інформації здійснюється з імовірністю похибки менш ніж 10^{-6}. Це характеризує високу завадостійкість та прихованість НШС системи зв'язку.

Висновки

Використання технології НШС сигналів дозволяє здійснити безпроводову приховану передачу інформації з малою потужністю випромінювання на швидкості 1-2 Мб/с з імовірністю похибки на біт менш, ніж 10^{-5}

Показано, що випадкові зміни енергії та автокореляційної функції прийнятих НШС сигналів в потоці бітів є причиною виникнення внутрішньо системних завад. У свою чергу це викликає збільшення бітової похибки та деградацію імовірнісних характеристик системи зв'язку.

Отримані аналітичні співвідношення дозволяють обчислити залежності імовірності похибки на біт в залежності від співвідношення сигнал/шум в каналі чи співвідношення сигнал/шум на біт при різноманітних значеннях бази сигнала.

Розраховані характеристики бітової похибки свідчать про високий рівень прихованості та електромагнітної сумісності надширокосмугової системи зв'язку при передачі дискретних повідомлень в каналі зв'язку з адитивним гаусовом білим шумом. Причому, за умов використання великої бази сигналу B = 500 – 1000 отримуємо імовірність бітової похибки на рівні 10^{-4} - 10^{-6} при суттєво менших одиниці відношеннях сигнал/шум.

Виявлено існування локальних екстремумів для характеристик бітової похибки при оптимальних значеннях бази НШС сигналів, коли імовірність бітової похибки стає найменшою. Отримані результати дозволяють обґрунтовано обирати найкращі значення бази НШС сигналу та оцінювати співвідношення сигнал/шум на біт при заданих імовірностях бітової похибки.

Таким чином, система НШС радіозв'язку з кодовою модуляцією в передавачі та спектральною

обробкою в приймачі має високу завадостійкість, що дозволяє здійснювати надійну передачу цифрової інформації в умовах завад.

Вдячність

Цю роботу було частково профінансовано Європейським Союзом у контексті проекту «dComFra – Digital competence framework for Ukrainian teachers and other citizens» (Project Number: 598236-EPP-1-2018-1-LT-EPPKA2-CBHE-SP) за програмою ERASMUS+.

Підтримка Європейською Комісією створення цієї роботи не означає повного схвалення її змісту, який віддзеркалює лише погляди авторів. Комісія не може нести відповідальності за будь-яке використання інформації, яку розміщено в цій роботі.

Список літератури

1. Harmuth H.F. (1981). *Non sinusoidal Waves for Radar and Radio Communication,* Academic Press. New York, London, Toronto, Sydney, San Francisco. 376 p.
2. Serkov A., Breslavets V., Tolkachov M., Kravets V. (2018) "Method of coding information distributed by wireless communication lines under conditions of interference" // Advanced Information Systems. - 2018. – Vol.2, No.2. pp. 145-148, available at: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.25
3. Serkov, A. (2017). Noise-like signals in wireless information transmission systems / A. Serkov, V. Breslavets, M. Tolkachov, G. Churyumov, Issam Saad // Advanced Information Systems. – 2017. – Vol. 1, №2 – P. 33 – 39, available at: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.06.
4. Serkov, O. A. (2019). On the issue of solving the problem of electromagnetic compatibility of the wireless telecommunication Systems / O. A. Serkov, G. I. Churyumov // Applied Radio Electronics. – Kharkiv: KHNURE, 2017. – Vol. 16 № 3, 4. – P. 117-121.
5. Serkov, A. (2019). Ultra Wideband Signals in Control Systems of Unmanned Aerial Vehicles / A. Serkov, V. Kravets, I. Yakovenko, G. Churyumov, V. Tokariev and W. Nannan // *10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, Leeds, United Kingdom, 2019, pp. 25-28. doi: 10.1109/DESSERT.2019.8770039 URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8770039&isnumber=8770005
6. O.A. Serkov, V.S. Breslavets, M.Yu. Tolkachov, G.I. Churyumov. (2018). "Method of Generation the Wideband Impulse Signals and Antenna for his Realization". Patent application of Ukraine for utility model number a 2018 03104; appl. 26.03.2018, unpublished.
7. Serkov A., Trubchaninova K., Mezitis M. (2019) "Method of wireless transmission of digital information on the basis of ultra-wide signals" // Advanced Information Systems. - 2019. – Vol.3, No.4. pp. 33-38, available at: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.4.04.
8. Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Назаров М.В., Финк Л.М. (1986). Теория передачи сигналов, - М.: Радио и связь, 1986. – 304 С.
9. Калинин В.И., Радченко Д.Е., Черепенин В.А. Внутрисистемные помехи при передаче информации на основе СШП шумовых сигналов // 24-я Межд. Крымская конф. (CriMiCo'2014). Материалы конф. Севастополь: Вебер, 2014, Т.1, с.221-222.
10. Калинин В.И., Радченко Д.Е., Черепенин В.А. Вероятностные характеристики цифрового канала передачи информации на основе непрерывных шумовых сигналов со спектральной модуляцией // Радиотехника, 2015, №8, С. 84-94.
11. Serkov O., Breslavets V., Tolkachov M., Churyumov G. (2018) "The Wideband Pulsed Antenna and its Application" [9th Inter. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS-2018)], September 4 – 7, Odessa Ukraine, ISBN: 978-1-5386-2467-8, IEEE Catalog Number: CFP18587. – P. 340-343.

Received (Надійшла) 27.10.2019
Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.12.2019

Metod for estimating the probability of biy error in ultra-wideband communication systems

O. Serkov, K. Trubchaninova, B. Lazurenko

Abstract. The subject of study is the process of providing wireless noise-resistant transmission of discrete information that are based ultra-wideband signals with high capacity for information transmission. Goal of the study – development of analytical expressions for calculating the probability of bit-errors depending on the signal-to-noise ratio in the channel with additive Gauss interference. The objective is to ensure stable and reliable performance of UWB communication system under mush circumstances. Methods used: methods of analytical simulation and digital signal coding. The followings results are obtained. Based on analysis of the operation of the UWB ratio communication system revealed that the change in energy and autocorrelation function of received signals in the stream of information bits are the cause of intra-system interference that further causes an increase sn bit error and degradation of the probabilistic characteristics of communication systems. Revealed analytical relationship allow us to calculate the probability dependence of occurring errors per bit depending on the signal-to-noise ratio or at different base signal values. Revealed the existence of local extremums for bit error characteristics at optimal UWB base values signals when the probability of a bit error becomes the smallest. That allows us to reasonably choose the best value of the UWB signal base and have high noise immunity and reliability of the digital information transmission system. Conclusion. Using UWB signal technology allows wireless covert transmission of information with low radiation power at a speed of 1-2 Mb / s with error occurrence probability per bit at the level of 10-4 - 10-6 when the signal-to-noise ratio is significantly less than one. Thus, a UWB radio system with a code modulation at the transmitter and spectral processing at the receiver has higs noise smmunity, which allows reliable transmission of digital information in an interfering environment.

Keywords: information transfer; noise immunity; stealth; spectral processing; correlation.