

О. А. Серков<sup>1</sup>, Н. Г. Кучук<sup>1</sup>, Б. О. Лазуренко<sup>1</sup>, А. Е. Горюшкіна<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна

<sup>2</sup> Морський університет в Гдині, Гдиня, Польща

## МЕТОД ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ В СИСТЕМІ INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS

**Анотація.** Промислові об'єкти Industrial Internet of Things (IIoT), які використовують сучасні ІТ-технології, при автоматизованому керуванні виробництвом вимагають забезпечення надійності та безпеки інформації. При цьому, для забезпечення високої якості зв'язку слід розширювати пропускну здатність каналів зв'язку, яку обмежено фізичним ресурсом радіочастотного спектру. Це протиріччя запропоновано здолати шляхом застосування технології надширокополосних сигналів, у яких співвідношення між шириною смуги частот та його центральною частиною більше одиниці. Таким чином, випромінювання інформаційного сигналу здійснюють без несучої частоти одночасно у всій смузі частот за умови, коли рівень сигналу нижче рівня шуму. Для передачі інформаційного контенту застосовано метод часового позиційно-імпульсного кодування, за яким кожен інформаційний біт кодується сотнями надкоротких імпульсів, які надходять з визначеною послідовністю. В роботі запропоновано математичні моделі модульованих надширокополосних сигналів, які спостерігають в системах безпроводного зв'язку з автокореляційним прийомом. Вони дозволили виявити особливості залежностей імовірності похибки від нормованого відношення сигнал/завада та бази сигналу. Порівняльний аналіз показав, що найкращу завадостійкість систем серед розглянутих в роботі має система зв'язку, що має часове розділення опорного та інформаційного сигналів. Так, протягом першої половини бітового інтервалу комутатор замикає вихід передавача безпосередньо на генератор надширокополосного сигналу, формуючи опорний сигнал. В середині бітового інтервалу комутатор переключує вихід на одну з двох можливих позицій в залежності від сигналу – «нуль» чи «одиниця», формуючи інформаційну частину надширокополосного сигналу. Необхідно також зазначити, що системи з автокореляційним прийомом та розділеною передачею опорного та інформаційного сигналів забезпечують високий рівень структурної прихованості сигналу, а також надійну передачу цифрової інформації, особливо в умовах дії електромагнітних завад.

**Ключові слова:** IIoT; мобільний зв'язок; завадостійкість; безпека; надширокополосні сигнали.

### Вступ

Система Industrial Internet of Things (IIoT) вимагає надання їй великої кількості каналів зв'язку з високою якістю, які мають високу питому щільність їх розташування у просторі. При цьому основним показником якості безпроводного надширокополосного каналу є відношення сигнал/завада на вході кореляційного приймача. Складність організації взаємозв'язків всередині системи IIoT між окремими її елементами надає перевагу для застосування безпроводного зв'язку. У свою чергу це викликає складності в забезпеченні певного рівня завадостійкості каналів зв'язку, що обумовлено високою щільністю розташування у просторі промислового об'єкту IIoT елементів системи. Їх одночасна робота погіршує внутрішню електромагнітну обстановку, сприяє зниженню якості каналів зв'язку та швидкості передачі інформації, що циркулює в системі [1, 2].

### 1. Аналіз шляхів підвищення показників якості безпроводного зв'язку

Найбільш ефективним шляхом підвищення рівня завадостійкості та швидкості передачі інформації в IIoT є введення частотної надлишковості, яка притаманна сигналам з надширокою смугою частот. В основі застосування таких систем зв'язку знаходиться концепція надширокополосних (НШС) імпульсних сигналів з малою тривалістю [3-7].

За рахунок збільшення смуги частот сигналу підвищується усталеність каналу зв'язку до впливу завад від сусідніх каналів, що забезпечує можливість одночасної роботи в одному частотному діапазоні ве-

ликої кількості каналів зв'язку. Завдяки низькій спектральній щільності сигналу випромінювання при передачі повідомлень та забезпечується високий рівень його енергетичної прихованості і захисту інформації, перевищуючи також можливості звичайних широкополосних систем за щодо швидкості передачі інформації та усталеності до завад. Тому застосування НШС сигналів є пріоритетом у вирішенні проблеми підвищення інформаційних можливостей зв'язку в системі IIoT.

**Метою роботи** є підвищення безпеки, пропускну здатності та завадостійкості розподілених IIoT, що побудовані на ґрунті персональних та локальних мереж з низьким рівнем енергоспоживання в умовах дії природних та штучних завад. Таким чином IIoT є розподіленою системою, яка працює у реальному часі в умовах дії електромагнітних завад із підвищеними вимогами до безпеки та швидкості передачі інформації у безпроводних мережах зв'язку.

### 2. Критерії якості каналу зв'язку

Відмінність НШС системи зв'язку від традиційних вузькополосних є відсутність несучої частоти.

Згідно теорії потенційної завадостійкості [8] характеристика інформаційного сигналу залежить від відношення подвійної енергії сигналу  $E$  до спектральної щільності потужності шуму  $N_0$  та є такою:

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

де  $q_0 = \frac{E/T}{N_0W}$  – відношення середньої потужності сигналу  $P_{s0} = E/T$  до потужності шуму  $P_{N0} = N_0W$  на вході приймача, а  $B = WT$  є базою сигналу.

Цей критерій завадостійкості багатоканальних систем безпроводного доступу є гранично досяжним для усіх без винятку класів приймальних систем.

У той же час можливість подальшого підвищення потенційної завадостійкості приймальних пристроїв обґрунтував Д. Слеп'ян у своїй теоремі [9], застосування якої справедливе тільки у тих випадках, коли ширина спектру сигналу більша, ніж ширина спектру шуму.

Для передачі інформації в НШС системах використовують імпульсні сигнали з дуже короткою тривалістю імпульсів. Такий сигнал, що має малий просторово-часовий об'єм, дозволяє передавати велику кількість інформації в одиницю часу. Так для передачі одного біту інформації вузькосмуговій системі потрібно від 10 до 50 періодів несучого коливання. У той же час НШС система зв'язку використовує для передачі одного біту інформації тільки одне коливання.

Вочевидь, використання надширокосмугових сигналів дозволяє передавати інформацію на швидкості, що значно перевищує швидкість традиційних засобів зв'язку.

В цифровому безпроводному зв'язку критерієм якості каналу є відношення сигнал/завада  $E_s/N_o$ , (SNR signal – to – noise ratio), яке пов'язує середню потужність сигналу  $S$  із середньою потужністю шуму  $N$ . Причому, змінна  $E_s$  є енергією інформаційного біту, яка являє собою потужність сигналу  $S$ , помножену на час передачі біту  $T_s$ , а  $N_o$  – спектральна потужність шуму, визначає потужність шуму  $N$ , яку поділено на ширину смуги  $W$ .

Слід також зазначити, що час передачі біту  $T_s$  та швидкість його передачі  $R_s$  взаємно зворотні:

$$T_s = 1/R_s.$$

*Продуктивність* системи цифрового зв'язку визначає залежність імовірності появи хибного біту  $P_s$  від співвідношення сигнал / завада, що також є стандартною мірою *завадостійкості* систем цифрового зв'язку [4].

$$\frac{E_s}{N_o} = \frac{ST_s}{N/W} = \frac{S}{N} \frac{W}{R} = \frac{S}{N} B,$$

де  $B = WT_s$  є базою сигналу.

Аналіз цього співвідношення показує, що основним параметром, який дозволяє забезпечити високу якість зв'язку та відповідну продуктивність і завадостійкість є база сигналу  $B$ .

Із розширенням бази сигналу  $B \gg 1$  виникає можливість збільшення швидкості передачі інформації за рахунок скорочення тривалості переданого сигналу.

Таким чином, до переданого сигналу вводять деяка надлишковість, величину якої визначає коефіцієнт розширення спектру.

Саме наявність цієї надмірності визначає такі властивості надширокосмугових систем, як можливість переборення явищ багатопроменевого розповсюдження радіохвиль і ефективного використання

спектру під час роботи у переважаному частотному діапазоні.

Однак в умовах впливу природних та штучних завад надлишковість призводить до збільшення імовірності ураження завадами робочої смуги частот, спотворюючи інформаційні сигнали у безпроводному каналі зв'язку.

### 3. Метод формування інформаційних сигналів

Формування інформаційних сигналів здійснюють шляхом використання надширокосмугових сигналів з низькою спектральною щільністю потужності.

Надширокосмуговий сигнал  $n(t)$  поділяють на дві частини, з яких одну використовують у якості опорного сигналу.

Іншу частину сигналу  $n(t)$  затримують на час  $T_1$  при надходженні символу «1» чи на час  $T_0$  при надходженні символу «0».

Затриманий та опорний сигнали призначені для взаємної інтерференції у передавачі.

В суматорі передавача здійснюють складання опорного сигналу  $n(t)$  з надширокосмуговим сигналом, який затримано на час  $T_1$  чи  $T_0$  в залежності від надходження бінарного символу «1» чи «0».

$$z_{1,0}(t) = n(t) + n(t - T_{1,0}) \quad (1)$$

Спектр потужності сумарного сигналу обчислюють за час надходження  $t_a$  кожного інформаційного символу у вигляді:

$$\widehat{S}_z(f) = 2\widehat{S}_n(f)(1 + \cos(2\pi f T_{1,0})), \quad (2)$$

де  $\widehat{S}_n(f)$  – оцінка спектра потужності сигналу  $n(t)$  за час аналізу  $t_a$ .

Складання повністю некогерентних сигналів має місце, коли відносна затримка  $T_1$  чи  $T_0$  опорного і затриманого сигналів значно перевищує час когерентності

$$\tau_c \approx 1/(\Delta f)$$

надширокосмугового сигналу  $n(t)$ :

$$T_{1,0} \gg \tau_c \text{ чи } T_{1,0}\Delta f \gg 1.$$

Таким чином до безпроводної лінії поступають надширокосмугові сигнали з періодичною кодовою модуляцією спектра у відповідності з потоком двійкових інформаційних символів.

Оптимальний когерентний прийом надширокосмугових сигналів полягає у вимірюванні функції взаємної кореляції з опорним сигналом за час надходження одного інформаційного біту. Вимірювання функції взаємної кореляції для затриманих надширокосмугових сигналів здійснюється в частотній області шляхом подвійної спектральної обробки, здійснюючи їх спектральний стиск.

Визначення кореляційної функції з урахуванням співвідношення (2) для спектру прийнятих сигналів зазвичай покладено на швидкодіючий цифровий Фур'є-процесор. Застосування зворотнього перетворення Фур'є від спектру потужності (2) дозволяє обчислити автокореляційну функцію прийнятого надширокосмугового сигналу:

$$\widehat{R}_z(\tau) = 4\pi \int_0^{\infty} \widehat{S}_z(f) \cos(2\pi f\tau) df = 2[\widehat{R}_n(\tau) + \widehat{R}_n(\tau - T_{1,0}) + \widehat{R}_n(\tau + T_{1,0})],$$

де  $\widehat{R}_z(\tau)$  – функція автокореляції надширококутвого сигналу  $n(t)$ .

Обчислена автокореляційна функція, має інформаційний пік на часі затримки в залежності від поточного символу «1» чи «0». Рішення про наявність одного з двійкових символів приймається за зсувом на час  $T_1$  чи  $T_0$  інформаційного піку для автокореляційної функції. Таким чином здійснюють достовірне відновлення переданої інформації.

Широка смуга частот та надкоротка тривалість імпульсів висувають підвищені вимоги до точності синхронізації. В цих НШС системах у якості сигналу синхронізації використовують опорну послідовність сигналів. Інформаційні сигнали та сигнали синхронізації знаходяться на одному енергетичному рівні, а спектральна щільність усіх каналів знаходиться на рівні шумів, тому система значною мірою зазнає погіршення значень імовірності бітової похибки. У той же час застосування в системах зв'язку мобільних пристроїв технології надширококутвотвих сигналів дозволяє збільшити співвідношення сигнал/шум на вході приймача, що дає можливість зменшити рівень електромагнітного випромінювання та забезпечити таким чином вимоги щодо підвищення рівня завадо-

стійкості та прихованості каналу мобільних систем безпроводного зв'язку.

В імпульсних приймачах використовують корелятор, який здійснює згортку близьких за формою вхідного сигналу з еталонним. До корелятору надходять синхроімпульси та імпульси із різними часовими проміжками між ними, які відповідають окремим часовим проміжкам опорної кодової послідовності. У випадку співпадіння будь-якого проміжку, корелятор формує максимум, положення якого у часі чи зміна його полярності надається інформація щодо виду переданого двійкового сигналу. Однак у цьому випадку система синхронізації працює тільки за великих значеннях відношення сигнал/завада на вході приймача.

Під час формування надширококутвотвого інформаційного сигналу у передавачі та його декодування у приймачі за рахунок інтерференції опорного та шумового сигналів виникають внутрішньосистемні завади. Причому, їх вплив підсилюється та призводить до збільшення рівня бітової похибки при підвищенні швидкості передачі інформації за умов зменшення часу передачі біту  $T_s$  [10]. Зазвичай в існуючих безпроводних каналах систем НШС зв'язку одночасно передаються як опорний, так і інформаційний сигнали, які створюють один для одного внутрішньосистемні завади (рис. 1) [11].

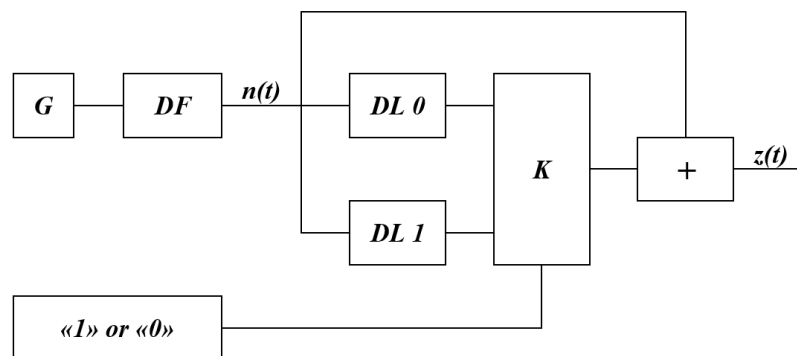


Рис. 1. Схема одночасного формування опорного та інформаційного сигналів

На рис. 1 зазначено:

G – генератор, який в автоколивальному режимі формує послідовність надкоротких імпульсів-чипів;

DF – цифровий смугово-пропускаючий фільтр, який формує сигнал  $n(t)$ ;

DL – лінії затримки, які зсувом на час  $T_1$  чи  $T_0$  формують інформаційні сигнали згідно з потоком двійкових бітів «одиниця» чи «нуль» від джерела інформації.

Опорний сигнал через суматор потужності випромінюється передавачем безперервно. Сигнал

$$z_{1,0}(t) = n(t) + n(t - T_{1,0}),$$

як сума опорного і інформаційного сигналів має вторинний максимум автокореляційної функції, положення якого у часі є інформаційним параметром сигналу.

Більш високу завадостійкість має система зв'язку з протилежними надширококутвотвими сигналами.

Передавач має лише одну лінію затримки (рис. 2). При цьому інформація кодується не зміною положення вторинного максимуму автокореляційної функції у часі, а зміною полярності цього максимуму.

У порівнянні з попередньою схемою друга лінія затримки DL замінена на ширококутвотвий фазообертувач F, який забезпечує фіксований фазовий зсув у робочій смузі частот. Оскільки затримка між опорним та інформаційним сигналами постійна, а зміна знака автокореляційної функції закладена в структурі самого сигналу, то схема приймача суттєво спрощується. Однак наявність ширококутвотвотвого фазообертувача з фіксованим зсувом фази робить її реалізацію складною, що обумовлено необхідністю узгодження технічних характеристик фазообертувача F в широкій смузі частот.

Зменшити рівень внутрішньосистемних завад та бітової похибки дозволяє метод часового розділення опорного та інформаційного сигналів, схема реалізації якого наведено на рис. 3.

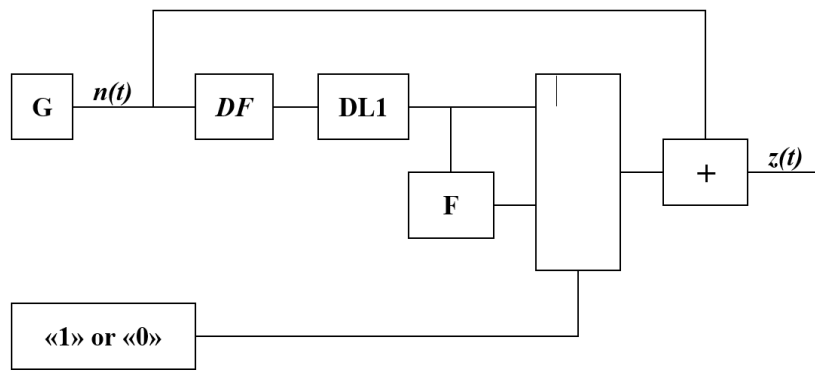


Рис. 3. Схема розділеного формування опорного та інформаційного сигналів

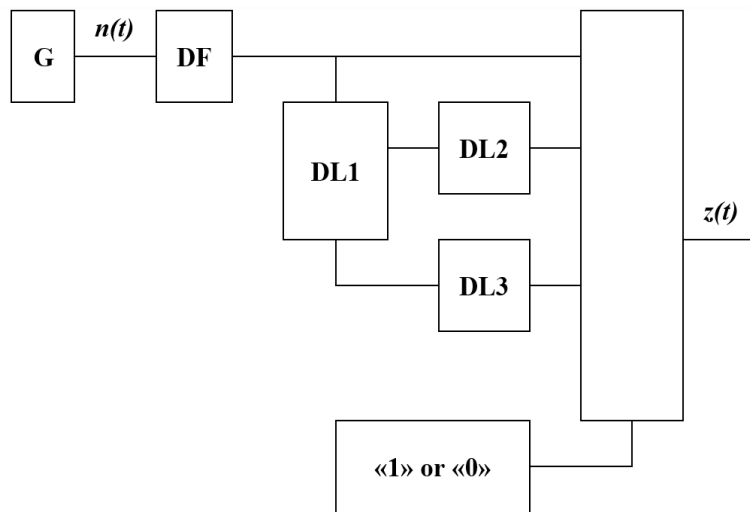


Рис. 2. Схема формування інформації протилежними НППС сигналами

На відміну від існуючих (рис. 1, 2), в схемі передавача застосовано трипозиційного комутатора. Протягом першої половини бітового інтервалу комутатор замикає вихід передавача безпосередньо на генератор НППС сигналу (G). Таким чином протягом періоду часу  $T_s/2$  формують опорний надширокопasmовий сигнал. У середині бітового інтервалу здійснюють переключення комутатора до однієї з двох можливих позицій в залежності від потоку двійкових бітів «одиниця» чи «нуль» від джерела інформації. При цьому лінія затримки DL1 забезпечує затримку сигналу  $x(t)$  на половину бітового інтервалу  $T_s/2$ , а лінії затримки DL2 та DL3 задіяні безпосередньо для формування потоку двійкових бітів «одиниця» чи «нуль». В результаті формується інформаційний сигнал, відокремлений у часі від опорного, який на одному інтервалі  $T_s$  має такий вигляд.

$$y(t) = \begin{cases} x(t), & 0 \leq t \leq \frac{T}{2}; \\ x\left(t - \frac{T}{2} - T_0\right), & \frac{T}{2} \leq t \leq T; \\ x\left(t - \frac{T}{2} - T_1\right), & \frac{T}{2} \leq t \leq T; \end{cases}$$

При цьому слід зазначити, що системи з надширокопasmовими сигналами, які використовують передачу опорного сигналу та їх автокореляційний

прийом, забезпечують високий рівень структурної прихованості сигналу.

### Висновки

Таким чином передавач формує та випромінює до вільного простору складний сигнал, до складу сигналу якого включено інформаційний імпульсний НППС сигнал у вигляді закодованої послідовності імпульсів та окремого імпульсного синхросигналу.

З огляду на те, що умови синхронізму підтримують безперервно під час сеансу зв'язку а не у дискретних точках, що характерно для відомих імпульсних систем, то висока якість синхронізації зберігають і під час взаємних переміщень мобільних об'єктів.

Зменшення часу синхронізації сигналів системи радіозв'язку з імпульсними надширокопasmовими сигналами та підвищення її якості, суттєво підвищує ефективність використання високої пропускної здатності під час роботи з великою кількістю користувачів, особливо під час роботи з мобільними об'єктами. При цьому підвищується усталеність каналів зв'язку до впливу завад від сусідніх каналів, забезпечуючи такі основні переваги НППС систем зв'язку, як:

- підвищена завадозахищеність;
- можливість забезпечення кодового розділення каналів;
- низький рівень спектральної щільності;

- енергетична та інформаційна захищеність зв'язку;  
- підвищена пропускна здатність.

Застосування методу формування надширокосмугового сигналу з усталеною синхронізацією дозволяє ефективно реалізувати потенційну високу щільність каналів зв'язку на один квадратний метр робочої зони. Завдяки зменшенню рівня інформаційного сигналу відносно рівня білого шуму в робочому діапазоні частот здійснюється одночасна беззавадова робота як традиційних вузькосмугових систем зв'язку, так і систем зв'язку, які використовують надширокосмугові сигнали. Використання технології НШС зв'язку з розподілом у часі синхроімпульсу та інформаційного сигналу дозволяє гарантовано забезпечити вимоги щодо

завадостійкості, прихованості і безпеки каналів безпровідного мобільного зв'язку на усіх етапах їх розробки, виготовлення та експлуатації.

### Вдячність

Цю роботу було частково профінансовано Європейським Союзом у рамках 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 повної підтримки її змісту, а лише відображає погляди авторів. Комісія не може нести відповідальності за будь-яке використання інформації, яку розміщено в цій роботі.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Celimuge Wu, Zhi Liu, Di Zhang, Tsutomu Celimuge Wu, Zhi Liu, Di Zhang, Tsutomu Yoshinga, Yusheng Ji. Spatial Intelligence towards Trustworthy Vehicular IoT. *IEEE Communication Magazine*, 56(10), 22-27 October 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1800089>.
2. Immoreev I.J., Sudakov A.A. Ultra-Wideband Interference Resistant System for Secure Radio Communication with High Data Rate. *ICCSC'02*, St. Petersburg, Russian Federation, June 2002, pp. 230-233.
3. Серков О. А., Панченко С. В., Трубочанінова К. А., Горюшкіна А. Є., Лазуренко Б. О.. Спосіб прийому цифрових двійкових сигналів в умовах шуму. Патент України на корисну модель № 145319 U МПК H04B 1/06. Опубл. 25.11.20, Бюл. № 22, заявка № u 2020 04847 подана 29.07.2020.
4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Изд. дом «Вильямс», 2003, 146 с.
5. Serkov A., Breslavets V., Tolkachov M., Churyumov G., Issam Saad. Noise-like signals in wireless information transmission systems. *Advanced Information Systems*. 2017. Vol. 1, №2. P. 33-39, available at: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.06>.
6. Serkov O. A., Churyumov G. I. On the issue of solving the problem of electromagnetic compatibility of the wireless telecommunication Systems. *Applied Radio Electronics*. Kharkiv: KHNURE, 2017. Vol. 16, № 3, 4. P. 117-121.
7. Serkov A., Breslavets V., Tolkachov M., Kravets V. Method of coding information distributed by wireless communication lines under conditions of interference. *Advanced Information Systems*. 2018. Vol. 2, No.2. P. 145-148, available at: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.25>.
8. Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости. М.: Госэнергоиздат, 1956. 151 с.
9. Slepian D. Some comment on the Detection of Gaussian Sgnals in Gaussian Noise. *JRE Transactions on Information Theory*. 1952. No. 2. P. 65-68.
10. Калинин В. И. Статистический анализ шумовой системы радиосвязи с двухканальным корреляционным приемником. *Журнал радиоэлектроники*. 2018. № 9. DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.9.5>.
11. Serkov A., Trubchaninova K., Mezitis M. Method of wireless transmission of digital information on the basis of ultra-wide signals. *Advanced Information Systems*. 2019. Vol. 3, No. 4. P. 33-38, available at: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.4.04>.

Received (Надійшла) 24.02.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.04.2021

### Metod of generating information signals in the system Industrial Internet of Things

Aleksandr Serkov, Nina Kuchuk, Bogdan Lazurenko, Alla Horiuskina

**Abstract.** Industrial facilities that use modern IT technologies require the ensured reliability and security of information in automated enterprise management. Concurrently, so as to ensure a high quality of communication, it is necessary to expand the bandwidth of communication channels, which are limited by the physical parameters of the radio frequency spectrum. In order to overcome this contradiction, we propose the application of technology fundamental to ultra-wideband signals, in which the ratio between the bandwidth and its central part is greater than „one”. For this reason, the information signal is emitted without a carrier frequency - simultaneously within the entire frequency band - provided that the signal level is lower than the noise level. For the transmission of information content, the method of positional-time coding is used, in which each information bit is encoded by hundreds of ultrashort pulses that arrive within a certain sequence. Mathematical models of signals and values observed in wireless communication systems with autocorrelation reception of modulated ultra-wideband signals are furthermore recommended. These assist in identifying features of the dependence of the error probability on the normalized signal-to-noise ratio and the signal base. Comparative analysis has shown that the best noise immunity of the systems considered in this paper is the communication system, which uses the time separation of the reference and information signals. During the first half of the bit interval, the switch closes the output of the transmitter directly to the generator of the ultra-wideband signal - forming a reference signal. In the middle of the bit interval, the switch alternates the output to one of two possible positions depending on the encoding signal – “zero” or “one”, forming the information part of the ultra-wideband signal. It should also be noted that systems with autocorrelation reception and separate transmission of reference and information signals, provide a high level of structural signal secrecy. Furthermore, they provide the reliable transmission of digital information, especially in interference conditions.

**Keywords:** IIoT; mobile communication; noise immunity; safety; Ultra-wideband signals.