УДК 621.382

О. В. Осадчук
Я. О. Осадчук
В. І. Петренко

ЕЛЕКТРОННО КОМУНІКАЦІЙНА СИСТЕМА З ЧАСТОТНО-МОДУЛЬОВАНОЮ АМПЛІТУДНО-ЦИФРОВОЮ ХАОТИЧНОЮ МАНІПУЛЯЦІЄЮ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі запропоновано електронно-комунікаційну систему частотно-модульованої амплітудно-цифрової хаотичної маніпуляції (FM-ASKCSK) яка є удосконаленням частотно-модульованої антиподальної хаотичної маніпуляції (FM-ACSK), що дозволяє покращити захист та маскування інформативного сигналу, а також енергоефективність та швидкість передачі. Детально описано математичну реалізацію аналогового генератор хаотичних сигналів на основі транзисторної структури з від'ємним диференційним опором, що дозволяє її реалізувати на FPGA. Представлено просту та відтворювану апаратну реалізацію генератора хаотичних сигналів на основі транзисторної структури з від'ємним диференційним опором на FPGA.

Ключові слова: автогенератор, детермінований хаос, транзисторна структура, від'ємний диференційний опір, генератор хаосу на FPGA.

Abstract

The paper proposes an electronic communication system of frequency-modulated amplitude-digital chaotic manipulation (FM-ASKCSK) which is an improvement of frequency-modulated antipodal chaotic manipulation (FM-ACSK), which allows to improve the protection and masking of the informative signal, as well as energy efficiency and transmission speed. The mathematical implementation of an analog chaotic signal generator based on a transistor structure with negative differential resistance is described in detail, which allows its implementation on an FPGA. A simple and reproducible hardware implementation of a chaotic signal generator based on a transistor structure with negative differential resistance on an FPGA is presented.

Keywords: oscillator, deterministic chaos, transistor structure, negative differential resistance, chaos generator on FPGA.

Різноманітні методи забезпечення безпеки необхідні для блокування несанкціонованого доступу та використання інформації яка передається через незахищені бездротові канали зв'язку. Один із методів забезпечення несанкціонованого доступу та використання інформації є широкосмуговий шумоподібний сигнал який утворюється через хаотичну систему. Сигнал детермінованого хаосу має статистичні характеристики, які є надійними та повторюваними, що дозволяє його застосовувати в системах захищеного бездротового зв'язку. Широкосмугова природа хаотичного сигналу робить його гарним носієм інформативного сигналу для систем модуляції, що дозволяє створити більш стійкі до поширення згасань по каналах зв'язку, ніж в системах на основі синусоїди [1, 2]. Одним із класів хаотичної криптосистеми для електронно-комунікаційних систем є безпечний зв'язок, який заснований на аналоговому хаосі створеному аналоговими генераторами детермінованого хаосу. Інший тип криптосистеми для електронно-комунікаційних систем безпеки може бути забезпечений шляхом синхронізації генераторів детермінованого хаосу між передавальною та приймальною системами зв'язку. Один або декілька аналогових хаотичних сигналів можуть бути керовані та передаватись через фізичний канал для досягнення синхронізації між передавачем та приймачем [3, 4].

В електронно-комунікаційних системах були розроблені декілька різних методів передачі цифрової інформації на основі хаотичних систем, включаючи хаотичну зсувну маніпуляцію (CSK), диференціальну хаотичну зсувну маніпуляцію (DCSK) та частотно-модульовану диференціальну хаотичну зсувну маніпуляцію (FM-DCSK) [5]. У даних методах модуляції цифровий інформативний сигнал на передавальному пристрої замінюється детермінованим хаотичним сигналом. Хаотична підсистема на приймальному пристрої, яка еквівалентна хаотичній підсистемі на передавачі, виконується з використанням одного з прийнятих сигналів. В останній час були досліджені досить велика кількість хаотичних систем для використання в криптосистемах електронно-комунікаційних комплексів безпечної передачі даних. Досить широка спільнота науковців працюють над розробкою надійних хаотичних систем зв'язку із вбудованою системною реалізацією на FPGA та алгоритмами

синхронізації хаотичних сигналів, а також над практичним впровадженням різних методів хаотичної модуляції [6].

Однією з головних переваг хаотичних систем зв'язку є підвищена безпека, коли хаотичні коливання використовуються як несучий сигнал, важко виявити їх присутність та декодувати інформацію, оскільки важко передбачити характеристики хаотичного сигналу. Використання хаотичної синхронізації в схемах зв'язку з когерентним детектуванням ще більше підвищує безпеку, оскільки вимагає наявності генератора хаосу з ідентичними параметрами та конструкцією на приймачі для синхронізації та демодуляції переданих бітів даних [7]. Крім того, хаотичний сигнал важко перехопити, і він має відносно добру стійкість до багатопроменевого поширення та цілеспрямованих перешкод. Ці властивості хаотичних систем роблять їх перспективними та цікавими для застосувань безпечного зв'язку в електронно-комунікаційних та радіотехнічних системах загального та спеціального призначення. Електричні схеми електронних генераторів детермінованого хаосу повинні бути достатньо простими, щоб їх можна було синхронізувати [8]. Особливістю генерування та формування сигналів детермінованого хаосу аналоговими пристроями є використання їхніх нелінійних статичних або динамічних характеристик. Простота схемних рішень генераторів детермінованого хаосу є необхідною умовою для зменшення нестабільностей в роботі електронних і оптичних приладів, які зумовлені концентрацією домішок, швидкістю рекомбінації носіїв, дефектів кристала та інші, що призводить до переходу автоколивальної системи від хаотичних коливань до стохастичних. У роботі розглянута можливість отримання хаотичного режиму в генераторі на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором реалізованої на FPGA. Нелінійна динаміка електричних коливань формується завдяки нелінійності другого порядку статичної ВАХ та нелінійного послідовного коливального кола, реактивними елементами якого є індуктивність котушки та еквівалентна ємність p-n переходу. Описуючи динамічні процеси у такому колі, потрібно врахувати, що еквівалентна ємність діода різна для додатного та від’ємного півперіодів синусоїдального коливання (відповідно дифузійна та бар’єрна ємності p-n переходу), а також те, що діод пропускає струм лише у прямому зміщенні.

Запропонована в цій статті електронно-комунікаційна система складається з двох етапів безпеки, де математично реалізовано хаотичну систему аналогового генератор хаотичних сигналів на основі транзисторної структури з від'ємним диференційним опором який використовується як основний ключ безпеки для цих двох рівнів безпеки. На першому етапі безпеки пропонується новий метод модуляції. На цьому рівні безпеки двійкові послідовності модулюються на основі хаотичного сигналу. Хаотичний сигнал використовується як носій для вихідного сигналу. Модульований сигнал передається по бездротовому каналу в гігагерцовому діапазоні. На другому етапі безпеки модуль синхронізації реалізований на FPGA використовується в приймачі для створення узгоджувального сигналу. Хаотична система, що була сформована в приймальному пристрої, потім використовується для демодуляції прийнятого сигналу і нарешті, використовуючи той самий ключ, що й на передавальному пристрої, відновлюються інформативний сигнал. На рис.1 представлено спектр передавального сигналу методом частотно-модульованої амплітудно-цифрової хаотичної маніпуляції (FM-ASKCSK) та експериментальні осцилограми прийнятого інформативного сигналу модульованого хаосом.

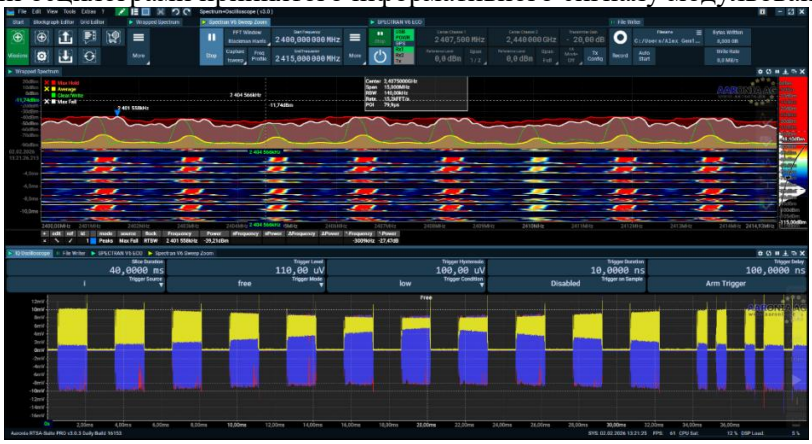


Рис.1. Спектр передавального сигналу методом частотно-модульованої амплітудно-цифрової хаотичної маніпуляції (FM-ASKCSK) та експериментальні осцилограми прийнятого інформативного сигналу модульованого хаосом

Із рис.1 видно, що спектр передавального сигналу методом частотно-модульованої амплітудно-цифрової хаотичної маніпуляції (FM-ASKCSK) з хаотичним сигналом лежить в діапазоні 2350 МГц…2500 МГц, ширина каналу складає 150 МГц, що гарно дозволяє маскувати інформативний сигнал і одночасно використовувати як засіб радіоелектронної боротьби з достатньою потужністю передавача. Діапазон частот 2300-2500 МГц застосовується для сигналів радіокерування та в стандартах ISM (Industrial, Scientific, and Medical), де використовуються різні бездротові технології. Експериментальні данні отримано за допомогою спектроаналізатора реального часу Aaronia SPECTRAN V6 ECO 100XA-6.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Mukherjee, S. New Insights Into Chaos Based Image Encryption & Its Application. *J. Math. Sci. Comput. Math.* 2023, *4*, 241–264.
2. 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, 4005.
3. Migwi, D.; Romaniuk, R.S. Lightweight and Scalable Security for Wireless IoT Systems: Challenges and Research Directions. Int. J. Electron. Telecommun. 2025, 71, 1–8.
4. Dutra e Silva Junior, É.C.; Cruz, C.A.d.M.; Saraiva, I.A.L.; Santos, F.G.; dos Santos Junior, C.R.P.; Indrusiak, L.S.; Finamore, W.A.; Glesner, M. Chaos-Based S-Boxes as a Source of Confusion in Cryptographic Primitives. *Electronics* 2025, *14*, 2198.
5. Babajans, R.; Cirjulina, D.; Kolosovs, D. Field-Programmable Gate Array-Based Chaos Oscillator Implementation for Analog–Discrete and Discrete–Analog Chaotic Synchronization Applications. *Entropy* 2025, *27*, 334.
6. Semenov, A. Osadchuk, O. Semenova, O. Baraban, S. Voznyak, O. Rudyk, A. Koval, K. (2021). Research of Dynamic Processes in the Deterministic Chaos Oscillator Based on the Colpitts Scheme and Optimization of Its Self-oscillatory System Parameters. In: Radivilova, T., Ageyev, D., Kryvinska, N. (eds) Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 48. Springer, Cham.
7. Semenov, A. Semenova, O. Osadchuk, O. Osadchuk, I. Baraban, S. Koval, K. Baraban, M. (2021). Pulse and Multifrequency Van der Pol Generators Based on Transistor Structures with Negative Differential Resistance for Infocommunication System Facilities. In: Ageyev, D., Radivilova, T., Kryvinska, N. (eds) Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 69. Springer, Cham.
8. Osadchuk O.V., Osadchuk I.O., Skoshchuk V.K., Petrenko V.I. *Deterministic chaos generator based on a bipolar field-effect transistor structure with negative differential resistance.* Measuring and computing equipment in technological processes. 2025, No. 2. –P.240-249.

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, e-mail: kaf.rt.vntu@gmail.com*

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, e-mail: kaf.rt.vntu@gmail.com*