

СЛОБОДЯН МАКСИМ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9277-565X>e-mail: mslobodian@khmnu.edu.ua

МОДЕЛЬ ХАОТИЧНОЇ НАДШИРОКОСМУГОВОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

У статті описано застосування моделі надширокосмугового зв'язку на основі хаотичної синхронізації як малопотужного та ефективного альтернативного рішення для побудови бездротових сенсорних мереж. Використання хаотичних сигналів як носіїв інформації в системах бездротового зв'язку має низку переваг, до яких відноситься широкий спектр сигналу, висока інформаційна ємність, кібербезпека та низьке енергоспоживання кіл-генераторів. Передача цифрового сигналу виконується за допомогою маніпуляції хаотичними радіоімпульсами, прийом і демодуляція яких реалізується на основі використання односпрямованої синхронізації нелінійних динамічних систем. На основі теорії хаотичної синхронізації, в програмному середовищі MATLAB/Simulink була побудована модель та проведено імітаційне моделювання хаотичної надширокосмугової системи передачі інформації. Розглянуто негативний вплив шуму в каналі зв'язку та проблему неідентичності параметрів систем. Запропоновані моделі можуть бути використані для проектування та розробки ефективних бездротових сенсорних мереж для застосування у сфері охорони здоров'я.

Ключові слова: бездротові сенсорні мережі, хаотичний зв'язок, надширокосмугові системи, динамічні системи, синхронізація

SLOBODIAN MAKSYM
Khmelnitskyi National University

MODEL OF A CHAOTIC ULTRA-WIDEBAND INFORMATION TRANSMISSION SYSTEM FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS

Distributed measuring systems, consisting of interconnected wireless sensor nodes with autonomous supply, have plenty of applications in different areas of engineering and technology. Therefore, wireless sensor network design and optimization is a vital problem in informational technologies and computer engineering. Regardless of particular application and architecture, a wireless sensor network consists of several small sensor nodes somehow distributed in an area of inspection. Such a design ensures a distributed parameter measuring, according to which, each node performs preprocessing procedures for the data, which are to be aggregated by a so-called sink node and sent via other networks, e.g., wired or wireless local area network. For healthcare solutions, it is important to ensure a stable connection with the network and server back-end to provide a high-level analysis based on predicting methods of machine learning algorithms. This paper describes an application of an ultra-wideband communication model based on chaos synchronization as a low-power and efficient alternative solution for building wireless sensor networks. Thus, using chaotic signals as information carriers in wireless communication has several advantages, including a wide smooth spectrum, high information capability, cybersecurity, and low power consumption. The synchronization problem is one of the most vital tasks to be solved to design a chaos application for ultra-wide-band communication. Being well-studied for periodic signals, modern synchronization theory contains plenty of solutions for classical telecommunication and radio engineering systems, however, it is not developed enough for chaotic systems. Hence, a one-directional dissipative synchronization between two Chen systems is studied in the first section. The second section is devoted to the computer simulation of the model, described in the previous section. All the models built and the simulations performed have been done using MATLAB/Simulink software. The negative impact of channel noise and inequality of system parameters is considered. The possible way how to improve technical characteristics is also provided. Proposed models are to be used to design and develop low-cost wireless sensor networks for multi-channel healthcare solutions.

Keywords: wireless sensor networks, chaos communication, ultra-wide-band systems, dynamic systems, synchronization

Постановка проблеми та аналіз літературних джерел згідно теми дослідження

Розподілені вимірювальні системи, що складаються із взаємопов'язаних бездротових сенсорних вузлів з автономним живленням, знаходять широке застосування в різних галузях інженерних технологій та сприяють вирішенню різноманітних наукових та інженерно-технічних задач. Тому проектування та оптимізація бездротових сенсорних мереж (БСМ), в т.ч. спеціалізованого програмного забезпечення (ПЗ) для їхніх компонентів, є актуальною проблемою в інформаційних технологіях та комп'ютерній інженерії. Незалежно від конкретного застосування та архітектури, БСМ складається з набору невеликих сенсорних вузлів, розподілених у зоні контролю, наприклад, випадковим чином або рівномірно у критичних місцях, і з'єднаних між собою бездротовим каналом зв'язку [1]. Така конструкція забезпечує вимірювання та контроль розподілених в просторі фізичних величин, наприклад, температури, тиску, вологості; або моніторинг параметрів людського тіла в системах охорони здоров'я, наприклад, пульсових сфінгографічних хвиль (ПСФГ) [2, 3]. Відповідно до структури компонентів БСМ, кожен вузол, який оснащений відповідним сенсором та вимірювальним перетворювачем, виконує процедури попередньої обробки даних та їхню передачу для подальшої агрегації головними вузлами і відправлення через шлюзи локальних мереж, наприклад, дротових або бездротових локальних мереж (LAN), персональних мереж (PAN), або одразу через мережі Інтернет до централізованого сервера обробки та збору даних [1].

Протоколи бездротового зв'язку, що використовуються в промислових і персональних мережах, включно з БСМ і бездротовим Інтернетом речей (IoT), базуються на декількох стандартах [4–6]: IEEE 802.11 (Wi-Fi, LAN), IEEE 802.15.1 (Bluetooth) та IEEE 802.15.4 (PAN). Ці стандарти, як і все сімейство стандартів IEEE 802, здебільшого визначають лише фізичний рівень (PHY) і частково каналний рівень (DLL) [5, 6].

Так, стандарт IEEE 802.15.4 має кілька варіацій базового протоколу, розроблених для задоволення конкретних технічних вимог [6]. Наприклад, технологія ZigBee реалізує базовий протокол IEEE 802.15.4, а також розширює його унікальною моделлю з'єднання вузлів [7].

Методи передачі інформації, що базуються на використанні хаотичних коливань в якості несучих сигналів, беруть свій початок з відкриття явища синхронізації нелінійних динамічних систем (НДС) [8, 9]. Перші результати в цій області дослідження були отримані на початку 90-х років XX ст. і з того часу викликають інтерес у науковців та інженерів-дослідників, що підтверджується численними вітчизняними та зарубіжними публікаціями. Пояснюється це насамперед рядом переваг, яких теоретично можна досягти реалізувавши методи хаотичного прийому-передачі для побудови енергоефективних бездротових систем передачі інформації різного призначення. Так, будучи за своєю природою неперіодичними широкосмуговими сигналами, схожими за формою та спектром до комоподібних сигналів, хаотичні коливання характеризуються широкою смугою частот та стійкістю щодо поширення в багатоприменовому середовищі, у порівнянні із сигналами із обмеженим спектром [10]. Завдяки розвитку теорії та практичної реалізації нелінійних НДС у вигляді простих електричних кіл-осциляторів, можливим є схемотехнічна реалізація генераторів хаотичних коливань, що є ефективним альтернативним рішенням щодо розширення спектру для побудови на їхній базі завадостійких багатоканальних систем передачі, що є особливо актуальним для безпроводних сенсорних мереж. Так, наприклад, стандартом IEEE 802.15.4а хаотичні системи прямої передачі визначаються як опціональне рішення для персональних безпроводних систем зв'язку [11, 12]. В таких системах прийому-передачі аналогова електронна схема генерує хаотичні коливання одразу в заданій смузі частот без перенесення частоти сигналу, аналогічно прийом та обробка такого сигналу на приймальній стороні виконується без проміжного перетворення частоти [11].

Для побудови систем цифрового зв'язку на базі детермінованого хаосу необхідно використовувати одну з декількох можливих стратегій прийому. Так, наприклад, когерентний метод прийому потребує синхронізації між приймачем і передавачем, в складі яких повинні бути відтворені майже ідентичні фрагменти деякої НДС генератора хаотичних коливань [8–10]. Задача синхронізації є однією з найголовніших, які необхідно вирішити для застосування хаотичних сигналів для надширокосмугових (НШС) систем зв'язку. Наприклад, в роботі [13] на основі хаотичної синхронізації спроектовано приймально-передавальний пристрій для кварцового перетворювача сенсора тиску. Будучи добре вивченою для періодичних сигналів, сучасна теорія синхронізації містить багато рішень для класичних телекомунікаційних і радіотехнічних систем, однак стосовно хаотичних систем вона залишається недостатньо розвинутою.

В якості альтернативи, представляючи меншу складність для практичної реалізації і не вимагаючи забезпечення синхронізації, деякі некогерентні методи також можуть бути використані, навіть якщо вони теоретично гірші за технічними характеристиками ніж когерентні методи [11].

Метою роботи є розробка та імітаційне моделювання хаотичної цифрової системи зв'язку на основі загальної синхронізації для передачі даних з хаотичною маніпуляцією (Chaos Shift Keying, CSK). Запропонована модель позиціонується як ефективний альтернативний метод хаотичної НШС бездротової передачі інформації для подальшої реалізації в системах БСМ.

Математична модель хаотичної системи передачі на базі синхронізації НДС

Розглянемо деяку неперервну НДС, що еволюціонує з часом згідно наступного векторного рівняння:

$$d\vec{u}(\tau)/d\tau = \vec{F}[\vec{u}(\tau), \vec{k}], \quad \vec{u}(\tau) \in \check{Y}^n, \quad \vec{k} \in \check{Y}^m \quad (1)$$

де $\vec{u}(\tau) = [u_1(\tau), u_2(\tau), \dots, u_n(\tau)]$ – вектор стану системи, $\vec{k} = [k_1, k_2, \dots, k_m]$ – вектор параметрів, \vec{F} – нелінійна векторна функція, яка вважається відомою на передавальній та приймальній сторонах.

Згідно методу декомпозиції НДС, вихідна система (1) розглядається як така, що може бути представлена у вигляді двох підсистем:

$$\vec{F} = [\vec{G}, \vec{H}], \quad \vec{u} = [\vec{v}(\tau), \vec{w}(\tau)] \quad (2)$$

де $\vec{v}(\tau) = [u_1(\tau), u_2(\tau), \dots, u_p(\tau)]$, $\vec{w}(\tau) = [u_{p+1}(\tau), u_{p+2}(\tau), \dots, u_n(\tau)]$ – вектори стану, а $\vec{G} = [F_1(\vec{u}), F_2(\vec{u}), \dots, F_p(\vec{u})]$, $\vec{H} = [F_{p+1}(\vec{u}, \vec{k}), F_{p+2}(\vec{u}, \vec{k}), \dots, F_n(\vec{u}, \vec{k})]$ – векторні функції для цих підсистем.

Тоді, вираз (1) можна переписати як:

$$\begin{cases} d\vec{v}(\tau)/d\tau = \vec{G}[\vec{v}(\tau), \vec{w}(\tau), \vec{k}] & [\vec{v}(\tau), \vec{w}(\tau)] \in \check{Y}^n \\ d\vec{w}(\tau)/d\tau = \vec{H}[\vec{v}(\tau), \vec{w}(\tau), \vec{k}] & \vec{k} \in \check{Y}^m \end{cases} \quad (3)$$

де $\vec{v}(\tau)$ та $\vec{w}(\tau)$ – вектори стану для першої та другої системи відповідно.

Тепер розглянемо дві ідентичні НДС, що були піддані декомпозиції згідно правила (2) та позначимо

їх 1 та 2 відповідно. Односторонній зв'язок між цими системами забезпечується вектором $\vec{v}_1(\tau)$ системи 1, який в свою чергу є керуючим, або «рушійним» сигналом для системи 2.

Вважатимемо систему 1 головною, або «ведучою» системою – вона буде зберігати свою автономність залишаючись при цьому автоколивальною. На відміну від системи 1, система 2 є розімкнутою в тому сенсі, що втрачає свою автономність за рахунок повної або часткової заміни власного вектору стану $\vec{v}_2(\tau)$ вектором $\vec{v}_1(\tau)$ системи 1, що надійшов каналом зв'язку.

Таким чином, повна синхронізація між НДС 1 та 2 описується наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} d\vec{v}_1(\tau)/d\tau = \vec{G}_1[\vec{v}_1(\tau), \vec{w}_1(\tau), k_1], & d\vec{v}_2(\tau)/d\tau = \vec{G}_2[(1-d) \cdot \vec{v}_1(\tau) + d \cdot \vec{v}_1(\tau), \vec{w}_2(\tau), k_2], \\ d\vec{w}_1(\tau)/d\tau = \vec{H}_1[\vec{v}_1(\tau), \vec{w}_1(\tau), k_1], & d\vec{w}_2(\tau)/d\tau = \vec{H}_2[(1-d) \cdot \vec{v}_1(\tau) + d \cdot \vec{v}_1(\tau), \vec{w}_2(\tau), k_2], \end{cases} \quad (4)$$

$$[\vec{w}_{1,2}(\tau), \vec{v}_{1,2}(\tau)] \in \check{Y}^n, \quad k_{1,2} \in \check{Y}^m$$

де d – коефіцієнт, що визначає ступінь зв'язку між НДС 1 та 2.

Похибка синхронізації обчислюється на основі різниці векторів $\varepsilon(\tau) = \|\vec{w}_1(\tau) - \vec{w}_2(\tau)\|$, асимптотичне зменшення якої ($\varepsilon \rightarrow 0$ при $\tau \rightarrow \infty$) свідчить про встановлення режиму повної синхронізації.

Розглянемо в якості прикладу НДС систему Чена [14, 15], яка описується трьома нелінійними диференціальними рівняннями:

$$\begin{cases} dx_1/d\tau = a(x_2 - x_1) \\ dx_2/d\tau = (c - a)x_1 - x_1x_3 + cx_2, \\ dx_3/d\tau = x_1x_2 - bx_3 \end{cases} \quad (5)$$

де a, b та c – дійсні параметри системи.

Виконаємо наступні підстановки:

$$\begin{aligned} x_i &= \mu_i V \quad (i = 1 \dots 3), \quad \tau = \mu_T t, \quad p = a - c, \\ k_1 &= a\mu_T\mu_2/\mu_1, \quad k_3 = p\mu_T\mu_1/\mu_2, \quad k_4 = \mu_T\mu_1\mu_3/\mu_2, \quad k_6 = \mu_T\mu_1\mu_2/\mu_3, \\ k_2 &= a\mu_T, \quad k_5 = c\mu_T, \quad k_7 = b\mu_T \end{aligned} \quad (6)$$

тоді система (5) може бути записана у вигляді:

$$\begin{cases} dV_1/dt = k_1V_2 - k_2V_1 \\ dV_2/dt = -k_3V_1 - k_4V_1V_3 + k_5V_2, \\ dV_3/dt = k_6V_1V_2 - k_7V_3 \end{cases} \quad (7)$$

де $k_j = 1 / (R_j C_i)$ – розмірні коефіцієнти, що можуть бути виражені через деякі ємності та опори ($j = 1 \dots 7, i = 1, 3$).

Генератора хаосу, побудований на основі НДС, яка описана у вигляді рівнянь (7), може бути реалізований у вигляді електронної схеми, наприклад, на базі операційних підсилювачів та пасивних елементів.

Проведемо імітаційне моделювання процесу односпрямованої дисипативної синхронізації між двома системами Чена, математична модель якого була представлена вище.

Пакет імітаційних моделей було реалізовано в програмному середовищі MATLAB/Simulink відповідно до математичної моделі.

Імітаційне моделювання хаотичної системи передачі

Імітаційна модель «ведучої» НДС генератора, яка представляє собою частину передавального каскаду структури передавача, зображена на рис. 1,а. Інформаційний двійковий сигнал s , що вводиться в передавальний блок, керує сигналом x , який надсилається в канал зв'язку, за допомогою комутаційного елемента (Switch – 1/0). Таким чином, режими синхронізації та десинхронізації відповідають двійковим "1" та "0" відповідно. Модель НДС приймача аналогічна до моделі НДС передавача – обидві реалізовано згідно рівнянь системи Чена (7) – за винятком розмикання останньої за вектором стану V_2 , який виступає в якості рушійного сигналу, а також схеми оцінки похибки синхронізації, згідно якої виконується виділення цифрового сигналу s' на приймальній стороні (рис. 1,б). Загальна модель запропонованої цифрової системи зв'язку показана на рис. 1,в. Система складається з НДС передавача та НДС приймача, які з'єднаних каналом зв'язку з додаванням білого шуму – Add White Gaussian Noise (AWGN). Змінна стану V_2 використовується як носій сигналу. Пройшовши через канал зв'язку, зашумлений сигнал s' надходить на вхідний порт моделі НДС приймача. Вектори стану обох систем – \vec{V} та \vec{V}' – контролюються і відслідковуються в процесі моделювання. Відповідні фазові портрети зображені на рис. 2,б,в та г.

Дисипативна синхронізація двох НДС вимагає майже повного співпадіння параметрів обох систем. Крім того, іншим дестабілізуючим фактором, що перешкоджає встановленню режиму синхронізації, є шуми в каналі зв'язку [10]. Одним з можливих методів зменшення негативного впливу цих двох факторів є керування ступенем зв'язку за рахунок підбору оптимального значення коефіцієнта підсилення в колі

зворотного зв'язку на неавтономній НДС приймача [10]. Можливий варіант реалізації такої схеми показано у вигляді моделі на рис. 2,а – як видно, у приймальній НДС реалізовано коло зворотного зв'язку з коефіцієнтом підсилення d , а вхідний сигнал проходить через підсилювач, коефіцієнт підсилення якого дорівнює $1 - d$. Таким чином, сигнал, який надходить на підсистему G_2 приймальної НДС, є сумою вхідного сигналу та сигналу зворотного зв'язку у відповідності до (4). В результаті такої модифікації контур зворотного зв'язку покращує стійкість системи передачі до дестабілізуючих факторів, зменшуючи нестабільність її та запобігаючи небажаним зривам синхронізації [10]. Значення параметра d обирається за допомогою процедури оптимізації та комп'ютерного моделювання.

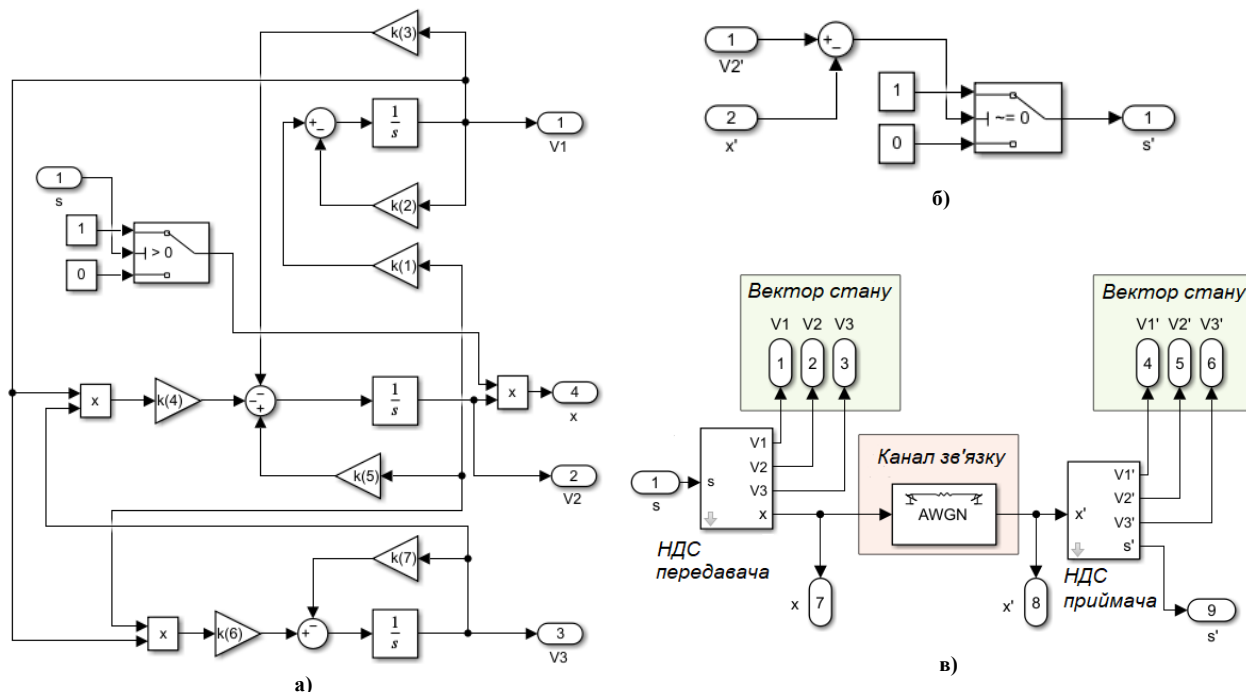


Рис. 1. Імітаційна модель хаотичної системи передачі: а) НДС генератора з уведенням цифрового сигналу; б) спрощена схема виділення інформаційного сигналу на основі оцінки похибки синхронізації; в) узагальнена схема запропонованої системи цифрового зв'язку

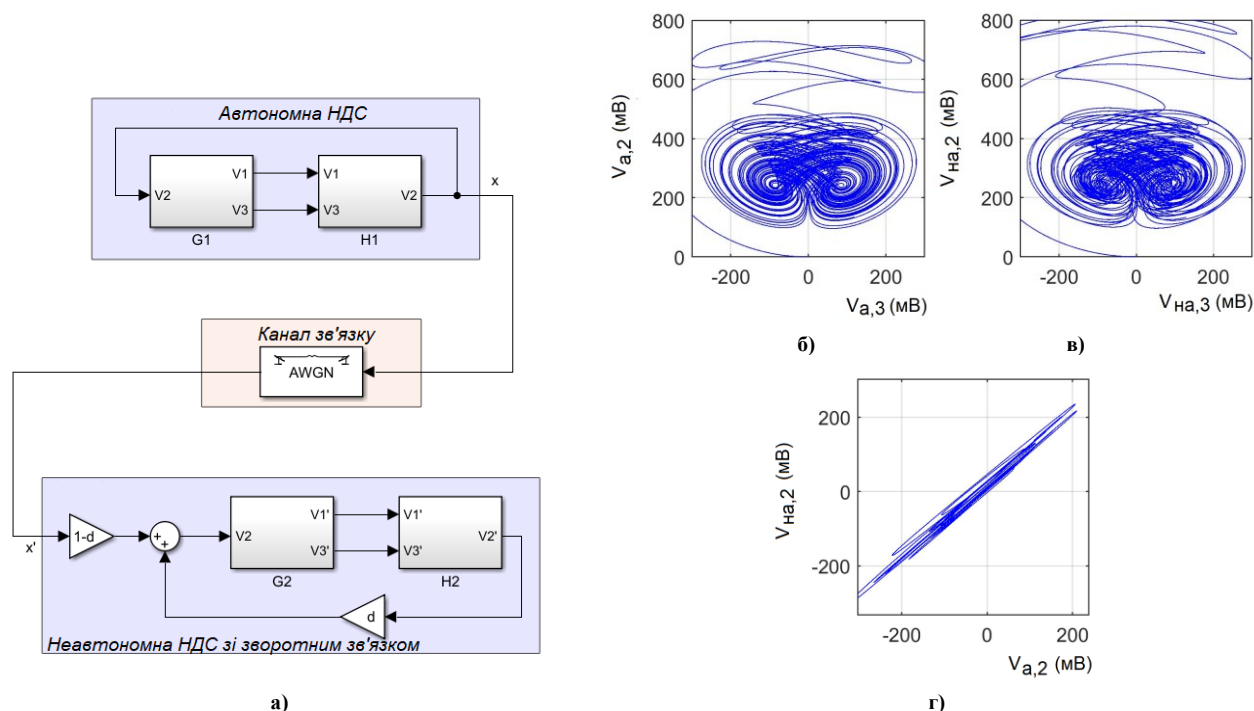


Рис. 2. Імітаційна модель хаотичної системи передачі із контуром зворотного зв'язку в НДС приймача: а) структурна схема системи; б), в) фазові портрети НДС генераторів передавача та приймача відповідно; г) оцінка синхронізації за фазовим портретом керуючого сигналу

У режимі повної синхронізації, що відповідає рівню логічної "1" цифрової системи передачі, фазовий портрет на площині $V_{a,2}-V_{na,2}$ керуючого сигналу автономної НДС $x = V_{a,2}$ і сигналу $V_{na,2}$, виробленого неавтономною НДС приймача, має вигляд прямої лінії з кутом нахилу нахилом $\alpha = 45^\circ$ (за однакових масштабів осей) – рис. 2,г. Будь-які спотворення фазового портрета спричинені нерівномірністю параметрів системи, впливом шумів або (у випадку комп'ютерного моделювання) похибками моделювання (рис. 6, в).

Висновки

Системи бездротового зв'язку, які базуються на використанні хаотичних сигналів в якості несучих для передачі інформації, характеризуються низкою переваг у порівнянні із традиційними методами зв'язку, що використовують періодичні несучі сигнали. По-перше, хаотичні сигнали – це простий та ефективний спосіб розширення спектру, який дозволяє організувати багатоканальні системи зв'язку з низькою ймовірністю перекривання каналів. По-друге, завдяки низькому енергоспоживанню електричних кіл генераторів хаотичних коливань, які є фізичними реалізаціями моделей НДС, пристрої, побудовані на їх основі, можуть працювати автономно протягом тривалого часу. Також варто відзначити, що хаотичні носії, будучи за формою та характеристиками шумоподібними і неперіодичними, забезпечують додатковий рівень кібербезпеки, приховуючи передану інформацію від третіх осіб. Останні два факти є ключовими щодо застосування в БСМ, тому в цьому дослідженні було обрано саме таку стратегію прийому-передачі для НШС систем, зокрема згідно зі стандартом IEEE 802.15.4a.

Однак для створення прототипу такого передавача необхідно вирішити низку проблем, серед яких вибір стратегії прийому та демодуляції хаотичного сигналу між когерентним та некогерентним методами; оптимізація параметрів та підвищення стійкості до дестабілізуючих факторів, таких як шуми каналу, власні шуми приймача, розкид параметрів тощо.

Комплекс імітаційних моделей, розроблених і описаних у цій роботі, буде використано в подальших дослідженнях для вирішення задачі оптимізації когерентної схеми прийому хаотичних сигналів на основі повної синхронізації НДС з метою мінімізації дестабілізуючого впливу розкиду параметрів і шумів в каналі зв'язку.

Запропонована модель хаотичної НШС системи передачі інформації буде використана для проектування та розробки недорогих енергоефективних сенсорних вузлів БСМ з метою застосування їх у сфері охорони здоров'я.

Література

1. Fraisse C., McNair J., Onofre T. B. What is a wireless sensor network? UF/IFAS Extension. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.15.4a/3571/>. – 11.03.2023.
2. Taranchuk A., Pidchenko S. Quartz pulse wave sensor with a capacitive control for healthcare solutions. IEEE Sensors Journal. 2021. Vol. 21, no. 6. P. 8613-8620. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3049065.
3. Taranchuk A. Construction of measuring piezoresonance mechanotrons and their practical implementation for telemedicine diagnostic systems. Telecommunications and Radio Engineering. 2018. Vol. 77, no. 3. P. 269-281. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v77.i3.80.
4. IEEE 802.11 – Wireless local area networks. URL: <https://www.ieee802.org/11/>. – 11.03.2023.
5. IEEE 802.15.1 Standard for information technology- Local and metropolitan area networks. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.15.1/3513/>. – 11.03.2023.
6. IEEE 802.15.4 Standard for low-rate wireless networks. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.15.4/7029/>. – 11.03.2023.
7. ZigBee – The full-stack solution for all smart devices. URL: <https://csa-iot.org/all-solutions/zigbee/>. – 11.03.2023.
8. Eroglua D., Lamb J.S.W., Pereira T. Synchronization of chaos and its applications. Contemporary Physics. 2017. Vol. 58, no. 3. P. 207-243. DOI: 10.1080/00107514.2017.1345844.
9. Sheu L.-J., Chen H.-K., Chen J. H., Tam L. M., Chen W.-Ch., Lao S.-K., Lin K. T. Complete synchronization of two Chen-Lee systems. Journal of Physics Conference Series. 2008. Vol. 96, article no. 012138. DOI: 10.1088/1742-6596/96/1/012138.
10. Golevych O., Pyvovar O., Dumenko P. Synchronization of non-linear dynamic systems under the conditions of noise action in the channel. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. 2018. Vol. 5, no. 3. P. 70-76. DOI: 10.2478/lpts-2018-0023.
11. Rebhi N., Zaibi G., Kachouri A., Charge P., Fournier-Prunaret D. Chaotic UWB communications for low rate WPAN applications. 2008 2nd International Conference on Signals, Circuits and Systems, Nabeul, Tunisia. 2008. P. 1-7. DOI: 10.1109/ICSCS.2008.4746940.
12. IEEE 802.15.4a Standard for information technology – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 15.4: Wireless medium access control and physical layer specifications for low-rate wireless personal area networks: Amendment 1: Add Alternate physical layers. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.15.4a/3571/>. – 11.03.2023.
13. Pidchenko S., Taranchuk A., Slobodian M. Chen system-based chaotic transceiver for frequency output quartz transducers. Radioelectronic and Computer Systems. 2022. No. 2. P. 178-190. DOI: 10.32620/reks.2022.2.14.
14. Chen G., Ueta T. Yet another chaotic attractor. International Journal of Bifurcation and Chaos. 1999. Vol. 9, no. 7. P. 1465-1466. DOI: 10.1142/S0218127499001024.
15. Ueta T., Chen G. Bifurcation analysis of Chen's equation. International Journal of Bifurcation and Chaos. 1999. Vol. 10, no. 8. P. 1917-1931. DOI: 10.1142/S0218127400001183.