

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет «Львівська політехніка»

**Вовчук Дмитро Анатолійович**

УДК 621.391.01

**ЕЛЕМЕНТИ ШИРОКОСМУГОВИХ ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ  
ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ ТА ПРОВІДНИКОВИХ МЕТАСТРУКТУР**

05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Політанський Леонід Францович**,  
Чернівецький національний університет  
імені Юрія Федьковича,  
завідувач кафедри радіотехніки  
та інформаційної безпеки.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Матвійчук Ярослав Миколайович**,  
Національний університет  
«Львівська політехніка»,  
професор кафедри телекомунікацій;

кандидат технічних наук, доцент  
**Пивовар Олег Сергійович**,  
Хмельницький національний університет,  
доцент кафедри радіоелектронних апаратів  
та телекомунікацій.

Захист дисертації відбудеться «17» листопада 2016 р. о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. 218 XI навчального корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий «12» жовтня 2016 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
кандидат технічних наук, доцент

І.В. Демидов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У зв'язку зі швидким розвитком мобільного зв'язку, Bluetooth та Wi-Fi технологій, зростанням кількості здійснюваних в Інтернет-просторі грошових операцій та використанням хмарних технологій для збереження даних і їх віддаленого оброблення, виникає необхідність захисту персональної інформації та даних від несанкціонованого доступу.

З цією метою використовують різні криптографічні методи захисту інформаційних потоків та аутентифікації даних із використанням, для прикладу, паролів та логінів або SMS-повідомлень для авторизації у системі. Оскільки вищезгадані методи є не достатньо ефективними, виникає необхідність у розробленні та застосуванні більш досконалих методів захисту інформації.

В останні десятиліття з метою захисту інформації було запропоновано використання псевдовипадкових і хаотичних коливань та приховування процесу її передавання. Доцільність застосування такого виду сигналів зумовлена їх подібністю до випадкових сигналів, завдяки неперервності спектру їх потужності, а також непередбачуваністю їх значень на протязі тривалих проміжків часу та експоненційно спадаючою кореляційною функцією.

Динамічні властивості систем генерування хаотичних сигналів визначаються їх чутливістю до початкових умов, що забезпечує можливість зміни режимів роботи однієї і тієї ж системи. В той же час, існують конкретні математичні моделі, що описують динаміку хаотичної системи та дозволяють визначити її стан у будь-який момент часу спостереження. Завдяки поєднанню таких властивостей, зазначені системи називають системами генерування детермінованого хаосу, що інтенсивно вивчаються дослідниками з метою їх застосування в системах прихованого зв'язку.

Розроблення систем передавання інформації на основі детермінованого хаосу є досить складним процесом, що передбачає оцінку стану сучасних систем прихованого передавання інформації, розроблення нових або модифікування існуючих систем обміну даними, підбір оптимальних генераторів хаотичних коливань, розроблення засобів телекомунікацій (провідникового та безпровідникового зв'язку), а також експериментальне дослідження ефективності функціонування запропонованих систем.

Значний вклад у дослідження властивостей генераторів детермінованого хаосу та їх застосування у радіотехнічних пристроях і засобах телекомунікацій належить Л. Чуа, А. Дмитрієву, А. Панасу, А. Храмову, Е. Єфремовій, Я.М. Матвійчуку, О.С. Пивовару, Л.О. Кириченко та іншим. Вченими запропонована низка схем, що використовують різні види синхронізації та методи модуляції інформаційного сигналу. Проте проблематика, пов'язана із розробленням нових систем зв'язку з вищим рівнем прихованості у порівнянні з існуючими, все ще залишається відкритою.

Актуальними залишаються питання удосконалення систем передавання інформації на основі повної синхронізації хаосу, оскільки вони є вразливими до впливу шумів і завад, а також характеризуються низькою швидкістю і високими значеннями потужності інформаційного сигналу, що негативно впливають на стабільність роботи систем. У процесі розроблення телекомунікаційних систем

передавання інформації, необхідно враховувати характеристики сигналів, що безпосередньо передаються у канал зв'язку.

Найбільш перспективним з точки зору забезпечення широкосмуговості сигналів для усунення можливості процесів фільтрації у каналі зв'язку, є застосування метаматеріалів та метаструктур, що дозволяє покращити процеси передавання сигналів у засобах провідникового зв'язку та підсилення малопотужних сигналів у блоках випромінювання антенних конструкцій.

**Науково-прикладним завданням**, розв'язанню якого присвячена дисертаційна робота, є розроблення способів прихованого передавання інформації з використанням явища детермінованого хаосу та елементів телекомунікаційних систем на їх основі.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася відповідно до наукового напрямку кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича та в межах науково-дослідницьких робіт: “Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв та засобів телекомунікацій і інформаційних технологій” (Держ. реєстр. №0111U000183, 2013-2015 рр.) та “Методи та засоби передавання, оброблення і зберігання інформації в інфо-комунікаційних системах ” (Держ. реєстр. №0116U001433, 2016 р.)

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розширення функціональних можливостей вузлів засобів зв'язку на основі сигналів детермінованого хаосу та провідникових метаструктур, що дає змогу покращити характеристики завадостійкості та прихованості інформації у каналі зв'язку.

Для досягнення поставленої мети, необхідно було розв'язати наступні завдання:

1. Провести аналіз сучасного стану систем прихованого передавання інформації на основі повної синхронізації хаосу. Здійснити підбір найбільш оптимального для проведення досліджень генератора хаотичних коливань.

2. Розробити спосіб прихованого передавання цифрової інформації, що дозволив би усунути більшість недоліків, притаманних існуючим системам.

3. Дослідити рівень прихованості інформації у каналі зв'язку на основі кореляційного аналізу, аналізу спектральних та статистичних характеристик.

4. Дослідити можливість підвищення швидкодії систем зв'язку та збільшення інформаційної ємності хаотичних коливань шляхом розширення спектру сигналів, генерованих схемою Чуа.

5. Дослідити процеси генерування хаотичних сигналів генератором Колпітца, як найбільш перспективним широкосмуговим генератором для захищених систем зв'язку. Здійснити модифікації генератора з метою забезпечення процесів генерування хаотичних сигналів зі статистичними і спектральними характеристиками, близькими до характеристик шумів.

6. Дослідити властивості структур з паралельно розміщених металевих провідників з метою їх використання у широкосмугових системах передавання інформації.

7. Розробити структуру на основі провідникових метасередовищ, що покращує процес широкосмугового випромінювання електромагнітних сигналів у вільний простір, з метою її використання в передавальній частині антенних систем.

*Об'єктом дослідження* є процес передавання прихованої інформації з використанням ширококутових хаотичних сигналів.

*Предметом дослідження* є математичні моделі елементів ширококутових засобів зв'язку з прихованим передаванням інформації на основі детермінованого хаосу, їх експериментальні макети та зразки провідникових метаструктур різної конфігурації.

**Методи дослідження.** У процесі дослідження математичних моделей систем передавання та оброблення даних використовувались чисельні методи Рунге-Кутта четвертого порядку, методи теорії сигналів та процесів, статистичні методи, методи нелінійної динаміки, елементи теорії електродинаміки та поширення електромагнітних хвиль у напрямних системах та середовищах з різними показниками діелектричної та магнітної проникності.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Основні результати, що визначають новизну дисертаційної роботи полягають у наступному:

- Уперше запропоновано та експериментально підтверджено можливість використання структур з паралельних провідників як напрямних середовищ для систем зв'язку з хаотичним маскуванням інформації у діапазоні частот до 12 ГГц. Уперше запропоновано і змодельовано невпорядковану провідникову структуру як антенну конструкцію та експериментально підтверджено можливість її використання для розширення діапазону робочих частот дипольного випромінювача із довжиною плеча 12,5 мм від 2 до 5 ГГц та забезпечення ширококутового випромінювання набору загасаючих ЕМ сигналів у діапазоні частот 1,08...1,46 ГГц;

- Набув подальшого розвитку метод генерування хаотичних сигналів генератором Колпітца на біполярному транзисторі, шляхом уведення додаткових реактивних елементів, що дало змогу розширити спектр генерованих сигналів до 160 МГц та покращити показники прихованості – математичного сподівання, дисперсії, асиметрії та ексцесу, що, відповідно, становили  $\mu = 0$ ,  $\sigma = 0,99$ ,  $A = 0,1$  та  $E = 0,25$ ;

- Удосконалено спосіб хаотичного маскування цифрової інформації на основі повної синхронізації хаосу, що полягає у цифровій маніпуляції гармонічного чи хаотичного сигналів з їх подальшим маскуванням. Новизну способу підтверджено патентом України на корисну модель. Це уможливило створення систем зв'язку з вищим на два порядки рівнем конфіденційності та стійкості до дії шумів і завад у каналі зв'язку, в порівнянні з існуючими схемами цифрового зв'язку на основі повної синхронізації хаосу.

**Практичне значення одержаних результатів.** При виконанні дисертаційної роботи отримані наступні практичні результати:

- Запропоновано новий спосіб хаотичного маскування цифрової інформації, в основі якого лежить модифікована схема хаотичного маскування. Системи передавання інформації з використанням запропонованого способу характеризуються вищим рівнем прихованості та стійкості до впливу шумів і завад у каналі зв'язку в порівнянні з існуючими аналогами;

- Запропоновано та реалізовано метод розширення частотної смуги хаотичних коливань генерованих схемою Чуа, що дозволяє підвищити швидкість передавання прихованої інформації;

– Модифіковано схему генератора Колпітца, що уможливило генерування хаотичних коливань зі спектром частот до 160 МГц та близькими до характеристик шумів статистичними характеристиками;

– Експериментально досліджено метаструктури, що складаються з паралельно розташованих провідників та показано можливість їх використання для передавання інформаційних сигналів у широкій смузі частот;

– Розроблено метаструктуру, основою якої є невпорядковано розміщені провідники, що характеризується задовільними результатами щодо випромінювання електромагнітних коливань у широкому діапазоні частот та є перспективною для застосування у передавальному блоці антенних систем.

Одержані результати можуть бути застосовані при розробленні систем передавання інформації на основі хаотичного маскування і кодування інформації детермінованим хаосом з високим рівнем прихованості та стійкості до впливу шумів і завад.

Представлені в дисертаційній роботі наукові та практичні результати використовуються при дослідженнях процесів збудження потужних біполярних транзисторів у комунікаційних пристроях, що базуються на ємнісній трьохточці (ОКБ «Рута»), при передаванні цифрових інформаційних сигналів у системах зв'язку (ПАТ «Укртелеком»), а також впроваджені в навчальний процес на кафедрі радіотехніки та інформаційної безпеки у Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича в рамках курсу «Системотехнічне проектування та моделювання радіоелектронних пристроїв».

Всі результати впровадження підтверджено відповідними актами.

Достовірність отриманих результатів підтверджується узгодженістю теоретичних результатів та результатів моделювання із експериментально отриманими даними.

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати дисертаційної роботи, що вказані у науковій новизні та висновках, отримані здобувачем особисто. У роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача наступний: у працях [1, 5] – автором запропоновано модифікацію схеми хаотичного маскування для прихованого передавання цифрової інформації на основі аналізу існуючих систем з використанням повної синхронізації хаосу, проведено моделювання роботи відповідної системи та у роботах [3, 5, 14] проведено експериментальні дослідження системи передавання інформації, де інформаційні біти представляються у вигляді гармонічних сигналів; у роботах [3, 5, 10-12, 14] автором запропоновано удосконалення модифікованої системи, що полягало у заміні гармонічного сигналу хаотичними коливаннями, генерованими схемою Чуа, що дозволило значно спростити конструкцію передавача та підвищити рівень прихованості інформації, що передається, проведено моделювання та експериментальні дослідження; обмеження, що повинні накладатись на значення частоти та амплітуди гармонічного коливання для забезпечення необхідного рівня прихованості та можливості безпомилкового відновлення здобувачем досліджено у [1, 3, 5, 13] та при використанні хаотичного сигналу для представлення інформаційних бітів повідомлення – у [2, 5, 10-12]; стійкість інформації до впливу шумів та завад досліджено у роботах [3- 5, 13]; у працях [1-3, 5, 10-12, 14, 17] здійснено оцінку

рівня прихованості інформації у каналі зв'язку на основі статистичного та спектрального, а у [8] – на основі кореляційного аналізу; у [16] – здобувачем запропоновано декілька модифікацій генератора Колпітца для отримання хаотичних коливань зі статистичними характеристиками, наближеними до білого гаусового шуму; у роботах [15] – запропоновано методику розширення спектральних характеристик генерованих схемою Чуа сигналів для збільшення швидкості передавання інформації та інформаційної ємності хаотичних сигналів; [1, 7, 9] – здійснено огляд та проведено дослідження процесу встановлення повної та узагальненої синхронізації; [6] – автором проведено моделювання системи, що складається з двох хвилеводів та метаструктури, що представляє собою середовище з паралельно розміщених один відносно одного провідників, розташованих між цими хвилеводами, виготовлено фізичні зразки досліджуваної структури та проведено експериментальні дослідження по покращенню проходження електромагнітних сигналів від передавача та приймача через запропоновану структуру.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційних досліджень були предметом обговорень на:

- Наукових семінарах кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича;

- Наукових семінарах літньої школи докторантів та аспірантів “Evolutionary Computing in Optimization and Data Mining (ECODAM)” у вигляді усних доповідей на теми “Digital Communication Systems with Chaotic Masking” (Iasi, Romania, 2014) та “Broadband communication systems based on deterministic chaos and wires metasructures” (Iasi, Romania, 2016);

- Наукових семінарах дослідницької групи “Theoretical and Applied Electromagnetics of Complex Media” кафедри Radio Science and Engineering (Aalto University, Espoo, Finland, 2014-2015);

- 8<sup>th</sup> International Conference on Chaotic Modeling and Simulation «CHAOS2015» (Henri Poincare Institute, Paris, France, May 26-29, 2015);

- Proceedings of the International Conference TCSET'2014 “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science” dedicated to the 170<sup>th</sup> anniversary of Lviv Polytechnic National University (Lviv-Slavske, February 25 – March 1, 2014) та XIII International Conference TCSET'2016 Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science” (Lviv-Slavske, February 23-26, 2016);

- V Міжнародній конференції молодих вчених CSE-2011 “Computer Science and Engineering” (Львів, 24-26 листопада, 2011) та 6<sup>th</sup> International Conference of Young Scientifics SCE-2013 “Computer Science and Engineering” (Lviv, November 21-23, 2013);

- III Міжнародній науково-практичній конференції PREDT-2013 “Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки” (Чернівці, 24-26 жовтня 2013).

Робота автора «Передавання інформації за допомогою маскуванню інформаційного сигналу хаотичним» отримала III місце у II турі Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузі «Радіотехніка» (Харків, 2013), а

робота «Моделювання систем передавання інформації з хаотичною носійною» визнана кращою та отримала I місце у секції «Математичне і комп'ютерне моделювання складних систем» конференції «Математичне моделювання, системний аналіз і теорія оптимальних рішень» (Харків, 2013).

**Публікації.** За результатами виконання дисертаційної роботи опубліковано 17 наукових праць: 5 робіт – у наукових фахових виданнях, серед яких 1 – у журналі, що цитується в Scopus, ще 2 – у провідних закордонних журналах та 2 – у наукових журналах, що включені до переліку наукових фахових видань МОН України; отримано 1 патент України на корисну модель; 11 праць представлено тезами конференцій, з них 10 – міжнародних, 2 з яких відбулися за кордоном.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, бібліографічного списку використаних джерел, додатку. Загальний обсяг роботи становить 149 сторінок друкарського тексту, із них 14 сторінок вступу, 106 сторінок основного тексту, 63 рисунки, 1 таблиця, список використаних джерел з 223 найменувань, 1 додаток на 4 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі проведених досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, представлені методи, об'єкт і предмет досліджень, зазначено особистий внесок здобувача, а також дані щодо публікацій за темою дисертації.

У **першому розділі** роботи – «Основні відомості побудови широкосмугових систем прихованого передавання інформації» – здійснено аналіз літературних джерел, присвячених дослідженню теоретичних та прикладних аспектів використання детермінованого хаосу в системах зв'язку, розглянуто основні види синхронізації хаотичних систем та існуючі схеми прихованого передавання інформації на основі явища повної синхронізації хаосу. Розглянуто питання щодо перспективи використання метаматеріалів для забезпечення можливості передавання сигналів у широкій смузі частот із врахуванням властивостей хаотичних сигналів.

Існує декілька видів хаотичної синхронізації хаотичних систем: повна, фазова, часового масштабування, лаг-, випереджаюча, гранична та узагальнена. Для використання хаотичних сигналів в радіотехніці запропоновано різні способи введення інформаційного сигналу в хаотичний, що базуються на явищі повної синхронізації – хаотичне маскування, нелінійне підмішування, перемикання хаотичних режимів, модуляція параметрів керування генератора передавача інформаційним сигналом. Із аналізу літератури встановлено, що вищезазначеним способам притаманні недоліки, пов'язані із низькою швидкодією обумовленою перехідними процесами, низьким рівнем стійкості інформації до впливу шумів та завад у каналі зв'язку, а також впливом інформаційного сигналу на роботу системи в цілому.

Для забезпечення якісного зв'язку з використанням систем детермінованого хаосу розглянуто питання удосконалення вузлів телекомунікаційних систем з метою усунення ефекту фільтрації у каналі зв'язку. Покращення масогабаритних



показників модулів засобів мобільного зв'язку, приймачів сигналів супутникових навігаційних систем вимагає їх інтеграції з іншими мікроелектронними пристроями. Залишається відкритим питання щодо розмірів антен, оскільки надзвичайно перспективна на протязі двох десятиліть технологія мікросмугових антен досягла свого піку відносно зменшення габаритів НВЧ-приладів. Таким чином, пошук нетрадиційних підходів до реалізації антенних конструкцій є актуальною задачею сьогодення. Перспективним в цьому напрямку є використання матеріалів з від'ємним значенням діелектричної та магнітної проникності (метаматеріалів). Їх використання як випромінювальних блоків антен розширює діапазон робочих частот. Впровадження метаматеріалів у системи телекомунікацій дозволить покращити їх масогабаритні показники шляхом мініатюризації пристроїв зв'язку та розширити можливості широкосмугових засобів передавання інформації.

На основі аналізу літературних джерел сформульовані завдання дисертаційних досліджень.

У **другому розділі** – «Модифікація схеми хаотичного маскуванню інформації для прихованого передавання цифрових сигналів» – на основі аналізу переваг та недоліків існуючих схем передавання інформації, відновлення якої в приймачі базується на встановленні режиму повної синхронізації хаосу запропонована модифікація схеми хаотичного маскуванню для прихованого цифрового зв'язку. Ідея полягає в тому, що режим синхронізації як і у схемі хаотичного маскуванню залишається неперервним, оскільки процеси перемикавання бітів безпосередньо на нього не впливають. На рис. 1 представлено модифіковану схему передавання маскованої хаотичними сигналами цифрової інформації, в якій генеровані додатковим генератором  $g(t)$  гармонічні, хаотичні чи шумові коливання маніпулюються інформаційними сигналами  $m(t)$ . При цьому, у випадку значення інформаційного біту «0» сигнал  $S(t)$  у каналі зв'язку (КЗ) відповідатиме сигналу на виході ведучого генератора  $x(t)$ , у протилежному випадку, сигнал  $S(t)$  у КЗ буде рівний сумі хаотичного сигналу  $x(t)$  та попередньо маніпульованого інформаційними бітами сигналу  $m(t)g(t)$ :

$$S(t) = x(t) + m(t)g(t) + w(t) \quad (1)$$

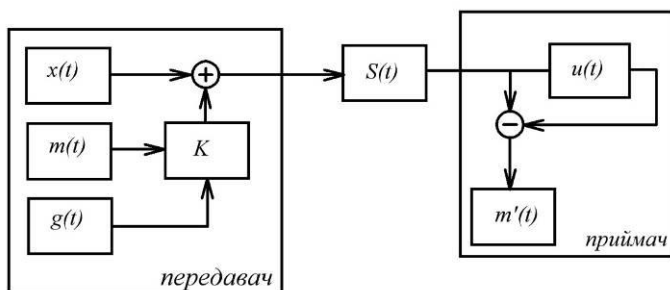


Рис.1. Модифікована схема хаотичного маскуванню для цифрового передавання інформації:  $x(t)$  – хаотичний сигнал;  $m(t)$  – інформаційний цифровий сигнал;  $g(t)$  – сигнал додаткового генератора;  $K$  – перемикач;  $S(t)$  – сигнал у КЗ;  $u(t)$  – вихідний сигнал генератора приймача;  $m'(t)$  – відновлений інформаційний

сигнал; «+» та «-» – блоки додавання та віднімання сигналів відповідно.

При дослідженнях системи прихованого передавання інформації в якості генератора хаосу використовувалась схема Чуа (рис. 2), математична модель якої описується системою із трьох нелінійних диференціальних рівнянь (2).

$$\dot{x} = \alpha(y - x - f(x)); \quad \dot{y} = x - y + z; \quad \dot{z} = -\beta y, \quad (2)$$

де  $\alpha$  та  $\beta$  – параметри системи, значення яких визначаються за співвідношеннями (3);  $x$ ,  $y$  та  $z$  – динамічні змінні системи, що відповідають значенням напруги на конденсаторах  $C_3$  та  $C_2$ , а також струму, що протікає через котушку індуктивності  $L_{екв}$  (4) відповідно;  $f(x)$  – нелінійна характеристика.

$$\alpha = \frac{C_2}{C_3}, \quad \beta = \frac{R_5^2 C_2}{L_{екв}} \quad (3);$$

$$L_{екв} = \frac{R_1 R_3 R_4 C_1}{R_2}. \quad (4)$$

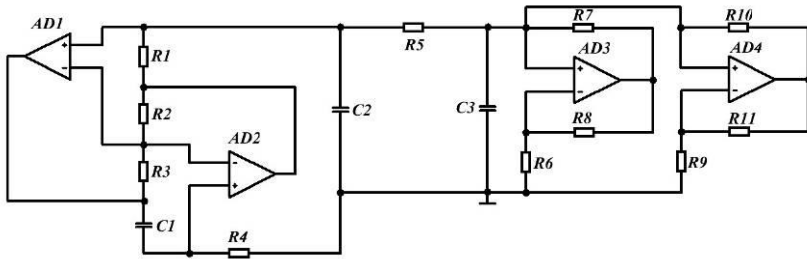


Рис. 2. Схема Чуа.

При номінальних значеннях компонентів схеми  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 1$  кОм,  $C_1 = 15$  нФ,  $C_2 = 100$  нФ,  $C_3 = 10$  нФ,  $R_5 = 1480$  Ом,  $R_6 = 2,2$  кОм,  $R_7 = R_8 = 290$  Ом,  $R_9 = 3,3$  кОм,  $R_{10} = R_{11} = 22$  кОм, схема генерує хаотичні коливання  $U_{C2}(t)$  та  $U_{C3}(t)$  (рис. 3 а та б відповідно), спектральні характеристики яких приведені на рис. 3 в та г.

Дослідження процесу встановлення режиму повної синхронізації однонаправлено зв'язаних схем Чуа показали, що розкид відповідних параметрів призводить до неспівпадання векторів стану відповідних динамічних змінних хаотичних генераторів, що взаємодіють.

Схеми електричні принципи передавача та приймача приведено на рис.4 а та б, відповідно.

У процесі дослідження генератор гармонічних коливань вибрано як додатковий, сигнали якого використовувались для подання інформаційних бітів повідомлення. Тому для вирішення задачі покращення

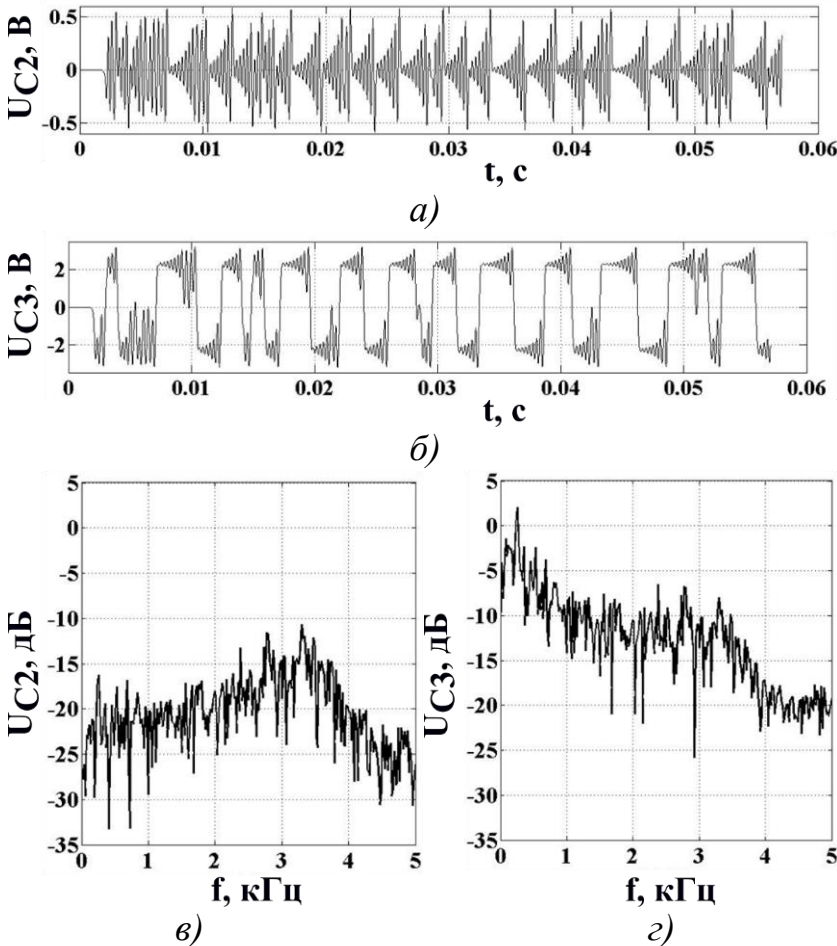


Рис. 3. Хаотичні сигнали, що формуються на конденсаторах  $C_2$  (а) та  $C_3$  (б) і їх спектральні характеристики (в) та (г) відповідно.

рівня прихованості інформації досліджувалась можливість виявлення гармонічної складової у спектрі хаотичного сигналу  $U_{C3}(t)$ . Результати моделювання показали,

що значення частоти  $f$  гармонічного коливання необхідно вибирати близькими до граничного значення частоти спектру хаотичного сигналу, а значення амплітуди  $A$  не повинні перевищувати 0,3 В.

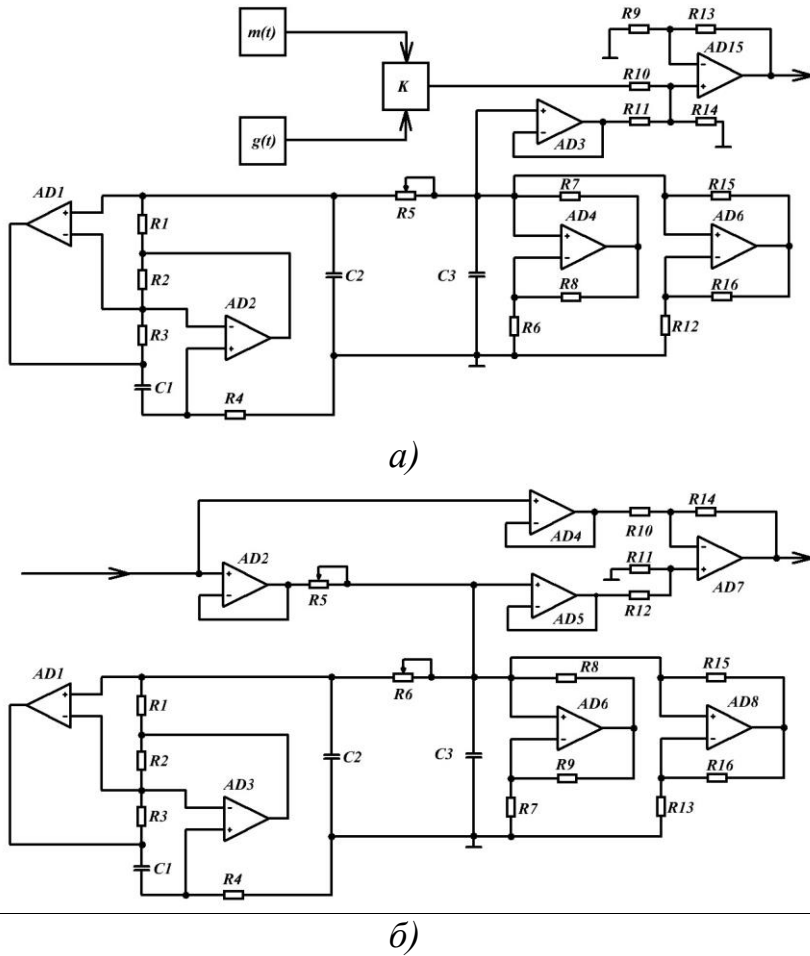


Рис. 4. Схеми електричні принципові передавача (а) та приймача (б) модифікованої системи прихованого передавання цифрової інформації

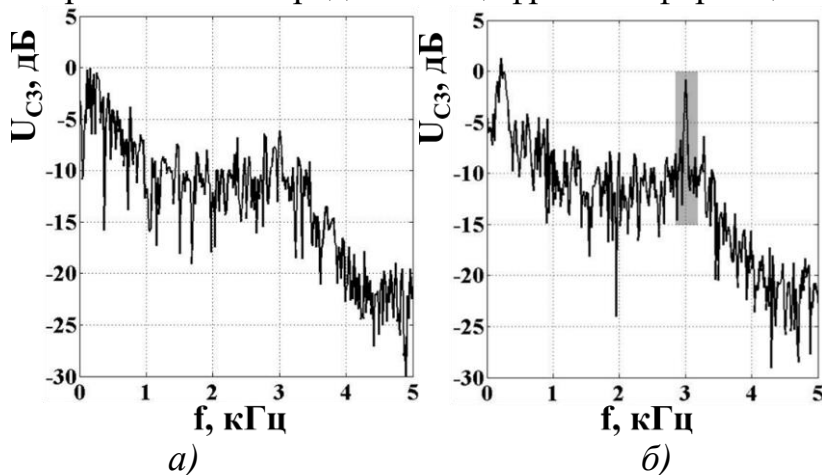


Рис. 5. Спектральні характеристики сигналів у КЗ : а)  $f = 3$  кГц та  $A = 0,3$  В; б)  $f = 3$  кГц та  $A = 1$  В.

При таких значеннях частоти та амплітуди синусоїдального коливання спектр адитивного сигналу є подібним до спектру маскувального хаотичного коливання  $U_{C3}(t)$  (рис.5 а). При збільшенні значення амплітуди синусоїдального сигналу до 1 В, гармонічна складова чітко проглядається у спектрі сигналу  $S(t)$  (рис. 5 б). Часова діаграма адитивного сигналу в каналі зв'язку при значеннях  $A=0,3$  В та  $f=3$ кГц представлена на рис.6 а, а відновлена у приймачеві послідовність цифрових бітів – на рис. 6б.

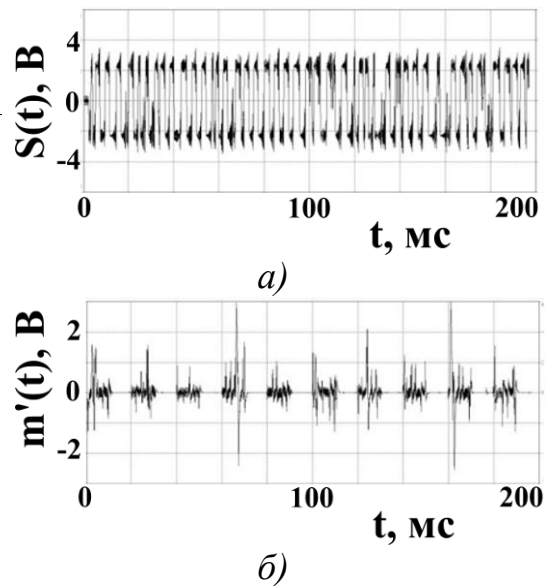


Рис. 6. Часові діаграми адитивного сигналу у каналі зв'язку (а) та відновленого сигналу у приймачі (б) при  $A = 0,3$  В  $f = 3$  кГц.

Для подання інформаційних бітів повідомлення може використовуватись хаотичне коливання. З аналізу спектральних характеристик сигналів  $U_{C2}(t)$  та  $U_{C3}(t)$

впливає, що спектр формованого на конденсаторі  $C_3$  хаотичного сигналу має більший рівень потужності та повністю перебиває спектр сигналу, формованого на конденсаторі  $C_2$  (рис. 7 а). Таким чином, для подання цифрових бітів повідомлення може бути використаний маніпульований інформаційними бітами формований на конденсаторі  $C_2$  хаотичний сигнал тієї ж схеми Чуа. Спектральна характеристика суми двох хаотичних сигналів  $U_{C_2}(t)$  та  $U_{C_3}(t)$  приведена на рис. 7 б. Схема електрична принципова передавача з поданням цифрових бітів повідомлення хаотичним сигналом  $U_{C_2}(t)$  приведена на рис. 8 відповідно.

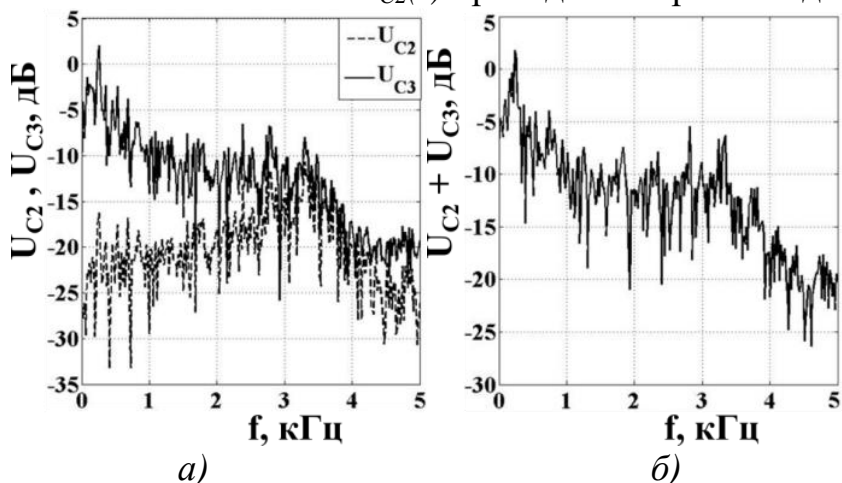


Рис. 7. Спектральні характеристики сигналів у КЗ :  
а)  $U_{C_2}(t)$  та  $U_{C_3}(t)$ ; б)  $U_{C_2}(t) + U_{C_3}(t)$ .

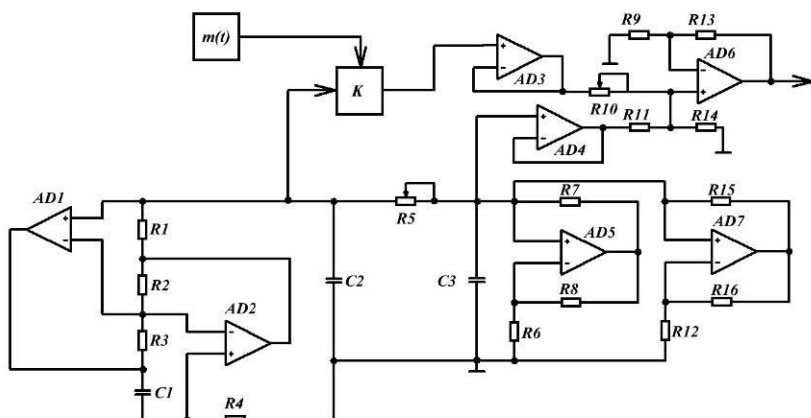


Рис. 8. Схема електрична принципова передавача модифікованої системи прихованого передавання цифрової інформації.

Аналіз розподілів густин ймовірності сигналів у каналі зв'язку показав, що адитивна суміш хаотичного  $U_{C_3}(t)$  та гармонічного сигналів (рис. 9 б) має деяку розбіжність із розподілом густини ймовірності хаотичного сигналу  $U_{C_3}(t)$  (рис. 9 а). Це вимагає більш ретельного підбору значень частот та амплітуд гармонічного сигналу. В свою чергу, розподіл густини ймовірності адитивної суміші двох хаотичних сигналів схеми

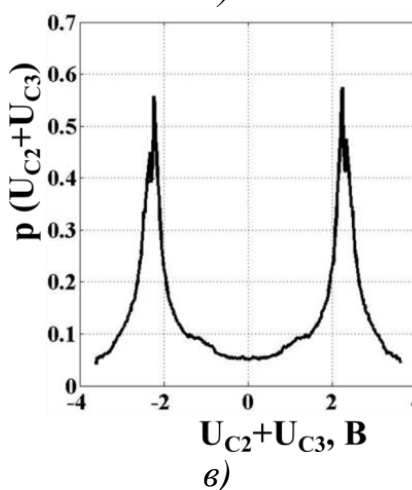
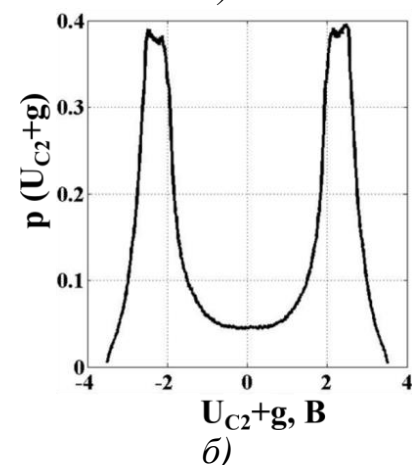
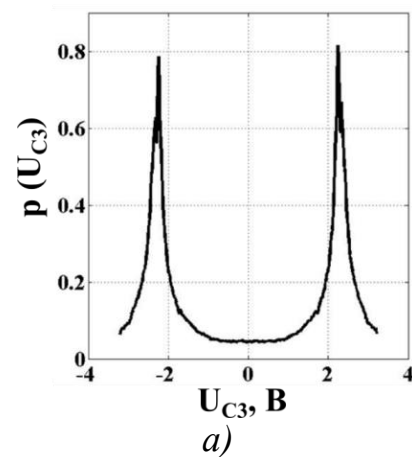


Рис. 9. Розподіл густини ймовірності сигналів: а)  $U_{C_3}$ ; б)  $U_{C_3} + A \sin(2\pi ft)$ , де  $A = 0,3\text{В}$  та  $f = 3\text{кГц}$ ; в)  $U_{C_2} + U_{C_3}$ .

Чуа (рис. 9 в) є подібним до відповідного розподілу сигналу  $U_{C3}(t)$ , чим підтверджується високий рівень прихованості інформації у каналі зв'язку.

Дослідження завадостійкості модифікованої системи показали, що при використанні гармонічного колювання для подання цифрових бітів інформаційного повідомлення значення ймовірності помилкового біту є на порядок вищим у порівнянні зі схемою перемикавання хаотичних режимів. При використанні хаотичного сигналу  $U_{C2}(t)$  схеми Чуа для подання інформаційних бітів повідомлення значення ймовірності помилкового біту є набагато меншим у порівнянні зі схемою перемикавання хаотичних режимів, починаючи зі значень співвідношень сигнал/шум більше 5 дБ.

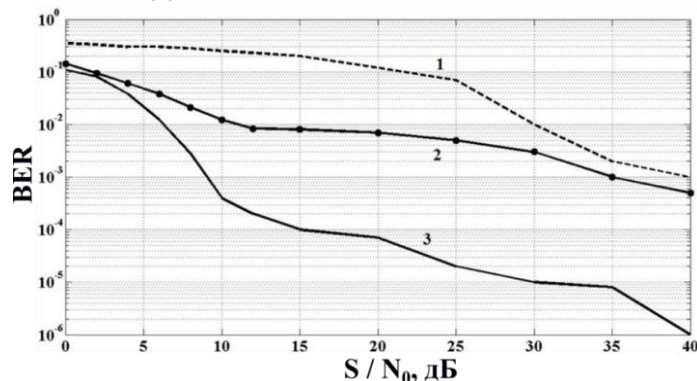


Рис. 10. Залежність ймовірності помилки від відношення сигнал/шум у каналі зв'язку: з поданням цифрових бітів повідомлення гармонічним колюванням 1); з використанням схеми перемикавання хаотичних режимів 2) та з поданням цифрових бітів повідомлення хаотичним колюванням 3).

Експериментально отримані спектральні характеристики хаотичного сигналу  $U_{C3}(t)$  схеми Чуа, його адитивної суміші із гармонічним колюванням амплітудою 0,3 В і частотою 3 кГц та хаотичним сигналом  $U_{C2}(t)$  приведені на рис. 11. Із отриманих експериментальних результатів випливає, що спектральні характеристики маскувального сигналу  $U_{C3}(t)$  та його адитивних сумішей з гармонічним та хаотичним сигналами є подібними між собою, що вказує на задовільне маскуванню процесу передавання інформації модифікованою схемою.

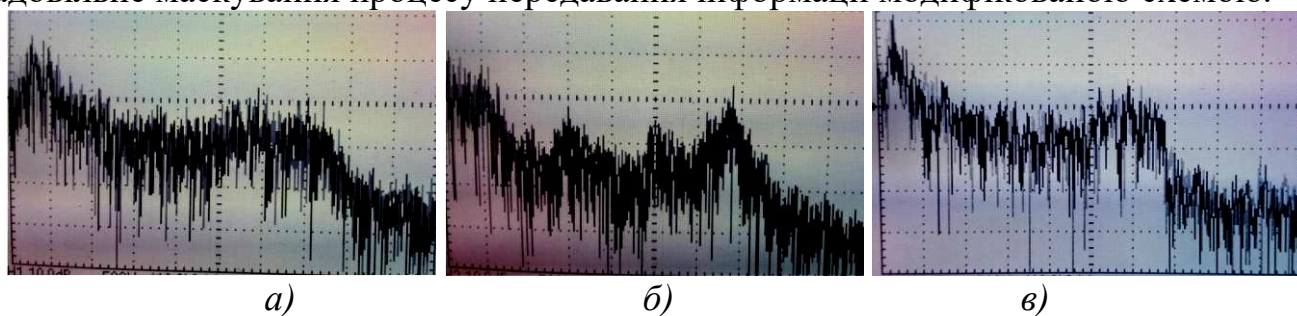


Рис. 11. Спектральні характеристики сигналів: а)  $U_{C3}$ ; б)  $U_{C3} + A \sin(2\pi f t)$ , де  $A = 0,3$  В та  $f = 3$  кГц; в)  $U_{C2} + U_{C3}$ .

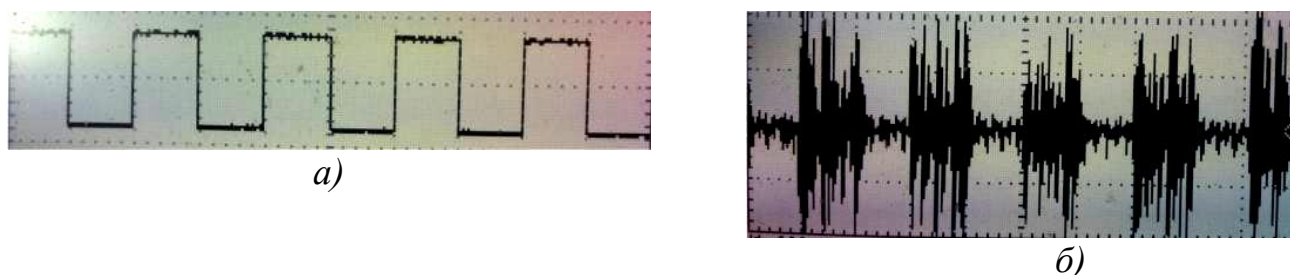


Рис. 12. Часові діаграми переданого цифрового інформаційного (а) та відновленого повідомлення у приймачі (б).

Приведені на рис. 12 часові діаграми показують можливість демаскування інформаційного повідомлення приймальною стороною в запропонованому способі цифрового зв'язку.

У третьому розділі – «Підвищення швидкості передавання інформації системи з використанням детермінованого хаосу» – розглядається можливість підвищення швидкості передавання інформації у системах зв'язку, що використовують детермінований хаос.

Поставлене завдання вирішується шляхом розширення спектру хаотичних коливань схеми Чуа за рахунок пропорційної зміни значень ємностей конденсаторів  $C_2$  та  $C_3$  і еквівалентної індуктивності  $L$  у  $k$  разів без зміни значень параметрів  $\alpha$  та  $\beta$ . За допомогою запропонованого методу в роботі експериментальним шляхом досягнутий стійкий процес генерування хаотичних сигналів  $U_{C2}(t)$  та  $U_{C3}(t)$  у смугах частот до 500 кГц та 300 кГц, відповідно (рис. 13 а, б). Слід зауважити, що максимально можливе значення ширини спектральної характеристики, становить

близько 750 кГц для сигналу  $U_{C2}(t)$  та 400 кГц для сигналу  $U_{C3}(t)$  (рис. 13 в, г), але при цьому хаотичні режими були не стійкими, що можна пояснити наявністю чотирьох чітко виражених складових. Подальше розширення спектру генерованих сигналів обмежене труднощами реалізації ємностей, значення яких є меншими 18 пФ.

Для розроблення систем передавання інформації у ВЧ діапазоні є перспективним використання генератора Колпітца на біполярному транзисторі (рис. 14 а). Дослідження показали, що статистичні характеристики генерованих ним хаотичних сигналів

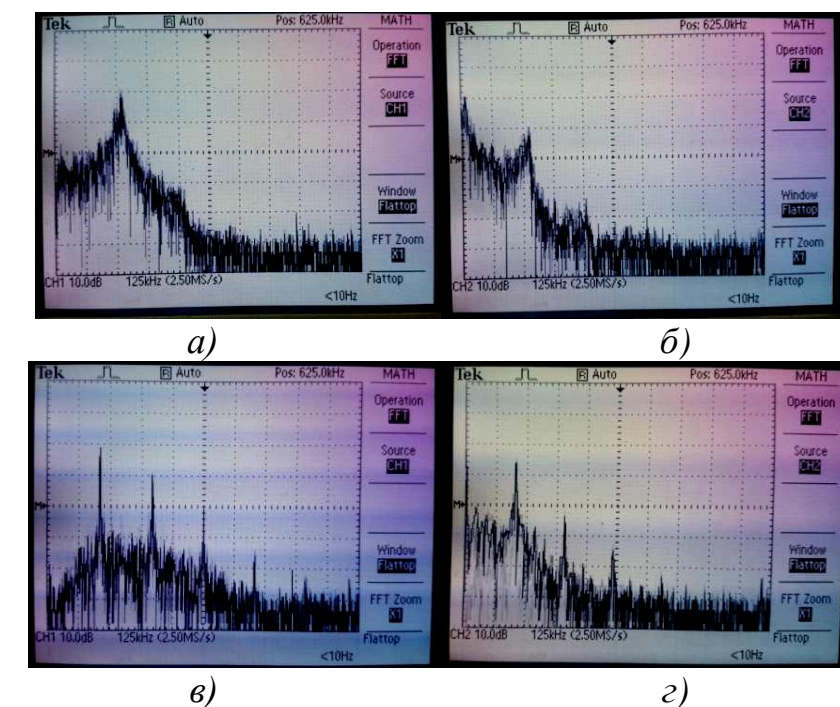


Рис. 13. Розширені спектральні характеристики хаотичних сигналів, генерованих схемою Чуа:  
а)  $U_{C2}(t)$  та б)  $U_{C3}(t)$  при  $C_2 = 660$  пФ,  $C_3 = 68$  пФ,  $L = 0,2$  мГн та  $R = 1760$  Ом; в)  $U_{C2}(t)$  та г)  $U_{C3}(t)$  при  $C_2 = 240$  пФ,  $C_3 = 18$  пФ,  $L = 0,2$  мГн та  $R = 1950$  Ом

$U_{C1}(t)$  ( $\mu = 19,43$ ;  $\sigma = 0,86$ ;  $|A| = 0,75$ ;  $|E|=3$ ),  $U_{C2}(t)$  ( $\mu = 0,07$ ;  $\sigma = 0,64$ ;  $|A| = 0,31$ ;  $|E|=0,63$ ) та  $U_L(t)$  ( $\mu = 20,1$ ;  $\sigma = 0,62$ ;  $|A| = 0,21$ ;  $|E|=3$ ) відрізняються від відповідних характеристик шумів, а спектр займає смугу частот порядку 50...100 МГц (рис. 14 б). Шляхом додавання ще одного реактивного елемента було проведено модифікацію генератора Колпітца на біполярному транзисторі (рис. 14 в) та

досягнуто розширення спектру частот до 160 МГц, а статистичні характеристики задовольняли умовам випадковості ( $\mu = 0$ ;  $\sigma = 0,99$ ;  $|A| = 0,1$ ;  $|E| = 0,25$ ).

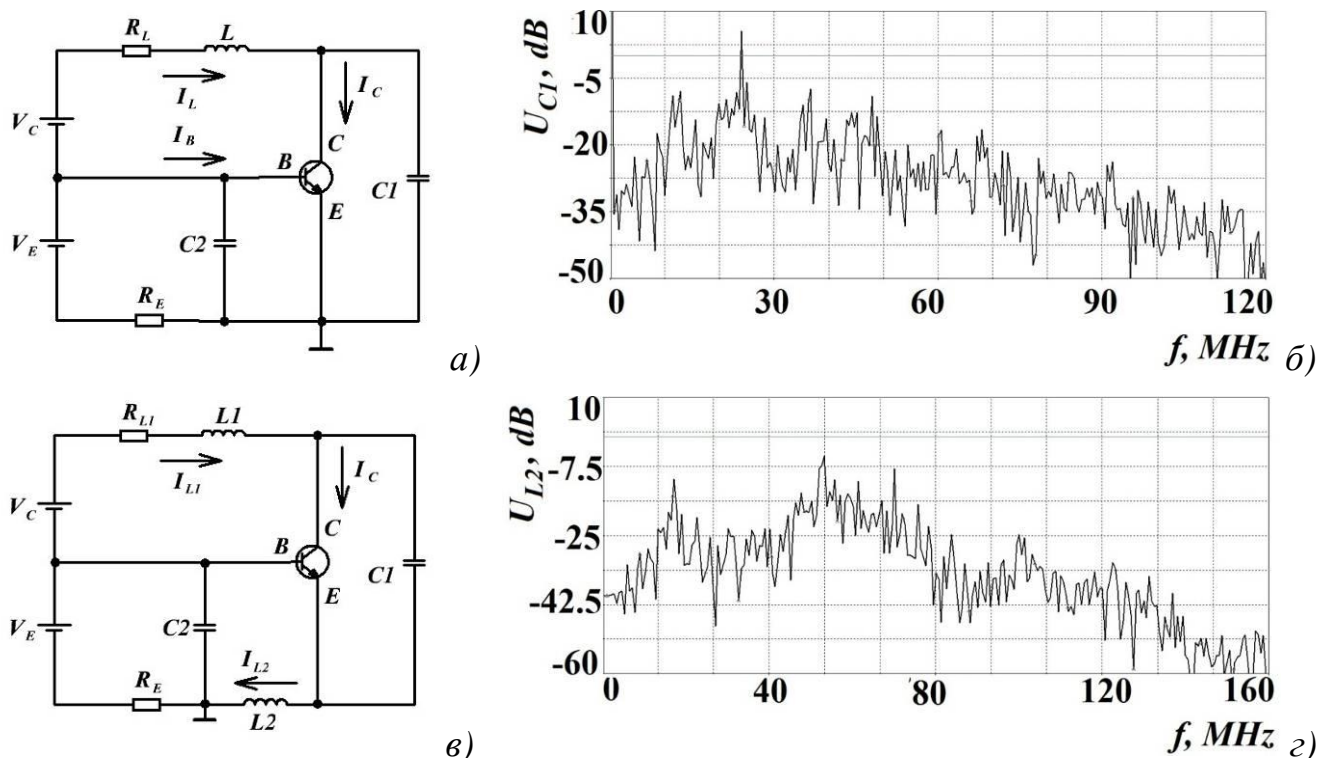


Рис. 14. Генератор Колпітца на біполярному транзисторі (а) і спектр генерованого ним хаотичного сигналу  $U_{C1}(t)$  (б) та його модифікація (в) і спектральна характеристика сигналу  $U_{L2}(t)$  (г).

У четвертому розділі – «Передавальна частина широкосмугової системи зв'язку» – досліджено штучно створені метаструктури, що характеризуються від'ємним значенням діелектричної та/або магнітної проникності, для забезпечення широкосмугового зв'язку у системі передавання інформації з унеможливленням фільтрації сигналів у каналі зв'язку, наслідком якої є погіршення якості передавання інформації. Для дослідження можливостей покращення ефективності передавання енергії електромагнітних (ЕМ) сигналів у широкому діапазоні частот було вибрано середовище, що представляє собою масив паралельно розміщених металевих провідників (СП) та характеризується низькочастотною просторовою дисперсією. У випадку розміщення джерела випромінювання перед інтерфейсом структури, ТМ-поляризовані хвилі перетворюються в ТЕМ хвилі, і, завдяки просторовій дисперсії, що зумовлює однакову групову та фазову швидкості поширення хвиль, сигнали на частоті Фабрі-Перо резонансу передаються практично без спотворень. При розміщенні джерела випромінювання (дипольного випромінювача) безпосередньо у СП структурі між провідниками резонансна частота буде придушуватися, а сам процес передавання відбуватиметься у широкій смузі частот за рахунок близькопольової взаємодії між провідниками СП зразка. Таким чином, СП метаструктура покращує ефективність випромінювання диполя на частотах, що не є кратні резонансним частотам.

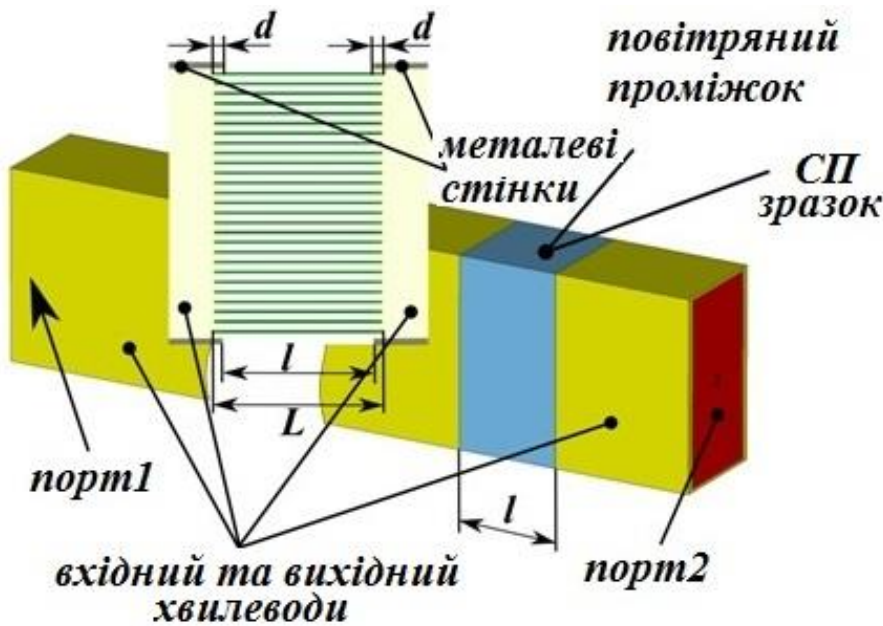


Рис. 15. Досліджувана система з двох хвильоводів для вивчення процесу передавання ЕМ сигналів через СП зразок, що міститься у проміжку довжиною  $l$  між хвильоводами.

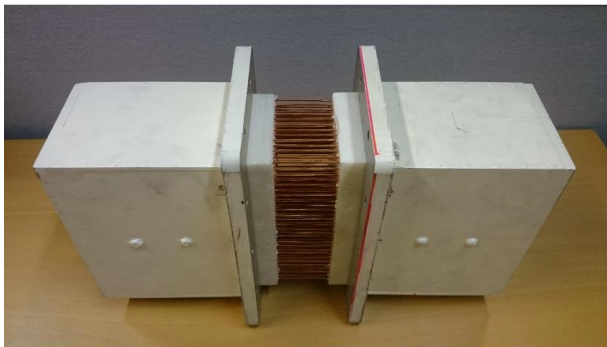


Рис. 16. Зовнішній вигляд експериментальної установки.

Для дослідження процесу широкопasmового передавання ЕМ хвиль через СП метаструктуру було вибрано розміщені на певній відстані один відносно одного два хвильоводи (рис. 15). Чисельні розрахунки та експериментальні дослідження проводились для прямокутного хвильоводу з алюмінієвими стінками розмірами  $164 \times 82$  мм (рис. 16). Дослідження проводились у одно- та багатомодовому режимах хвильоводів у діапазонах частот  $0,9 \dots 2$  ГГц та  $0,9 \dots 12$  ГГц

відповідно. Товщина мідних провідників та розмір комірки сітки в основі СП зразка становили  $1,5$  мм та  $6$  мм, відповідно. Суть досліджень полягала у порівнянні процесів передавання енергії ЕМ хвиль через проміжок між двома хвильоводами при наявності СП метаструктури та за її відсутності. Забезпечення широкопasmовості передавання відбувалось шляхом перекриття хвильоводів та СП метаструктури, ширина областей якого становила  $5$  мм з кожної сторони.

Отримані у процесі досліджень частотні залежності функції передавання  $S_{21}$  (рис. 17 а) показують покращення процесу передавання енергії сигналів з використанням СП зразка у  $2,5$  рази шляхом комп'ютерного моделювання та у  $2$  рази шляхом проведення експерименту (рис. 17 б).

Експериментальні дослідження у багатомодовому режимі роботи хвильоводів у діапазоні частот  $0,9 \dots 12$  ГГц показали середнє значення підвищення ефективності передавання ЕМ хвиль з використанням СП метаструктури у  $3,78$  разів (рис. 17 в).

Із частотної залежності фактора Парсела ( $F_P = R_{СП} / R_{ВП}$ , де  $R_{СП}$  – дійсна частина вхідного імпедансу диполя вмонтованого в СП структуру,  $R_{ВП}$  – дійсна частина вхідного імпедансу диполя при його випромінюванні у вільний простір) випливає, що використання структури з впорядкованим розміщенням провідників



(ВСП) як антени уможливорює випромінювання ЕМ сигналів тільки на частотах Фабрі-Перо резонансів (рис. 18).

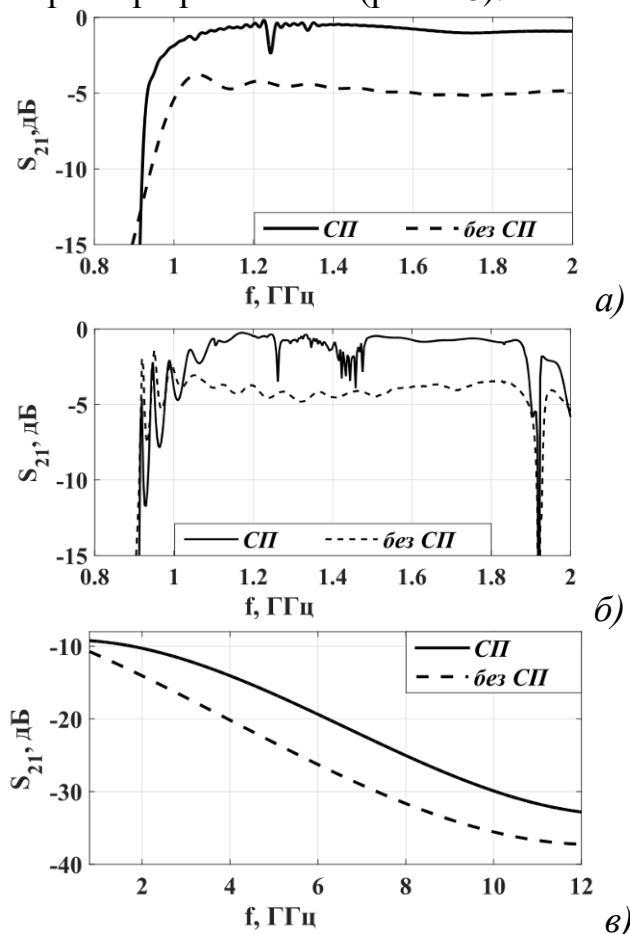


Рис. 17. Частотні характеристики функції передавання  $S_{21}$  системи хвилеводів через повітряний проміжок та СП зразок (розрахункова *а*) та експериментальна *б*) в діапазоні 0,9...2 ГГц та в діапазоні 0,9...12 ГГц (експериментальна *в*)

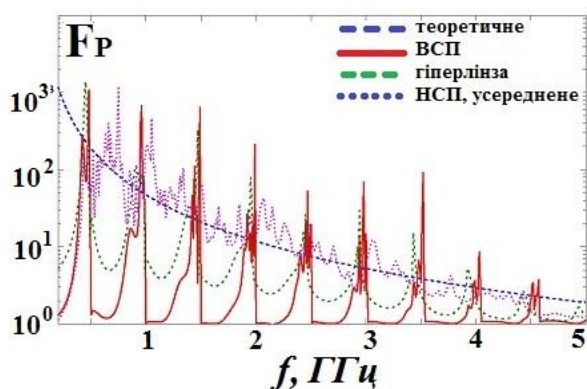


Рис. 18. Частотна залежність фактору Парсела для теоретично розрахованої ВСП нескінченної довжини, досліджуваної ВСП, гіперлінзи та НСП.

При використанні гіперлінзи (середовища з провідників, що розходяться із впорядкованою та симетричною структурою) як антенної системи, можна досягти покращення міжрезонансного випромінювання (рис. 18).

Для забезпечення випромінювання ЕМ сигналів у широкому діапазоні частот із застосуванням СП структур у антенних системах НВЧ діапазону нами було запропоновано нову конструкцію випромінювальних антен, що поєднує в собі переваги ВСП та гіперлінз (рис. 19). Ідея полягає в тому, що в запропонованій конструкції провідники мають різні довжини та кути розорієнтації відносно перпендикулярної до основи структури осі і неупорядковано розташовані у об'ємі фігури, що являє собою паралелепіпед, аналогічний ВСП структурі (НСП). Дослідження показали, що використання паралелепіпедної структури з рівними основами не впливає на ефективність широкосмугового випромінювання ЕМ хвиль у порівнянні з СП гіперлінзою.

Із отриманих результатів видно, що застосуванням НСП структури спектр фактору Парсела є неперервним та більш рівномірним у діапазоні частот 0,2...5 ГГц.

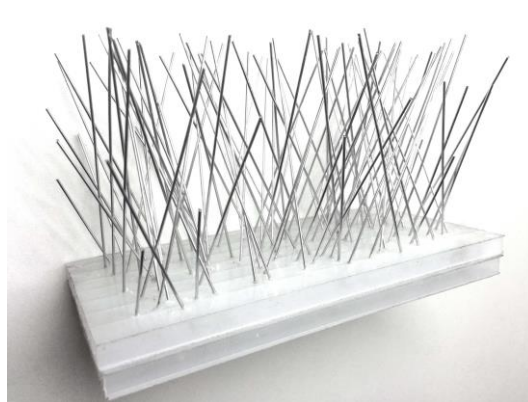


Рис.19. НСП метаструктура.

Для експериментальних досліджень фактора Парсела виготовлявся дипольний випромінювач з довжиною пліч 12,5 мм та проміжком між ними 2,5 мм (рис. 20), що розташовувався у площині перерізу паралельній основі ВСП структури на відстані 5 мм від її основи та завжди знаходився у проміжку між чотирма сусідніми провідниками, поділяючи відстань між кінцями провідників навпіл. Середнє значення величини фактору Парсела становило  $F_P^{ВСП} = 1,37$  та  $F_P^{НСП} = 2,88$  для ВСП та НСП структур відповідно. Таким чином, використання НСП структур як блоку випромінювання ЕМ хвиль є вдвічі ефективнішим у порівнянні з ВПС структурою (рис. 21).

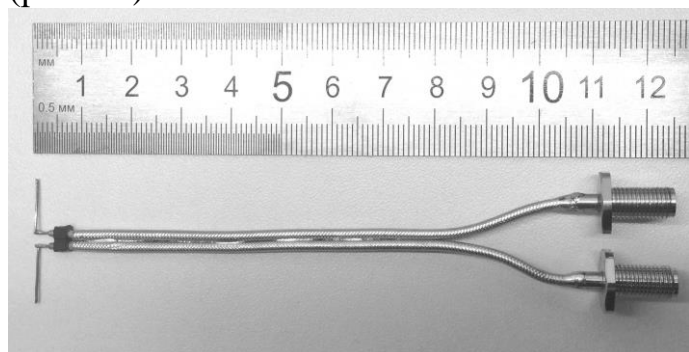


Рис. 20. Дипольний випромінювач.

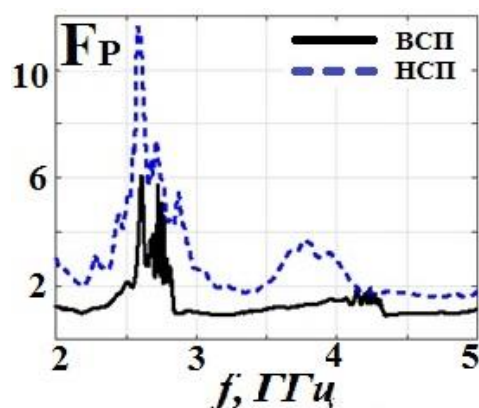


Рис. 21. Частотна залежність фактору Парсела ВСП та НСП структур для дипольного випромінювача.

Для дослідження покращення ефективності випромінювання загасаючих коливань за допомогою НСП структури як джерело сигналів використовувався хвилевід із апертурою, що навантажена індуктивною діафрагмою.

Результати досліджень показали покращення ефективності ЕМ випромінювання у діапазоні частот 1,08...1,46 ГГц, що було досягнуто шляхом використання НСП структури (рис. 22).

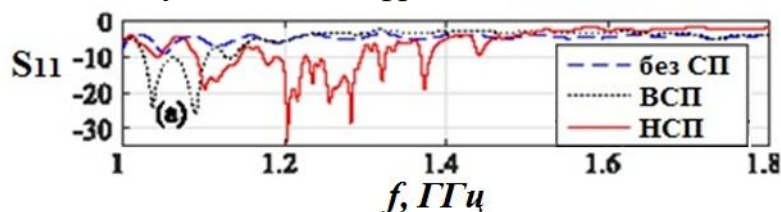


Рис. 22. Експериментально отримані частотні залежності коефіцієнтів відбивання від апертури хвилеводу з використанням ВСП та НСП метаструктур.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язано актуальне наукове завдання розроблення способів прихованого передавання інформації з використанням явища детермінованого хаосу та елементів телекомунікаційних систем на їх основі. Проведені дослідження дозволили зробити такі основні результати та висновки:

1. На основі аналізу переваг та недоліків існуючих систем з використанням повної синхронізації хаосу проведено модифікацію схеми хаотичного маскування для прихованого передавання цифрової даних. Модифікована схема характеризується підвищеною стійкістю до впливу шумів та завад у порівнянні з існуючими схемами хаотичного маскування за рахунок передавання інформації у цифровому вигляді. Оскільки синхронізація встановлюється одноразово на початку

передавання та підтримується безперервно на протязі всього сеансу ведучим генератором передавача, то швидкість передавання модифікованої схеми є більшою у порівнянні з використанням схеми перемикачів хаотичних режимів.

2. Запропоновано два варіанти схем передавання: з поданням інформаційних бітів синусоїдальними та хаотичними сигналами відповідно. Використання другого варіанту є конструктивно вигіднішим за рахунок зменшення масогабаритних розмірів схеми передавача, що забезпечується можливістю ефективного використання обох хаотичних сигналів схеми Чуа.

3. За результатами аналізу спектральних та статистичних характеристик проведена оцінка допустимих значень амплітуди та частоти гармонічного сигналу і потужності хаотичних коливань, що використовуються для подання інформаційних бітів повідомлення. Показано, що система ефективно працює при значеннях співвідношень потужностей маскувального та гармонічного/хаотичного сигналів не менше 18 дБ та при значеннях частоти гармонічного сигналу близьких до верхньої частоти маскувального хаотичного коливання.

4. Оцінки коефіцієнту кореляції адитивних сигналів та сигналів, що використовуються для подання інформаційних бітів повідомлення, а також розподілів їх густин ймовірності показали задовільний рівень прихованості інформації у каналі зв'язку модифікованої схеми передавання.

5. Дослідження завадостійкості модифікованої системи зв'язку показали, що використання хаотичного сигналу для представлення інформаційних бітів повідомлення забезпечує набагато менше значення ймовірності помилкового біту в порівнянні із схемою перемикачів хаотичних режимів, починаючи зі значень співвідношень сигнал/шум більше 5 дБ.

6. Запропоновано та експериментально реалізовано модифікацію схеми Чуа шляхом пропорційної зміни значень ємностей та індуктивності елементів схеми, що забезпечує розширення спектральних характеристик генерованих нею хаотичних сигналів до 700 кГц.

7. Проведено модифікацію генератора Колпітца на біполярному транзисторі шляхом додавання ще одного реактивного елементу, що забезпечує генерування хаотичних сигналів у діапазоні частот до 160 МГц зі статистичними характеристиками – математичним сподіванням, дисперсією, асиметрією та ексцесом ( $\mu = 0$ ,  $\sigma = 0,99$ ,  $A = 0,1$  та  $E = 0,25$ ), що є близькими до відповідних характеристик шумів.

8. Запропоновано використання метаструктури з паралельно розміщених металевих провідників для покращення ефективності передавання ЕМ сигналів у широкому діапазоні частот. Шляхом комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень показано, що запропонована метаструктура дозволяє покращити ефективність передавання сигналів між хвилеводами у 2 та 3,78 рази у діапазонах частот 0,9...2 ГГц (одномодовий режим роботи хвилеводів) та 0,9...12 ГГц (багатомодовий режим роботи хвилеводів), відповідно.

9. Запропоновано та експериментально реалізовано метаструктуру з невпорядковано розміщених провідників, що може бути використана у передавальній частині антенних систем. Експериментально встановлено, що запропонована структура дозволяє розширити діапазон робочих частот дипольного випромінювача із довжиною плеча 12,5 мм від 2 до 5 ГГц та забезпечує широкосмугове випромінювання набору затухаючих ЕМ сигналів у діапазоні частот

1,08...1,46 ГГц. Це уможливило її використання у системах зв'язку, що функціонують у широкому діапазоні частот.

### СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Вовчук Д.А. Адаптація методу хаотичного маскування для цифрового передавання інформації / Д.А. Вовчук, С.Д. Галюк, Л.Ф. Політанський // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – № 2/4(62). – С.50-55.
2. Вовчук Д.А. Моделювання системи передавання цифрової інформації з допомогою хаотичного маскування / Д.А. Вовчук // Технологічний аудит і резерви виробництва. - 2013. - №5/5(13). - С.55-57.
3. Vovchuk D.A. Experimental Research of the Process of Masking of Digital Information Signals Using Chaotic Oscillations / D.A. Vovchuk, L.F. Politanskii, S.D. Haliuk // Eastern European Scientific Journal. – 2014. – №3. – P. 245-253.
4. Kushnir M. Computer Modeling of Information Properties of Deterministic Chaos / M. Kushnir, S. Galiuk, V. Rysun, G. Kosovan, D. Vovchuk // Chaotic Modeling and Simulation. - 2015. – №2, P. 117-128.
5. Патент України на корисну модель UA97300U, МПК H04L 9/24 (2006.01) Спосіб прихованого передавання цифрової інформації з використанням хаотичного маскування / Д.А. Вовчук, С.Д. Галюк, Л.Ф. Політанський – власник Чернівецький національний університет ім. Ю.Федьковича. – №u20140952; заявка 01.09.2014; опубл. 10.03.2015, Бюл. №5.
6. Vovchuk D. Multi-Mode Broadband Power Transfer through a Wire Medium Slab / D. Vovchuk, S. Kosulnikov, I. Nefedov, S. Tretyakov, C. Simovski // Progress In Electromagnetics Research. – 2015. – Vol.154. – P. 171-180.
7. Галюк С. Використання режиму узагальненої синхронізації при прихованій передачі інформації / С. Галюк, М. Кушнір, Д. Вовчук // Матеріали V Міжнародної конференції молодих вчених «CSE-2011». – Львів, 24-26 листопада 2011: тези доповіді – С. 300-303.
8. Вовчук Д.А. Кореляційні властивості хаотичних символічних послідовностей / Д.А. Вовчук, С.Д. Галюк // Матеріали V Міжнародної молодіжної науково-технічної конференції «РТ-2012». – Севастополь, 2012.: тези доповіді – С. 58.
9. Вовчук Д. Синхронізація неідентичних кільцевих генераторів хаосу / Д. Вовчук // Матеріали студентської конференції ЧНУ ім. Ю. Федьковича, Чернівці, 2012.: тези доповіді – С. 12-13.
10. Vovchuk D. MatLab-Simulink Model of the Digital Data Trasmision with the Use of Chaotik Masking / D.Vovchuk, S. Haliuk, L. Politanskii, N. Ivanyshyn // Proceeding of the 6<sup>th</sup> International Conference of Young Scientists «CSE-2013». – Lviv, 2013.: thesis – P. 66-67.
11. Політанський Л.Ф. Маскування інформації з використанням модуляції хаотичного сигналу цифровим / Л.Ф. Політанський, Д.А. Вовчук, С.Д. Галюк // Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «PREDT-2013». – Чернівці, 2013: тези доповіді – С. 82-83.
12. Вовчук Д.А. Моделювання систем передавання цифрової інформації з хаотичною носійною / Д.А. Вовчук // Матеріали 17-го Міжнародного молодіжного форуму «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». – Харків, 2013.: тези доповіді – Т.7. – С. 106-107.

13. Kushnir M. Computer Modeling of Information Properties of Deterministic Chaos / M. Kushnir, S. Galiuk, V. Rysun, G. Kosovan, D. Vovchuk // Proceeding of the 7<sup>th</sup> International Conference on Chaotic Modeling and Simulation «CHAOS2014». – Lisbon, Portugal, 7-10 June 2014.: thesis – P. 265-276.

14. Vovchuk D. Experimental Research of Digital Communication Systems with Chaotic Masking / D. Vovchuk, S. Galiuk, L. Politanskii // Proceeding of the International Conference «TCSET'2014». – 2014, Lviv-Slavske.: thesis – P. 473-474.

15. Vovchuk D.A. The Spreading of Signals' Spectrum of Chua's Circuit / D. Vovchuk, S. Galiuk, L. Politanskii // Proceeding of the 4<sup>th</sup> International Scientific-Practical Conference «PREDT-2014». – 2014.: thesis – Chernivtsi. – P. 78-79.

16. Kushnir M. Information Security of the Chaotic Communication Systems / M. Kushnir, P. Ivanyuk, D. Vovchuk, S. Galyuk // Proceeding of the 8<sup>th</sup> International Conference on Chaotic Modeling and Simulation «CHAOS2015». – 26-29 May 2015, Henri Poincare Institute, Paris, France.: thesis – P. 353-364.

17. Vovchuk D. The Parameters Hiding Estimation of Chaotic Communication Systems / D. Vovchuk // Proceeding of the International Conference «TCSET'2016». – 2016, Lviv-Slavske.: thesis – P. 40-43.

## АНОТАЦІЯ

**Вовчук Д.А. Елементи широкопasmових засобів зв'язку на основі детермінованого хаосу та провідникових метаструктур.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій. – Національний університет “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України, Львів, 2016.

Дисертацію присвячено дослідженню питань розширення функціональних можливостей вузлів засобів зв'язку на основі сигналів детермінованого хаосу та провідникових метаструктур, що дає змогу покращити характеристики завадостійкості та прихованості інформації у каналі зв'язку.

У дисертаційній роботі, на основі аналізу переваг та недоліків існуючих схем передавання, що базуються на явищі повної синхронізації хаосу удосконалено схему хаотичного маскування для прихованого передавання цифрових даних, а також здійснено оцінку рівня прихованості інформації у каналі зв'язку. Проведені заходи щодо розширення спектру генерованих схемою Чуа сигналів для збільшення швидкості передавання інформації та здійснено модифікацію генератора Колпітца на біполярному транзисторі з метою отримання хаотичних сигналів зі спектральними і статистичними характеристиками подібними до відповідних характеристик шумів.

Для забезпечення якісного зв'язку між передавачем та приймачем системи прихованого передавання на основі детермінованого хаосу, вперше було запропоновано використання штучно створених середовищ із паралельно розміщених один відносно одного провідників для передавання сигналів у широкому діапазоні частот 0,9...12 ГГц, а також вперше запропоновано та досліджено структуру із невпорядковано розміщених провідників для створення антенних систем, що функціонують у широкому діапазоні частот та розширено діапазон робочих частот дипольного випромінювача із довжиною плеча 12,5 мм від 2 до 5 ГГц та уможливлено широкопasmове випромінювання множини затухаючих

ЕМ сигналів у діапазоні частот 1,08...1,46 ГГц. Це дозволяє їх застосування у системах зв'язку, що функціонують у широкому діапазоні частот.

Отримані в дисертаційній роботі результати можна використовувати для побудови генераторів шуму, при конструюванні широкосмугових систем зв'язку з високим рівнем прихованості та стійкості до впливу шумів та завад, а також при конструюванні антен для багатокористувацьких мереж зв'язку.

*Ключові слова:* детермінований хаос, хаотичне маскування, прихований зв'язок, схема Чуа, генератор Колпітца, метаструктура, комунікації, антена.

## АННОТАЦИЯ

**Вовчук Д.А. Элементы широкополосных средств связи на основе детерминированного хаоса и проводниковых метаструктур.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.13 – радиотехнические устройства и средства телекоммуникаций. – Национальный университет “Львівська політехніка” Министерства науки и образования Украины, Львов, 2016.

Диссертация посвящена исследованию вопросов расширения функциональных возможностей узлов средств связи на базе сигналов детерминированного хаоса и проводниковых метаструктур, что позволяет улучшить характеристики помехоустойчивости и скрытности информации в канале связи.

В диссертационной работе, на базе анализа преимуществ и недостатков существующих схем связи на основе полной синхронизации хаоса, усовершенствована схема хаотического маскирования для скрытной передачи цифровых данных, а также произведена оценка уровня скрытности информации в канале связи. Осуществлены меры по расширению спектра генерируемых схемой Чуа сигналов для повышения быстродействия системы и проведена модификация генератора Колпитца на биполярном транзисторе с целью получения хаотических сигналов со спектральными и статистическими характеристиками, близкими к соответствующим характеристикам шумов.

Для обеспечения качественной связи между передатчиком и приемником системы скрытой передачи информации на основе детерминированного хаоса, впервые предложено использование искусственно созданных сред из параллельно размещенных между собой проводников для передачи сигналов у широкой полосе частот 0,9...12 ГГц, а также впервые предложена и исследована структура из неупорядочено расположенных проводников для создания антенных систем, которые функционируют в широкой полосе частот, и расширен диапазон рабочих частот дипольного излучателя с длиной плеча 12,5 мм от 2 до 5 ГГц, что также сделало возможным широкополосное излучение множества затухающих электромагнитных волн в диапазоне 1,1...1,5 ГГц. Это позволяет их использовать в системах связи, которые функционируют в широкой полосе частот.

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы для построения генераторов шумов, при конструировании широкополосных систем связи с высоким уровнем скрытности и стойкости к влиянию шумов и помех, а также в процессе конструирования антенн для многопользовательских систем связи.

*Ключевые слова:* детерминированный хаос, хаотическое маскирование, скрытая связь, схема Чуа, генератор Колпитца, метаструктура, коммуникации, антенна.

## ABSTRACT

**Vovchuk D.A. Components of broadband communication means based on deterministic chaos and wire metastructures.** – On the rights of the manuscript.

The thesis submitted in fulfillment of the Ph.D. degree in technical sciences on specialty 05.12.13 – Radio Engineering Devices and Telecommunication Means. – Lviv Polytechnic National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2016.

Ph.D. thesis addresses the important scientific problem of expanding of functional abilities of communication system nodes using deterministic chaos signals and wire metastructures that allows improving the characteristics of noise immunity and information secrecy in the communication channel.

Author has improved the chaotic masking scheme for hidden digital communication based on an analysis of advantageous and disadvantageous of existing schemes that operate on full synchronization phenomenon. The hiding information degree in the channel has been estimated. The thesis provides measures to increase the information rate by the spectrum spreading of Chua's scheme. To obtain of chaotic signals characterized by the similar statistical properties as noise ones the Colpitts oscillator was modified.

The artificially constructed media that consists of the parallel wires to transfer broadband signals in the frequency range 0.9...12 GHz was proposed for the first time to ensure the quality connection between transmitter and receiver of hidden communication system based on deterministic chaos. The article is the first attempt to investigate the irregular wire structure for designing antennas that allows extending the frequency range of dipole antenna with arm length 12.5 mm from 2 to 5 GHz and the electromagnetic wave radiation in the wide frequency range 1.08 to 1.46 GHz was highlighted. It allows their implementation to broadband communication systems.

The obtained results can be recommended to construct noise generators and to develop broadband communication systems that are characterized by high secrecy and noise protection degree in the channel as well as to design the multi-users network communications.

*Key words:* deterministic chaos, chaotic masking, hidden communication, Chua's scheme, Colpitts oscillator, metastructure, antenna.

Підписано до друку 10.09.2016. Формат 60 x 84/16.

Папір офсетний. Друк різнографічний. Ум.-друк. арк. 0,9.

Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100. Зам. А-011.

Видавництво та друкарня Чернівецького національного університету  
58002, Чернівці, вул. Коцюбинського, 2

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №891 від 08.04.2002 р.

