

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-61-35>

УДК 621.391.8

Ткачук Валентина Вікторівна, начальник НДЧ ЛНТУ

<https://orcid.org/0000-0003-3296-3111>

Сацик Олександр Вікторович, аспірант

<https://orcid.org/0009-0009-5128-0333>

Бортнічук Станіслав Аркадійович, магістрант

Кошульський Андрій Володимирович, магістрант

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

СИНХРОНІЗАЦІЯ ТА НАДІЙНІСТЬ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ З ПСЕВДОВИПАДКОВИМ ПЕРЕЛАШТУВАННЯМ РОБОЧОЇ ЧАСТОТИ

Ткачук В. В., Сацик О. В., Бортнічук С. А., Кошульський А. В. Синхронізація та надійність систем зв'язку з псевдовипадковим перелаштуванням робочої частоти. У статті розглянуто питання підвищення надійності та забезпечення циклової синхронізації в системах зв'язку з псевдовипадковим перелаштуванням робочої частоти (ППРЧ). Запропоновано алгоритми синхронізації для систем зі швидкою та повільною перебудовою частоти, що ґрунтуються на аналізі збігів інформаційних символів і введенні синхросимволів у потік переданих даних. Розроблені структурні схеми описують роботу генераторів псевдовипадкових послідовностей, обчислювальних пристроїв і фільтрів узгодження. Наведено аналітичні вирази для визначення часу циклової синхронізації, оцінки шумів квантування, ймовірності помилки бітів та співвідношення сигнал/шум. Показано, що використання ортогональних посилок забезпечує мінімальну ймовірність помилки порівняно з протифазними сигналами. Отримані результати дають змогу оцінити вплив параметрів генераторів псевдовипадкових послідовностей, швидкості перебудови частоти та рівня перешкод на точність синхронізації. Перевагою запропонованого підходу є його універсальність і можливість застосування для систем із різними режимами перебудови частоти. Практичне значення роботи полягає у можливості використання результатів для проектування надійних телекомунікаційних систем і модулів синхронізації у програмно-визначених радіосистемах.

Ключові слова: синхронізація, ППРЧ, генератор псевдовипадкових послідовностей, ймовірність помилки, фільтр узгодження.

Tkachuk V., Satsyk O., Bortniychuk S., Koshul's'kyi A. Synchronization and reliability of communication systems with frequency-hopping spread spectrum. The paper considers the issue of increasing reliability and ensuring cyclic synchronization in communication systems with frequency-hopping spread spectrum (FHSS). Synchronization algorithms for systems with fast and slow frequency tuning are proposed, based on the analysis of information symbol coincidences and the introduction of synchronization symbols into the transmitted data stream. The developed structural diagrams describe the operation of frequency-hopping spread generators, computing devices, and matching filters. Analytical expressions are given for determining the cyclic synchronization time, estimating quantization noise, bit error probability, and signal-to-noise ratio. It is shown that the use of orthogonal packets provides the minimum probability of error compared to anti-phase signals. The results obtained make it possible to assess the influence of the parameters of frequency-hopping spread generators, frequency tuning speed, and interference level on synchronization accuracy. The advantage of the proposed approach is its versatility and the possibility of application to systems with different frequency tuning modes. The practical significance of the work lies in the possibility of using the results for designing reliable telecommunications systems and synchronization modules in software-defined radio systems.

Keywords: synchronization, FHSS, frequency hopping spectrum spreading generator, error probability, matching filter.

Актуальність теми.

У системах із програмною перебудовою частоти одним з найважливіших завдань організації циклової синхронізації передавача та приймача [1]. У передавачі та приймачі програмна перебудова синтезаторів частоти здійснюється за допомогою генераторів псевдовипадкової послідовності, які мають довжину k . Існує ряд ортогональних псевдовипадкових послідовностей з однаковим періодом повторення k . Це дає можливість організації роботи різних каналів із програмною перебудовою частоти [2]. У передавача та приймача локальної телекомунікаційної системи, налаштованих на один і той самий канал, псевдовипадкові послідовності зазвичай однакові. Завдання циклової синхронізації полягає у часовій когерентності генераторів псевдовипадкової послідовності приймача та передавача [3]. Іншими словами, існує необхідність налаштовувати генератор псевдовипадкової послідовності приймача таким чином, щоб генеровані ним значення збігалися зі значеннями сигналу генератора псевдовипадкової послідовності передавача в часі [4]. Для систем з псевдовипадковим перелаштуванням робочої частоти з швидкою та повільною перебудовою алгоритми синхронізації будуть різні.

У системах із швидкою перебудовою частоти передача одного інформаційного символу здійснюється на кількох частотах, що відповідають різним значенням сигналу генератора псевдовипадкової послідовності [5]. У системах з повільною перебудовою частоти, швидкість генерування інформаційних символів менша або дорівнює тактовій частоті генератора

псевдовипадкової послідовності. Оскільки в системах із швидкою перебудовою частоти один інформаційний символ передається на n різних частотах, що відповідають різним значенням сигналу генератора псевдовипадкової послідовності, то алгоритм роботи циклової синхронізації полягає в перевірці прийнятих символів з прийнятими на попередніх $n-1$ тактах [6]. У випадку розбіжності псевдовипадкова послідовність приймача зсувається на один додатковий такт і повторюється перевірка на відповідність. Якщо протягом певного часу перевірка на відповідність виконується успішно, то циклову синхронізацію можна вважати завершеною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

На рисунку 1 наведено структурну схему циклової синхронізації для систем із швидкою перебудовою частоти. Генератор псевдовипадкової послідовності (ГПСП) здійснює керування синтезатором частоти (СЧ), і внаслідок гетеродинного перетворення вхідний сигнал надходить на демодулятор з дешифратором (ДМДШ), де він набуває цифрового вигляду [7].

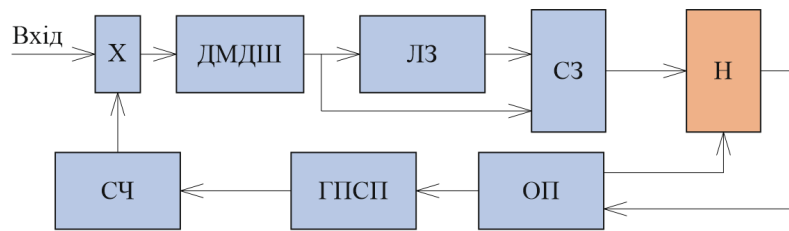


Рис. 1. Схема синхронізації для систем ППРЧ із швидкою перебудовою частоти

Схема збігу (СЗ) порівнює поточний прийнятий цифровий символ із попереднім. Для цього використовується лінія затримки (ЛЗ) на період повторення символів T_C . Результати порівняння надходять у накопичувач (Н). У разі відповідності символів, значення накопичувача збільшується, а у разі розбіжності – зменшується [8]. При неправильному налаштуванні генератора псевдовипадкової послідовності значення сигналу на виході суматора буде зменшуватись і в результаті досягне мінімального граничного значення $E_{\min}$. У цьому випадку обчислювальний пристрій (ОП) порушить послідовність генератора псевдовипадкової послідовності на один такт і встановить у накопичувачі його початкове значення.

Сигналом захоплення синхронізації служить досягнення в накопичувачі максимального граничного значення $E_{\max}$. Один з варіантів реалізації накопичувача наведено на рисунку 2 [9].

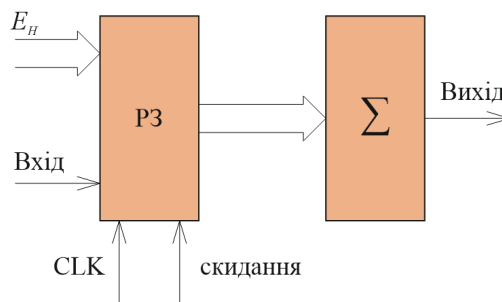


Рис. 2. Структурна схема накопичувача

Результат порівняння у бінарній формі зі схеми збігу надходить на регістр зсуву (РЗ), значення сигналів з виходів якого підсумовуються. Для встановлення початкового значення E_H у накопичувачі використовується сигнал скидання, що генерується обчислювальним пристроєм. Слід зазначити, що на кожен n -ий такт відбувається зміна інформаційного символу, отже, кожен n -ий тактовий імпульс CLK пропускається і на n -му такті результати порівняння не враховуються [10].

Час необхідний для циклової синхронізації можна визначити за формулою:

$$T_{\text{синхр}} = kT(E_H - E_{\min})/2, \quad (1)$$

де T – період тактової частоти генератора псевдовипадкової послідовності; k – період повторення псевдовипадкової послідовності; E_H , $E_{\min}$ – початкове та мінімальне значення напруги на виході накопичувача.

Оскільки запропонований алгоритм не застосовується для систем з повільною перебудовою робочої частоти, для них доцільно запропонувати інший алгоритм циклової синхронізації [11, 12]. Якщо в інформаційний потік внести певну надмірність у вигляді періодичних синхросимволів, то алгоритм циклової синхронізації буде полягати в узгодженій фільтрації синхросимволів на частотах, що визначаються генератором псевдовипадкової послідовності [13]. Період повторення синхросимволів m слід вибирати некрatним періоду псевдовипадкової послідовності. У цьому випадку синхросимволи потраплятимуть у всі частотні піддіапазони, що визначаються генератором псевдовипадкової послідовності [14, 15].

Результати досліджень.

Структурна схема циклової синхронізації для систем із повільною перебудовою частоти наведена на рисунку 3.

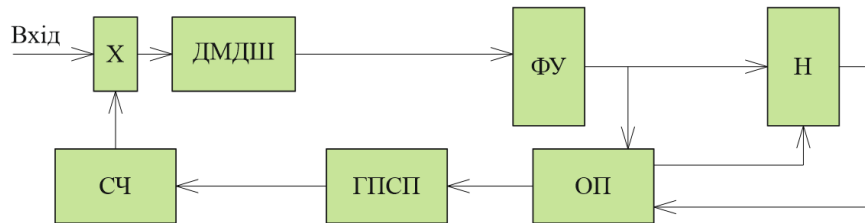


Рис. 3. Структурна схема організації синхронізації для систем зв'язку з ППРЧ при повільній перебудові робочої частоти

Демодульований та дешифрований сигнал надходить на вхід фільтра узгодження (ФУ), що виділяє синхросимволи. Генератор псевдовипадкової послідовності зупиняється і на виході синтезатора частот (СЧ) з'являється сигнал фіксованої частоти. За відсутності імпульсу на виході фільтра узгодження протягом $m \cdot k$ тактів генератора псевдовипадкової послідовності, обчислювальний пристрій (ОП) генерує один тактовий імпульс і генератор псевдовипадкової послідовності видає псевдовипадкове значення. Таким чином, пошук синхросимволів здійснюється по всьому частотному діапазоні й у разі несприятливої перешкодової обстановки, або роботи засобів радіоелектронної боротьби в будь-якому з піддіапазонів. Якщо фільтр узгодження виділяє синхросимвол, то обчислювальний пристрій скидає накопичувач, запускає генератор псевдовипадкової послідовності та перевіряє наявність синхросимволу кожні m тактів. Результат перевірки заноситься у накопичувач. При досягненні у накопичувачі максимального граничного значення обчислювальний пристрій приймає рішення про наявність циклової синхронізації. При досягненні у накопичувачі мінімального порогового значення, обчислювальний пристрій приймає рішення про скидання синхронізації або виявлення хибної синхронізації. Обчислювальний пристрій генерує додатковий тактовий імпульс для генератора псевдовипадкової послідовності та зупиняє його. Процес циклової синхронізації повторюється.

Слід зазначити, що за низької розрядності інформаційних символів, ймовірність відповідності їх із синхросимволами висока, що призводить до хибного спрацьовування фільтра узгодження і збільшує час синхронізації, або при бінарних символах робить синхронізацію практично неможливою. У цьому випадку можна ускладнити алгоритм синхронізації використовуючи кілька синхросимволів поспіль, що у свою чергу ускладнює пристрій циклової синхронізації.

Час синхронізації такої системи залежить від розрядності інформаційних символів, ймовірності збігу їх із синхросимволами, періоду повторення синхросимволів, періоду псевдовипадкової послідовності та рівня впливу завад. За відсутності завад та унікальності синхросимволів, середній час синхронізації становить:

$$\bar{T}_{\text{синхр}} = mT(T_{\text{max}} - T_H + \frac{k}{2}), \quad (2)$$

де m – період повторення синхросимволів; T – період тактової частоти генератора псевдовипадкових сигналів.

До недоліків запропонованого підходу слід віднести обмеження на розрядність інформаційних знаків. При низькій розрядності метод або не застосовується, або схема пристрою циклової синхронізації значно ускладнюється. Ще одним недоліком є необхідність введення надмірності в інформаційний потік, що ускладнює схему передавача. Оскільки частотні властивості

більшості систем обмежені, то введення надмірності можливе в межах 5...10% від числа символів у інформаційному потоці.

До переваг викладеного методу належить незалежність його від швидкості перебудови частоти. Введення синхросимволів дозволяє застосовувати цей метод як для швидкої, так і для повільної перебудови частоти.

Під час передачі сигналів на одній частотній позиції система зв'язку з псевдовипадковим перелаштуванням робочої частоти функціонує подібно до звичайних цифрових систем, що працюють у каналах із шумом. При квантуванні сигналу за час перетворення аналогового сигналу в імпульсний сигнал кодоімпульсної модуляції виникають похибки, які називаються шумами квантування.

Погіршення сигналу внаслідок квантування виникає через похибку апроксимації, яка становить половину інтервалу квантування q , тобто величину $\pm \frac{q}{2} B$. При рівномірному квантуванні аналогового сигналу та рівномірному розподілі ймовірності появи помилки квантування $p(O_{KB})$ – середню потужність шуму квантування можна визначити як:

$$\sigma^2 = \int_{-q/2}^{+q/2} O_{KB}^2 p(O_{KB}) dO_{KB} = \frac{q^2}{12}. \quad (3)$$

Особливістю сигналів мовлення є те, що більше половини часу розмови рівень звуку становить менше 25% від середнього значення, тому рівномірне квантування стає невигідним, так як слабкі сигнали будуть мати приблизно на 40 дБ гірше відношення сигнал/шум. Тому логічно застосовувати нерівномірне квантування сигналів мовлення. Це можна реалізувати попередньо деформувавши сигнали на стороні, що передає, пропустивши їх через характеристику стиснення, показану на рисунку 4, що описується виразом:

$$U_{BIX} = \begin{cases} U_{BIX_{max}} \frac{16|U_{BX}|}{U_{BX_{max}}} sqn U_{BX} & \text{при } 0 < \frac{|U_{BX}|}{U_{BX_{max}}} \leq 114 \cdot 10^{-4} \\ U_{BIX_{max}} \left(\frac{1 + \ln \left(87.6 \frac{|U_{BX}|}{U_{BX_{max}}} \right)}{5.47} \right) sqn U_{BX} & \text{при } 114 \cdot 10^{-4} < \frac{|U_{BX}|}{U_{BX_{max}}} \leq 1 \end{cases}, \quad (4)$$

де $sqn U_{BX} = \begin{cases} +1 & \text{при } U_{BX} \geq 1 \\ -1 & \text{при } U_{BX} < 0 \end{cases}$, U_{BX} , U_{BIX} – напруги на вході та виході пристрою стиснення, відповідно.

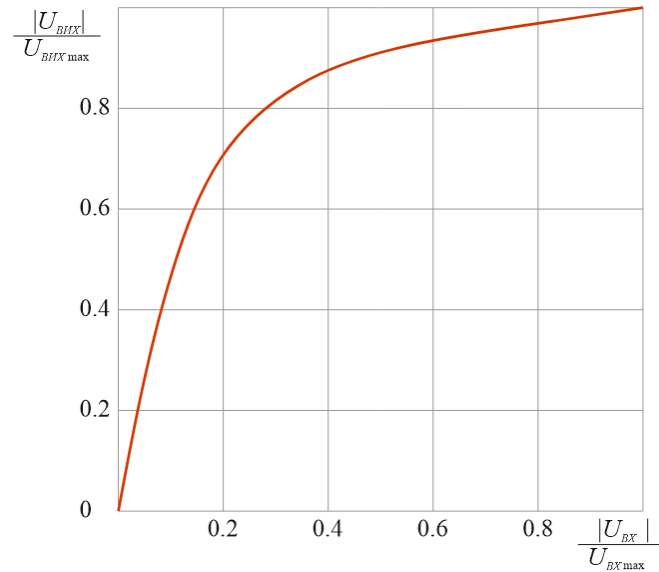


Рис. 4. Характеристика стиснення сигналу мовлення на передавальній стороні лінії зв'язку перед подальшим рівномірним квантуванням

При великому числі рівнів квантування M , помилка квантування не перевищує $q/2$, тому її можна записати як:

$$O_{KB_{\max}} \leq \frac{q}{2} = \frac{U}{2(M-1)} \cong \frac{U}{2M}, \quad (5)$$

де U – амплітудне значення розмаху квантованого сигналу.

При постійній потужності сигналу, прийняття правильного рішення приймачем системи зв'язку обернено пропорційне числу рівнів сигналу. Тому бінарне подання цифрової інформації енергетично вигідніше порівняно з багаторівневим. Таким чином керуючись допустимою помилкою квантування, можна визначити число рівнів квантування та розмір бітового слова ℓ , що кодує відліки сигналу у моменти дискретизації:

$$\ell \geq \log_2 M, \quad (6)$$

де ℓ – число біт в слові.

На вході детектора приймального пристрою сигнал можна описати наступним чином:

$$S_{BX}(t) = S_i(t) + n(t), \quad (7)$$

де $S_i(t)$ – компонента сигналу, що передавалася; $n(t)$ – шум.

Детектор максимальної правдоподібності, відповідно до теорії прийняття рішень мінімізує ймовірність помилки шляхом порівняння сигналу (7) з граничним значенням $-\chi$ та вибирає гіпотезу з максимальною правдоподібністю, тобто $S_{BX}(t) > \chi$, що відповідає одній гіпотезі, а $S_{BX}(t) < \chi$ іншій. Таким чином найбільш ймовірне значення переданого сигналу відповідає найбільшій щільності ймовірності. Тому детектор вибирає в якості рішення гіпотезу з максимальним значенням умовної ймовірності $p(S_{BX}(t)/S_i)$. Двійковий сигнал буде виглядати:

$$S_i(t) = \begin{cases} S_1 & \text{при передачі символу 1} \\ S_0 & \text{при передачі символу 0} \end{cases} \quad (8)$$

тому

$$p(S_{BX}(t)/S_1) > p(S_{BX}(t)/S_0), \quad (9)$$

відповідає ухваленню рішення про те, що було передано одиничну послідовність, а в іншому випадку передавалася нульова послідовність. Ймовірність помилкового біта p_e у разі прийому двійкових сигналів у Гауссовому шумі визначатиметься:

$$p_{\delta} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{u=(a_1-a_0)/2\sigma}^{u=\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du = Q\left(\frac{a_1-a_0}{2\sigma}\right), \quad (10)$$

де $Q\left(\frac{a_1-a_0}{2\sigma}\right)$ – Гаусовий інтеграл помилок; u^2 – дисперсія шуму; a_1, a_0 – сигнальні компоненти під час передачі S_1 і S_0 , відповідно.

Максимально можливе відношення сигнал/шум для конкретного сигналу можна отримати на виході фільтра узгодження. Якщо фільтр узгоджує вхідний різницевий сигнал $S_1 - S_0$, то для моменту часу рівного часу передачі символу $t = T$ відношення сигнал/шум на виході можна визначити як:

$$\frac{S}{N} = \frac{(a_1 - a_0)^2}{\sigma^2} = \frac{2E_r}{N_0}, \quad (11)$$

де $E_r = \int_0^T (S_1 - S_0)^2 dt$ – енергія сигналу різниці на вході фільтра; $\frac{N_0}{2}$ – двостороння спектральна густина потужності шуму на вході фільтра.

Розкриваючи вираз енергії прийнятого під час обробки біта сигналу отримаємо:

$$E_r = \int_0^T S_1^2 dt + \int_0^T S_0^2 dt - 2 \int_0^T S_1 S_0 dt, \quad (12)$$

у виразі (12) два перші доданки визначають енергію бітових посилок $E_{\delta} = \int_0^T S_1^2 dt = \int_0^T S_0^2 dt$, а третій доданок є коефіцієнтом взаємної кореляції нульової та одиничної посилок:

$$\rho = \frac{1}{E_{\delta}} \int_0^T S_1 S_0 dt. \quad (13)$$

Тому за допомогою підстановки можна отримати опис енергії сигналу у вигляді наступного виразу:

$$E_r = 2E_{\delta} - 2\rho E_{\delta} = 2E_{\delta}(1 - \rho), \quad (14)$$

підставляючи (14) в (10) з урахуванням (11), отримаємо ймовірність бітової помилки для оптимального прийому бінарних сигналів у вигляді Гаусового інтегралу помилок

$$p_{\delta} = Q\left(\sqrt{\frac{E_{\delta}(1 - \rho)}{N_0}}\right) \quad (15)$$

З виразу (15) справедливим буде висновок, що при протилежних по фазі посилках ($\rho = -1$) ймовірність бітової помилки вище, ніж при ортогональних ($\rho = 0$) посилках. Найкращий випадок коли посилки збігаються один з одним ($\rho = 1$), але при цьому приймач їх не може зафіксувати і таку ситуацію використовувати на практиці не вдається.

Висновки та перспективи подальшого дослідження.

У роботі проведено теоретичний аналіз та розроблено алгоритми циклової синхронізації для систем зв'язку з ППРЧ, що забезпечують підвищення надійності передавання інформації в умовах дії шумів і перешкод. Запропоновано два варіанти реалізації синхронізації – для систем зі швидкою та повільною перебудовою частоти. Для систем зі швидкою перебудовою реалізовано алгоритм порівняння прийнятих символів у межах $n = 8 \dots 16$ тактів генератора псевдовипадкової послідовності, що дозволило скоротити середній час циклової синхронізації до $T_{\text{синхр}} = 0.8 \dots 1.2$ с при довжині послідовності $k = 127$ і тактовій частоті $f_t = 100$ кГц. Для систем із повільною перебудовою частоти доведено ефективність методу введення синхросимволів із періодом повторення $m = 15 \dots 20$, що забезпечує стабільне відновлення синхронізації за рівня завад до -12 дБ.

Розрахунки показали, що середня ймовірність бітової помилки при ортогональних сигналах становить $P_b = 10^{-5}$ при відношенні сигнал/шум $E_b/N_0 = 14$ дБ, тоді як при протифазних сигналах –

$P_b = 3.2 \times 10^{-4}$. Потужність шуму квантування, визначена за рівнем квантування $M = 256$, не перевищує 3.9×10^{-5} від повної потужності сигналу, що відповідає відношенню сигнал/шум 44 дБ.

Проведений аналіз підтвердив, що введення надмірності в межах 5...10% не призводить до суттєвого зниження швидкості передачі, але значно підвищує стійкість синхронізації. Перспективи подальших досліджень полягають у комп'ютерному моделюванні розроблених алгоритмів у середовищі MATLAB/Simulink, визначенні оптимальних параметрів k , m , n для різних типів завад, а також розробленні адаптивних схем синхронізації з використанням методів машинного навчання для динамічного налаштування граничних рівнів $E_{\min}$ та $E_{\max}$. Очікується, що такі підходи дозволять зменшити середній час синхронізації на 25...30% і підвищити завадостійкість системи на 6...8 дБ.

Список бібліографічного опису

1. Y. Wang, Y. Hao, H. Han, J. Lu and H. Li, "Frequency Hopping Pattern and Synchronization based on Hopping Spread Spectrum Communication," 2021 IEEE 4th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), Chongqing, China, 2021, pp. 894-898, doi: 10.1109/IMCEC51613.2021.9482343.
2. P. Bakhovskyy, A. Tkachuk, M. Yevsiuk, O. Zabolotnyi, O. Moroz and O. Satsyk, "Development and Interaction of the VTF Concept with IoT Platforms on the Example of the 5G Standard," 2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/DESSERT61349.2023.10416439. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10416439>.
3. P. Thiele et al., "Machine Learning Based Prediction of Frequency Hopping Spread Spectrum Signals," 2023 IEEE 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Toronto, ON, Canada, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/PIMRC56721.2023.10293939.
4. Kozlovskiy, V., Kozlovskiy, V., Toroshanko, A., Toroshanko, O., & Yakumchuk, N. (2023). Overload and Traffic Management of Message Sources With Different Priority of Service. *Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 13(3), 33-36. <https://doi.org/10.35784/iapgos.3505>.
5. Satsyk, V., Cagánová, D., Reshetylo, O., Zabolotnyi, O., Tkachuk, A. (2023). Increasing the Speed and Performance of the Drupal CMS Server for Industrial IoT Technologies. In: Balog, M., Iakovets, A., Hrehova, S. (eds) *EAI International Conference on Automation and Control in Theory and Practice . EAI ARTEP 2023. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-31967-9_6.
6. X. Li and J. Hwu, "A frequency hopping spread spectrum transmission scheme for uncoordinated cognitive radios," 2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Taipei, Taiwan, 2009, pp. 2345-2348, doi: 10.1109/ICASSP.2009.4960091.
7. Kozlovskiy, V., Yakymchuk, N., Selepyna, Y., Moroz, S., & Tkachuk, A. (2023). Development of a Modified Method of Network Traffic Forming. *Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 13(1), 50-53. <https://doi.org/10.35784/iapgos.3452>.
8. Umer Javed, Di He, Peilin Liu, Yueming Yang. Frequency hopping in IEEE 802.15.4 to mitigate IEEE 802.11 interference and fading. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2018, 29(3): 445-455.
9. Yakymchuk, N., Selepyna, Y., Yevsiuk, M., Prystupa, S., Moroz, S.: Monitoring of Link-Level Congestion in Telecommunication Systems Using Information Criteria. *Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 12(4), 26-30. (2022). <https://doi.org/10.35784/iapgos.3076>.
10. N. K. Vishwakarma and R. K. Singh, "Design and Implementation of FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) Synthesizer," 2021 7th International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC), Noida, India, 2021, pp. 151-155, doi: 10.1109/ICSC53193.2021.9673302.
11. Zablotskiy, V., Selepyna, Y., Lyshuk, V., Yakymchuk, N., Tkachuk, A.: Method for Evaluation Quality Parameters of Telecommunications Services. *Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 12(2), 30-33 (2022). <https://doi.org/10.35784/iapgos.2918>.
12. R. C. Leyva, M. U. Herrera, F. M. Pincay and W. A. Guarochico, "Frequency Hopping Spread Spectrum Simulation for Bluetooth Using Matlab," 2023 18th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), Aveiro, Portugal, 2023, pp. 1-7, doi: 10.23919/CISTI58278.2023.10211570.
13. Moroz, S., Tkachuk, A., Khvyshchun, M., Prystupa, S., Yevsiuk, M.: Methods for Ensuring Data Security in Mobile Standards. *Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 12(1), 4-9 (2022). <https://doi.org/10.35784/iapgos.2877>.
14. Bakhovskyy, P., Yevsiuk, M., Zabolotnyi, O., Cagánová, D., Tkachuk, A.: Stages of the Virtual Technical Functions Concept Networks Development. In: D. Cagánová et al. (eds.), *Advances in Industrial Internet of Things, Engineering and Management, EAI / Springer Innovations in Communication and Computing*, pp. 119-135 (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-69705-1_7.
15. Elhabian, T., Zhang, B., Shao, D. (2004). Fast De-hopping and Frequency Hopping Pattern (FHP) Estimation for DS/FHSS Using Neural Networks. In: Yin, FL., Wang, J., Guo, C. (eds) *Advances in Neural Networks - ISNN 2004. ISNN 2004. Lecture Notes in Computer Science*, vol 3174. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-28648-6_39.

References

1. Y. Wang, Y. Hao, H. Han, J. Lu and H. Li, "Frequency Hopping Pattern and Synchronization based on Hopping Spread Spectrum Communication," 2021 IEEE 4th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), Chongqing, China, 2021, pp. 894-898, doi: 10.1109/IMCEC51613.2021.9482343.

2. P. Bakhovskyy, A. Tkachuk, M. Yevsiuk, O. Zabolotnyi, O. Moroz and O. Satsyk, "Development and Interaction of the VTF Concept with IoT Platforms on the Example of the 5G Standard," 2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/DESSERT61349.2023.10416439. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10416439>.
3. P. Thiele et al., "Machine Learning Based Prediction of Frequency Hopping Spread Spectrum Signals," 2023 IEEE 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Toronto, ON, Canada, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/PIMRC56721.2023.10293939.
4. Kozlovskiy, V., Kozlovskiy, V., Toroshanko, A., Toroshanko, O., & Yakumchuk, N. (2023). Overload and Traffic Management of Message Sources With Different Priority of Service. *Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 13(3), 33-36. <https://doi.org/10.35784/iapgos.3505>.
5. Satsyk, V., Cagaňová, D., Reshetylo, O., Zabolotnyi, O., Tkachuk, A. (2023). Increasing the Speed and Performance of the Drupal CMS Server for Industrial IoT Technologies. In: Balog, M., Iakovets, A., Hrehova, S. (eds) *EAI International Conference on Automation and Control in Theory and Practice . EAI ARTEP 2023*. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-31967-9_6.
6. X. Li and J. Hwu, "A frequency hopping spread spectrum transmission scheme for uncoordinated cognitive radios," 2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Taipei, Taiwan, 2009, pp. 2345-2348, doi: 10.1109/ICASSP.2009.4960091.
7. Kozlovskiy, V., Yakymchuk, N., Selepyna, Y., Moroz, S., & Tkachuk, A. (2023). Development of a Modified Method of Network Traffic Forming. *Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 13(1), 50-53. <https://doi.org/10.35784/iapgos.3452>.
8. Umer Javed, Di He, Peilin Liu, Yueming Yang. Frequency hopping in IEEE 802.15.4 to mitigate IEEE 802.11 interference and fading. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2018, 29(3): 445-455.
9. Yakymchuk, N., Selepyna, Y., Yevsiuk, M., Prystupa, S., Moroz, S.: Monitoring of Link-Level Congestion in Telecommunication Systems Using Information Criteria. *Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 12(4), 26-30. (2022). <https://doi.org/10.35784/iapgos.3076>.
10. N. K. Vishwakarma and R. K. Singh, "Design and Implementation of FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) Synthesizer," 2021 7th International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC), Noida, India, 2021, pp. 151-155, doi: 10.1109/ICSC53193.2021.9673302.
11. Zablotskiy, V., Selepyna, Y., Lyshuk, V., Yakymchuk, N., Tkachuk, A.: Method for Evaluation Quality Parameters of Telecommunications Services. *Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 12(2), 30-33 (2022). <https://doi.org/10.35784/iapgos.2918>.
12. R. C. Leyva, M. U. Herrera, F. M. Pincay and W. A. Guarochico, "Frequency Hopping Spread Spectrum Simulation for Bluetooth Using Matlab," 2023 18th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), Aveiro, Portugal, 2023, pp. 1-7, doi: 10.23919/CISTI58278.2023.10211570.
13. Moroz, S., Tkachuk, A., Khvyshchun, M., Prystupa, S., Yevsiuk, M.: Methods for Ensuring Data Security in Mobile Standards. *Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 12(1), 4-9 (2022). <https://doi.org/10.35784/iapgos.2877>.
14. Bakhovskyy, P., Yevsiuk, M., Zabolotnyi, O., Cagaňová, D., Tkachuk, A.: Stages of the Virtual Technical Functions Concept Networks Development. In: D. Cagaňová et al. (eds.), *Advances in Industrial Internet of Things, Engineering and Management*, EAI / Springer Innovations in Communication and Computing, pp. 119-135 (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-69705-1_7.
15. Elhabian, T., Zhang, B., Shao, D. (2004). Fast De-hopping and Frequency Hopping Pattern (FHP) Estimation for DS/FHSS Using Neural Networks. In: Yin, FL., Wang, J., Guo, C. (eds) *Advances in Neural Networks - ISNN 2004*. ISNN 2004. Lecture Notes in Computer Science, vol 3174. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-28648-6_39.