

О. А. Серков¹, К. А. Трубочанінова², Б. О. Лазуренко¹

¹ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

² Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

МЕТОД ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ РУХОМОГО ЗВ'ЯЗКУ ПРИ ВИНИКНЕННІ ВНУТРІШНЬОСИСТЕМНИХ ЗАВАД

Анотація. Предметом вивчення є процеси забезпечення безпроводової завадостійкої передачі дискретної інформації на ґрунті надширокопосмугових сигналів з високою інформаційною ємністю. **Мета** – розробка рекомендацій щодо забезпечення електромагнітної сумісності надширокопосмугової системи зв'язку при передачі дискретних повідомлень каналом зв'язку з адитивним гаусовим шумом. **Задача** – забезпечення усталеної та надійної роботи надширокопосмугової системи зв'язку в умовах внутрішньосистемних завад. Використані **методи**: методи аналітичного, імітаційного моделювання та цифрового кодування сигналів. Отримані наступні **результати**. Показано, що випадкові зміни енергії та автокореляційної функції прийнятих надширокопосмугових сигналів в потоці бітів інформації є причиною виникнення внутрішньосистемних завад. У свою чергу це викликає збільшення бітової похибки та деградацію імовірнісних характеристик системи зв'язку. Отримані характеристики бітової похибки свідчать про високий рівень прихованості та електромагнітної сумісності надширокопосмугової системи зв'язку при передачі дискретних повідомлень в каналі зв'язку з адитивним гаусовим білим шумом. Причому, за умов використання некратних затримок кодуєчих імпульсів в процесі кодової спектральної модуляції, отримуємо імовірність бітової похибки на рівні 10^{-5} - 10^{-6} при суттєво менших одиницях відношення сигнал/шум. **Висновки.** Використання технології надширокопосмугових 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} . Таким чином система надширокопосмугового радіозв'язку з кодовою модуляцією в передавачі та спектральною обробкою в приймачі має високу завадостійкість, що дозволяє здійснювати надійну передачу цифрової інформації при появі внутрішньосистемних завад.

Ключові слова: рухомий зв'язок; завадостійкість; спектральна обробка; кореляція.

Вступ

Розвиток технологій мобільних пристроїв, локальних мереж (WLAN) та стрімке зростання Internet викликає все більш зростаючу потребу у збільшенні ємності мобільних мереж. Однак існуючі технології не мають змоги задовольнити нових потреб по ємності мереж та швидкості передачі [1-4].

В реальних системах рухомого зв'язку точна інформація про характеристики каналу зв'язку недоступна. За наявності в каналі шумів і замирань сигналу, параметри каналу можуть змінюватися частіше, ніж часовий інтервал між сусідніми пілот-сигналами.

Під час прийому та передачі інформації в системах рухомого зв'язку багатопроменеве розповсюдження сигналу справляє суттєвий вплив на прийнятий сигнал, що ускладнює його подальшу обробку та вимагає більше обчислювальних ресурсів.

Зменшити обчислювальну складність та підвищити точність оцінювання здатні алгоритми, які ґрунтуються на послідовній багаторазовій обробці прийнятого сигналу, який отримано за один інтервал спостереження та використані при оцінці не тільки енергії пілот-сигналів, а також енергії інформаційних сигналів. Існуючі алгоритми екстраполяції не здатні із необхідною точністю апроксимувати обчислені значення параметрів каналу на всі інформаційні часові інтервали, що викликає значну похибку оцінювання та характеризує дисперсію похибки оцінювання.

Суттєво покращити спектральну ефективність і завадостійкість системи, у порівнянні з традиційними системами, здатна технологія надширокопосмуго-

вого зв'язку, яка полягає у передачі малопотужних кодованих імпульсів в дуже широкій смузі частот без несучої частоти [5-7].

Аналіз технічних рішень

Широкопосмужність системи визначає не абсолютна величина ширини використаної смуги частот, а співвідношення спектру повідомлення, який визначено швидкістю отримання інформації, та шириною спектра сигналу. Нехай ΔF є шириною спектру повідомлення, W – ширина спектру сигналу, а T – тривалість сигналу. Добуток $B = WT$ є базою сигналу. Зазвичай для широкопосмугових систем $W \gg \Delta F$ та $B \gg 1$. Розширюючи смугу частот із ΔF до W виникає можливість збільшення швидкості передачі інформації, укорочуючи передані сигнали з величини $T \cong 1/\Delta F$ до $T_1 \cong 1/W$, причому $T_1 \ll T$. Таким чином до переданого сигналу вводять деяку надмірність, величину якої визначає коефіцієнт розширення спектру $K_f = W/\Delta F$. Саме наявність цієї надмірності визначає такі властивості надширокопосмугових систем, як можливість переборення явища багатопроменевості, усталеність до завад, та можливість ефективного використання спектру під час використання переважаного частотного діапазону та цифрової обробки сигналу.

Для безліцензійного використання надширокопосмугових (НШС) сигналів пристроями в Євросоюзі виділені діапазони 6 – 8 ГГц у США – 3,1 – 10,6 ГГц [8,9]. Дозволені смуги частот для організації НШС зв'язку у різних країнах світу наведено на рис. 1.

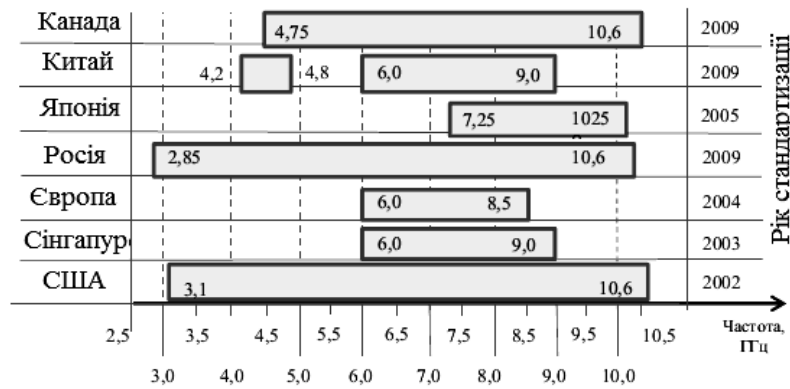


Рис. 1. Дозволені смуги для організації НШС зв'язку у різних країнах світу

Зменшенню інтерференції між усіма системами зв'язку, які працюють в НШС спектрі частот, сприяє обмеження їх потужності: 41,3 дБм/МГц в США та Євросоюзі. Для конкретних застосувань розроблені шаблони дозволених потужностей в смузі пропускання НШС систем. Вид шаблонів також залежить від країни застосування.

Оцінка впливу завад на якість відновлення інформації

Згідно теорії потенціальної завадостійкості [10] характеристики інформаційного сигналу залежать від відношення подвійної енергії сигналу E до спектральної щільності потужності шуму N_0 та складає величину:

$$Q = 2E/N_0 = 2q_0B,$$

де $q_0 = E/T/(N_0W)$ – відношення середньої потужності сигналу $P_{C0} = E/T$ до потужності шуму $P_{N0} = N_0W$ на вході приймача, а $B = WT$ є базою сигналу.

Розподіл інформаційного біту тривалістю T на елементи, тривалістю τ , які мають таку ж амплітуду, що і інформаційний біт, дозволяють отримати сигнал тривалістю T із смугою $W \sim 1/\tau$ при значенні бази $B \gg 1$. Число елементарних імпульсів (чипів) в інформаційному біті визначається як $N = T/\tau$. При цьому можливість розділення перекритих у часі сигналів пов'язана з наявністю у кореляційній функції прийнятих сигналів єдиного можливого максимуму значної амплітуди і ширини порядку $\tau_{eff} \cong 1/W \cong \tau$, що є піком спектральної щільності потужності. Такий вигляд кореляційної функції мають відрізки шуму із смугою W і детерміновані сигнали, які після обробки в кореляційному приймачі приймають вигляд імпульсу тривалістю τ з амплітудою NS , де S – амплітуда елементарного імпульсу послідовності. Максимальні бокові пелюстки кореляційної функції, які визначають небажаний вплив на правильний прийом сигналу, мають амплітуди порядку \sqrt{NS} . За умов достатньо великого значен-

ня N , наприклад, понад 100, ці пелюстки значно менші за головний максимум [6]. При інтерференції повністю некогерентних НШС сигналів спектральна щільність модулюється гармонічною функцією в залежності від частоти f з масштабом періодичності, який дорівнює

$$\delta f_{10}(t) = 1/T_{10}.$$

Потужність сумарного НШС сигналу $z_{10}(t)$ визначає його дисперсія σ_z^2 що дорівнює подвійної потужності $\sigma_z^2 = 2\sigma_n^2$ опорного сигналу $n(t)$ за умов повної некогерентності опорного та затриманих інформаційних сигналів.

Компаратор здійснює порівняння інформаційних кореляційних піків із зсувом T_1 чи T_0 , вилучає з них найбільший за величиною кореляційний пік, що відповідає переданому біту «1» чи «0». Таким чином здійснюють однозначне відновлення переданої бінарної інформації.

Вплив зовнішньої завади в каналі зв'язку супроводжується зростанням випадкових викидів для автокореляційної функції в області інформаційних піків $2\sigma_n^2 R_n(\tau - T_{10})$ із зсувом, $\tau = T_{10}$ що призведе до збільшення похибки при відновленні переданої бінарної інформації [11-13].

За результатами спектральної обробки під час надходження кожного біту інформації визначають квадратурні компоненти для комплексної автокореляційної функції, модуль якої обчислюється як середнє квадратичне значення від дійсної та уявної частин. Випадкову оцінку для модуля автокореляції $|\hat{R}_r(\tau)|$ визначаємо у вигляді суми середнього значення $\bar{m}_r(\tau)$ та флуктуаційної компоненти $\tilde{\mu}_r(\tau)$:

$$|\hat{R}_r(\tau)| = \bar{m}_r(\tau) + \tilde{\mu}_r(\tau).$$

За результатами усереднення за великим ансамблем ($K = 10^5$) незалежних реалізацій $r(t)$ прийнятого сигналу визначаємо:

– середнє значення:

$$\bar{m}_r(\tau) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |\hat{R}_r^{(k)}(\tau)|,$$

дисперсію флуктуацій:

$$\sigma_{\mu}^2(\tau) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K [\mu],$$

коефіцієнт взаємної коваріації для флуктуаційної компоненти $\tilde{\mu}_r^{(k)}(T_{10})$ в місці розташування інформаційного піку із затримкою T_{10} та бокових викидів $\tilde{\mu}_r^{(k)}(T_{10} + \tau)$, зсунутих на час $(T_{10} + \tau)$:

$$G_{\mu}(T_{10}, T_{10} + \tau) = \frac{1}{G_{\mu}(T_{10})G_{\mu}(T_{10} + \tau)} \frac{1}{K \sum_{k=1}^K [\tilde{\mu}_r^{(k)}(T_{10} + \tau)]}.$$

Коефіцієнт взаємної коваріації показує ступень статистичної залежності для флуктуацій модулю автокореляції в місці розташування T_{10} інформаційного піку та на місці $(T_{10} + \tau)$ зсунутих бокових викидів [14].

Передача інформації на ґрунті НШС сигналів в каналі з аддитивною гаусовою завадою здійснювалася для визначення імовірності похибки на біт (BER) в залежності від співвідношення (SNR) потужності прийнятого сигналу до потужності зовнішньої завади в каналі при різних затримках T_1 , T_0 інформаційних сигналів. Нехай спектри потужності, сумарних НШС сигналів, які надходять під час передачі двійкових символів, обчислені за кінцевий час $T = 1$ мкс, дорівнюють тривалості біту інформації, та є випадковими функціями. Смуга частот складає $\Delta F = 1,0$ ГГц, та час когерентності $\tau \approx 1/\Delta F = 1$ нс. Під час передачі двійкового символу «1» затримка сигналу складає $T_1 = 9$ нс. Тоді період спектральної модуляції буде дорівнювати $\delta f_1 = 1/T_1 = 111$ МГц. При передачі «0» затримка сигналу складає $T_0 = 6$ нс, а період спектральної модуляції буде складати $\delta f_0 = 1/T_0 = 167$ МГц.

Імовірність похибки визначалася статистикою хибних рішень при багаторазовому виконанні незалежних експериментів по передачі двійкових бітів в каналі з аддитивною гаусовою завадою. При зсуві на кратний час $\tau = jT_0 = 12; 18; 24$ нс ($j=2,3,4$) спостерігаються статистично значимі піки для середнього значення $\bar{m}_r(\tau)$ (рис. 2) та середньо квадратичного відхилення $\sigma_{\mu}(\tau)$ (рис. 3). Вони перевищують у декілька разів сусідні бокові викиди цих функцій при некрatних зсувах $\tau = jT_0$. Затримка сигналу складає $T_0 = 6$ нс. При цьому слід зазначити аномально великі піки для стандартного відхилення $\sigma_{\mu}(\tau)$ при кратних зсувах $\tau = jT_0 = 12; 18; 24$ нс. Коефіцієнт взаємної коваріації при зсуві на час інформаційної затримки $\tau = T_0 = 6$ нс за рахунок

резонансу зростає по амплітуді у десятки разів, стає негативним та дорівнює

$$G_{\mu}(T_0, 2T_0) = -0,49.$$

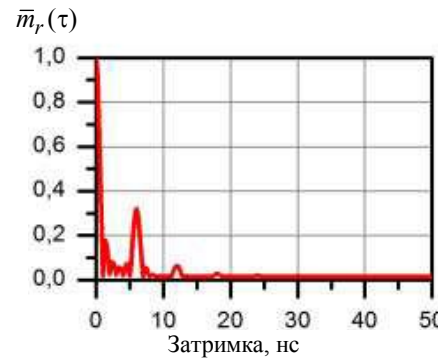


Рис. 2. Залежність $\bar{m}_r(\tau)$ від зсуву τ

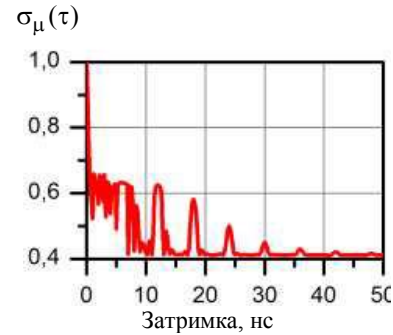


Рис. 3. Залежність $\sigma_{\mu}(\tau)$ від зсуву τ

За результатами чисельного моделювання (рис. 4) визначено ефект потужної антикореляції для флуктуаційної компоненти $\tilde{\mu}_r^{(k)}(T_{10})$ модуля автокореляції в місці розташування інформаційного піку із зсувом $T_0 = 6$ нс та бокових викидів із подвоєним зсувом $2T_0 = 12$ нс.

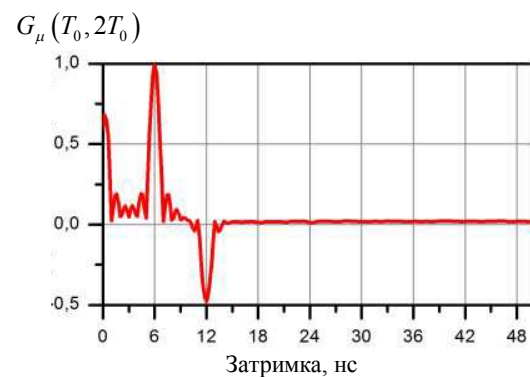


Рис. 4. Залежність $G_{\mu}(T_0, 2T_0)$ від зсуву τ

Аномально великі флуктуації для модуля автокореляції $|\hat{R}_r(\tau)|$ при кратних зсувах $\tau = jT_0$ ($j=2,3,4$) та сильна антикореляція

$$G_{\mu}(T_0, 2T_0) = -0,49$$

між флуктуаціями із кратними зсувами призводять до появи додаткових внутрішньосистемних завад, що робить суттєвий вплив на достовірність передаваної бінарної інформації в системі НШС зв'язку.

На рис. 5 наведені результати чисельного експерименту щодо залежності імовірності похибок від SNR – відношення сигнал/шум при різних швидкостях передачі бітів інформації $C = 1$ Мб/с, 2 Мб/с, 5 Мб/с, 10 Мб/с. Усі залежності розраховано для НШС сигналу зі смугою частот $\Delta F = 1,0$ ГГц.

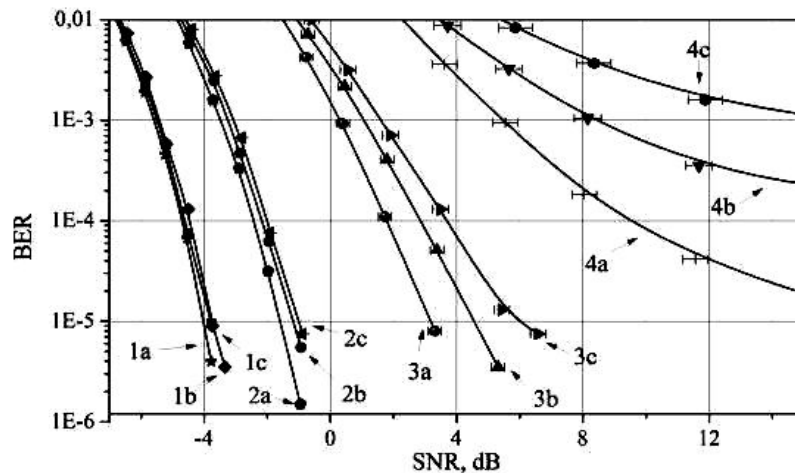


Рис. 5. Залежності імовірності похибки BER від співвідношення сигнал/шум в каналі при різній швидкості передачі: 1 – $C=1$ Мб/с.; 2 – $C=2$ Мб/с.; 3 – $C=5$ Мб/с.; 4 – $C=10$ Мб/с.); а – некрatні, б, с – кратні затримки

З підвищенням швидкості передачі бітів при фіксованій смузі ΔF частот спостерігають зсув вправо BER – залежностей так, що імовірність похибки зростає. Характеристики, що позначено буквою **a**, відповідають обранню некрatних затримок $T_0 = 6нс$, $T_1 = 9нс$ нс. Характеристики, що позначено буквою **b**, відповідають затримкам з подвійною кратністю $T_0 = 6нс$, $T_1 = 12нс$, а **c** – з потрійною кратністю $T_0 = 6нс$, $T_1 = 18нс$. Кратність затримок (залежності **b**, **c**) призводять до збільшення похибки прийому бітів та зсуву вправо BER – залежностей. Із збільшенням швидкості передачі бітів від 1 Мб/с до 10 Мб/с (залежності 1 – 4) різке зростання бітової похибки за рахунок некрatних затримок. Подвійна та потрійна кратність затримок T_1 та T_0 , викликає деградацію імовірносних характеристик для систем зв'язку. При цьому залежності незначно зсуваються за SNR відношенням на величину 0,3 – 0,5 дБ при малій бітовій швидкості $C = 1-2$ Мб/с, та імовірності похибки $BER=10^{-5}$. Велика деградація імовірносних характеристик НШС системи зв'язку виникає за рахунок кратності затримок при великій швидкості передачі бітів $C = 5-10$ Мб/с. У цьому випадку BER – залежності суттєво зсуваються вправо по SNR відношенням на величину 3 – 6 дБ за тією ж імовірністю похибки $BER=10^{-5}$. Таким чином завадостійкість НШС системи зв'язку значно підвищується за наявності некрatних затримок в процесі кодової спектральної модуляції.

Аналіз

Із аналізу імовірносних характеристик виходить, що при швидкості передачі бітів $C = 1-2$ Мб/с залежності 1a та 2a знаходяться в області негативних SNR від -4 до -1 дБ. При цьому імовірність біто-

вої похибки складає величину $BER = 10^{-5}-10^{-6}$. За таких умов здійснюється передача інформації в цифрових системах зв'язку. Таким чином в НШС системі зв'язку здійснюють надійну передачу інформації в умовах внутрішньосистемних завад з високою завадозахищеністю та прихованістю.

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 внутрішньосистемних завад. У свою чергу це викликає збільшення бітової похибки та деградацію імовірносних характеристик системи зв'язку.

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 гаусовим білим шумом. Причому, за умов використання некрatних затримок в процесі кодової спектральної модуляції, отримуємо імовірність бітової похибки на рівні $10^{-5} - 10^{-6}$ при суттєво менших одиниці відношеннях сигнал/шум.

Отримані результати дозволяють обґрунтовано обирати найкращі значення затримок в процесі кодової модуляції інформаційних бітів НШС сигналу та оцінювати співвідношення сигнал/шум 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 виникнення внутрівісностемних 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-SBHE-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.

REFERENCES

1. Соколова М.В. *Сверхширокополосная беспроводная связь: история и перспективы развития*. - Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. -2008. -С-50-55.
2. Аджемов С.С., Соколова М.В., Урядников Ю.Ф., Штыркин В.В. Сверхширокополосная связь — результат развития технологий широкополосного доступа. — Электросвязь, 2006. — №2. — с. 18-23
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. Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Назаров М.В., Финк Л.М. (1986). Теория передачи сигналов, - М.: Радио и связь, 1986. – 304 С.
7. Wi-Fi/WiMAX Настоящее и будущее широкополосного доступа, — Мобильные телекоммуникации, апрель 2006. [Электронный ресурс]– Режим доступа: http://www.mobilecomm.ru/wp-content/uploads/pdf/magazine/2006/mtk_04-2006.pdf
8. 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>.
9. Рішення Федеральної комісії по зв'язку (FCC) США № FCC 02-48 від 14/02/2002 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-02-48A1.pdf. – Дата доступу :31.12.2019.
10. Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости. – М.: Госэнергоиздат, 1956. – 151 с
11. Калинин В.И., Радченко Д.Е., Черепенин В.А. Внутрисистемные помехи при передаче информации на основе СШП шумовых сигналов // 24-я Межд. Крымская конф. (СгiMiCo'2014). Севастополь: Вебер, 2014, Т.1, с.221-222.
12. 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.
13. Huffman D.A.Q. The synthesis of linear sequential coding networks. *Information theory*. Acad. Press, New, 1956. P. 77 – 95.
14. Valery Kalinin, Andrey Panas, Vladimir Kolesov, Vladimir Lyubchenko. Ultra Wideband Wireless Communication on the Base of Noise Technology // XVI Inter. Conf. on Microwaves, Radar and Wireless Communications, MIKON-2006, Poland, Krakow, 2006, Conf. Proc., Vol. 2, pp. 615-618.

Received (Надійшла) 27.12.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.02.2020

A method of providing interference immunity to mobile communication in the case of intra-system interference

A. Serkov, K. Trubchaninova, B. Lazurenko

Abstract. The subject of the study is the process of providing wireless noise-resistant transmission of discrete information based on ultra-wideband signals with high information capacity. **The goal** is to develop recommendations for ensuring electromagnetic compatibility of an ultra – wideband communication system when transmitting discrete messenger over a communication channel with additive Gaussan noise. **The task** is to ensure stable and reliable operation of an ultra – wideband communication system in the condition of intra-system interference. **Methods used:** methods of analytical & imitative modeling and digital coding of signals. **The following results** are obtained. It is shown that random changes in the energy and autocorrelation functions of received ultra-wideband signals in the information bit stream are the cause of intra-system interference. In turn, this causes an increase in bit error and degradation of the probabilistic characteristics of communication systems. The obtained characteristics of the bit error indicate a high level of secrecy and electromagnetic compatibility of the – wideband communication system when transmitting discrete messages over the communication channel with additive Gaussan noise. Moreover, when using non-aliquot delays of coding pulses in the process of code spectral modulation, we obtain the probability of a bit error at a level of 10^{-5} - 10^{-6} with a significantly smaller unit signal-to-noise ratio. **Conclusion.** The use of ultra – wideband signal technology allows wireless cover transmission of information with low radiation power at speed 1-2 Mb/s with a probability of error per bit of at least of 10^{-5} . Thus, the system of ultra – wideband radio communication system with a code modulation at the transmitter and spectral processing at the receiver has high noise immunity, which allows reliable transmission of digital information in the event of intra-system interference.

Keywords: mobile communication; noise immunity; spectral processing; correlation.