

ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕРАТОРІВ ХАОСУ В РОЗРОБЦІ ЕЛЕКТРОННО-КОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У цій роботі представлено новий цифровий хаотичний пристрій для електронно-комунікаційної системи з частотно-модульованою хаотичною маніпуляцією зсуву, реалізований в програмованій венти́льній матриці (FPGA). Такі системи забезпечують високий рівень безпеки на фізичному рівні зв'язку та можуть бути використані в бездротових сенсорних мережах. Модифікований генератор хаосу на основі транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором та хаотична синхронізація з лінійним зворотним зв'язком за помилками реалізовані в FPGA.

Ключові слова: хаос, генератор хаосу, хаотична синхронізація, електронно-комунікаційна система, маніпуляція хаосу зсуву.

Застосування генераторів хаосу в створенні систем електронних комунікацій розглядається з початку XXI століття. Однією з основних переваг систем зв'язку, що використовують хаотичні коливання, є підвищена безпека [1]. Коли хаотичні коливання використовуються як несучий сигнал, важко виявити їхню присутність та правильно декодувати отриману інформацію, оскільки властивості хаотичного сигналу важко передбачити. Використання хаотичної синхронізації в схемах зв'язку з когерентним детектуванням ще більше збільшує рівень безпеки, бо для синхронізації та правильного прийому переданих даних на прийомному пристрої потрібно мати генератор хаосу з такими самими параметрами та конструкцією [2]. Крім того, хаотичний сигнал складно перехопити, а також він має певну стійкість до багатопроменового поширення та завад, спрямованих на порушення зв'язку [3]. Такі особливості хаотичних систем роблять їх цікавими для наукових досліджень, а також перспективними для застосування в безпечних електронно-комунікаційних системах. Існують два підходи до побудови генераторів хаосу це аналоговий та цифровий. Аналогові генератори хаосу ґрунтуються на резисторах, конденсаторах, котушках індуктивності, операційних підсилювачах, біполярних транзисторах та діодах для отримання та підтримки нелінійних коливань кола в хаотичному режимі [3-5]. Їхню хаотичну поведінку можна точно математично описати за допомогою відносно простих звичайних диференціальних рівнянь. Практичне застосування аналогових генераторів хаосу в проектуванні систем зв'язку викликає кілька проблем, таких як дрейф номінальних значень компонентів через зміни температури, відносної вологості, напруги живлення та інших умов навколишнього середовища та експлуатації. Зміни параметрів аналогового генератора хаосу під час роботи неможливо ефективно компенсувати. Такі зміни параметрів системи роблять завдання хаотичної синхронізації досить складним, оскільки вона вимагає двох генераторів хаосу з однаковими параметрами, з'єднаних разом відповідним чином. Крім того, немає можливості контролювати початкові стани змінних стану аналогового генератора хаосу. Ці проблеми спонукали знайти альтернативні способи реалізації динамічних генераторів хаосу. Одним із підходів є використання дискретної реалізації в технології програмованих венти́льних матриць (FPGA). FPGA дозволяє з певним наближенням реалізувати генератор динамічного хаосу в дискретному середовищі шляхом синтезу повністю визначеної системи, яка вільна від проблеми дрейфу компонентів і має потенціал для високої пропускну здатності та обчислювальної потужності. Крім того, FPGA дозволяє швидке, дуже гнучке прототипування з мовою опису обладнання та швидку паралельну обробку даних у реальному часі за допомогою конвеєрної обробки. Ці функції можна ефективно використовувати для розробки хаотичної системи зв'язку на основі FPGA.

Прототип системи зв'язку FM-CSK на базі FPGA, розроблений у цьому дослідженні, включає цифрову та аналогову частини. Цифрова частина реалізована на FPGA та містить модулятор FM-

CSK, демодулятор, а також блоки обробки переданих і прийнятих сигналів. Водночас передача між передавачем і приймачем є аналоговою, використовуючи цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) та аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Окрім прототипу FPGA, була розроблена верифікована математична модель цифрової частини системи зв'язку Simulink. Проаналізовано точність роботи прототипу та моделі. Виконано дослідження завадостійкості системи FM-CSK. Головною метою цього дослідження є демонстрація концепції прототипу нової хаотичної системи зв'язку, реалізованої на FPGA. Запропонована система зв'язку використовує FM-ACSK-модуляцію з хаотичною синхронізацією для передачі цифрових даних за допомогою хаотичних сигналів. Прототип системи зв'язку змодельовано в Simulink та реалізовано на платі розробки з FPGA Altera Cyclone IV. Математична модель використовується для порівняння продуктивності прототипу FPGA та її вузлів з моделюванням, що спрощує процес розробки прототипу та дозволяє перевірити поведінку кожного вузла системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Cirjulina D, Babajans R, Tjukovs S, Spinazzola E, Secco J, Vovchuk D, Pikulins D. Nonlinear Dynamics and Hybrid Synchronization of DC Biased Colpitts Chaotic Oscillators. *Electronics*. 2025; 14(20):4005. <https://doi.org/10.3390/electronics14204005>
2. Capligns F, Litvinenko A, Kolosovs D, Terauds M, Zeltins M, Pikulins D. FPGA-Based Antipodal Chaotic Shift Keying Communication System. *Electronics*. 2022; 11(12):1870. <https://doi.org/10.3390/electronics11121870>
3. Осадчук О.В., Осадчук Я.О., Скощук В.К., Петренко В.І. Генератор детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, 2025, №2. –С.240-249. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-82-33>
4. Осадчук О.В., Осадчук Я.О., Скощук В.К., Петренко В.І. Розробка генератора детермінованого хаосу на основі транзисторної структури з від'ємним опором // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології, 2025. Том 49. №1. –С.247-256. <https://oeipt.vntu.edu.ua/index.php/oeipt/article/view/777/709>
5. Осадчук О.В., Осадчук Я.О., Петренко В.І., Скощук В.К. Дослідження генератора детермінованого хаосу на основі транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором // Вчені записки ТНУ імені В.І.Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 36(75), №3 2025. –С.86-95.

Осадчук Олександр Володимирович – д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

Осадчук Ярослав Олександрович – д.т.н., доцент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: osadchuk.j93@gmail.com

Петренко Віталій Іванович – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

USE OF CHAOS GENERATORS IN THE DEVELOPMENT OF ELECTRONIC COMMUNICATION SYSTEMS

Abstract

This paper presents a new digital chaotic device for an electronic communication system with frequency-modulated chaotic shift manipulation, implemented in a field-programmable gate array (FPGA). Such systems provide a high level of security at the physical communication level and can be used in wireless sensor networks. A modified chaos generator based on a transistor structure with negative differential resistance and chaotic synchronization with linear error feedback are implemented in an FPGA.

Keywords: chaos, chaos generator, chaotic synchronization, electronic communication system, chaos shift manipulation.

Osadchuk Oleksandr Volodymyrovych - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

Osadchuk Iaroslav Oleksandrovych - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: osadchuk.j93@gmail.com

Petrenko Vitaliy Ivanovych – Postgraduate Student of the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.