Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

ТОПОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ
ОПТИЧНИХ СИГНАЛІВ
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи ЛОЕТм-18-1
Пуляєв Ю.С.
(прізвище, ініціали)
Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо -наукова)
Освітня програма «Лазерна і оптоелектронна техніка»
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. ФОЕТ Курський Ю. С.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____ Мачехін Ю. П.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2020 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)
Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма «Лазерна і оптоелектронна техніка»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри _____
(підпис)
«____»_____20 ___ р.

ЗАВДАННЯ
НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Пуляєву Юрію Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Топологічний аналіз оптичних сигналів

затверджена наказом по університету від "15" квітня 20 20 р. № 500 Ст
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 22 червня 2020 р.
3. Вихідні дані до роботи $\lambda = 420$ нм, $D_1 = 1{,}2618$, $D_2 = 1{,}5849$

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 1 Дослідити розвиток методів топологічного аналіза оптичної сигналів. 2 Практичне застосування хаотичної теорії. 3 Дослідження хаотичних методів шифрування в хаосі. 4 Створення лабораторної схеми дослідження лазерного випромінювання.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

Склад. кресленик – Система дослідження фрактальної структури оптичного сигналу – А4.
Кресленик деталі коліматор– А4 – 1 шт.
Кресленик деталі двохлінзовий об'єктив – А4 – 1шт.
Кресленик деталі ПЗС-камера – А4 – 1шт.
Демонстраційний матеріал – 9 шт.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел з хаотичної теорії	16.04.20 – 25.04.20	Виконано
2	Дослідження теорії хаос зв'язку	26.04.20 – 11.05.20	Виконано
3	Виконання моделювання схем зв'язку	12.05.20 – 21.05.20	Виконано
4	Порівняння характеристик різних структур	22.05.20 – 31.05.20	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	01.06.20 – 10.06.20	Виконано
6	Оформлення графічних та демонстраційних матеріалів	11.06.20 – 14.06.20	Виконано
7	Проходження нормо контролю і отримання рецензіїї	15.06.20 – 21.06.20	Виконано
8	Підготовка та захист атестаційної роботи	22.06.20 – 24.06.20	

Дата видачі завдання 15 квітня 2020 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. каф. ФОЕТ Курський Ю.С.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка атестаційної роботи: 71 с., 24 рис., 1 табл., 2 додатки, 30 джерел.

ТОПОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ОПТИЧНИХ СИГНАЛІВ, ХАОС В ОПТИЧНОМУ ЗВ'ЯЗКУ, СИНХРОНІЗАЦІЯ ХАОСУ, ФРАКТАЛЬНА РОЗМІРНІСТЬ, СЕРВЕТКА СЕРПІНСЬКОГО, ПЗС КАМЕРА.

Об’єкт дослідження – система дослідження фрактальної структури оптичного сигналу яка містить, послідовно встановлений і оптично узгоджений джерело когерентного випромінювання, пристрій введення випромінювання, колімуючу лінзу, приймальний об'єктів, ПЗС-камеру.

Мета роботи – дослідити розвиток методів топологічних сигналів.

Метод дослідження – теоретичний та практичний.

У роботі були розглянуті та проаналізовані способи шифрування даних хаосу яке забезпечує додатковий ступінь безпеки в системах з програмним захистом, також знайдене рішення визначаюче ефективність відновлення даних між авторизованими та неавторизованими користувачами.

Розглянуто фізичні і практичні реалізації фотонних систем, які об'єднують дослідження топології з нелінійною оптикою. Була зображена схема лазерної установки для дослідження та вимірювання параметрів випромінювання лазера.

ABSTRACT

Explanatory note of certification work: 71 pages, 24 pictures, 1 tab, 2 application, 30 sources.

TOPOLOGICAL ANALYSIS OF OPTICAL SIGNALS, CHAOS IN OPTICAL COMMUNICATION, CHAOS SYNCHRONIZATION, FRACTAL DIMENSION, SERPINSKY Napkin, CCD CAMERA.

Object of study - a system for studying the fractal structure of an optical signal containing a sequentially installed and optically matched source of coherent radiation, an input device for radiation that collimates the lens, a receiving object, and a CCD camera.

The aim of the work is to investigate the development of topological signal methods.

The research method is theoretical and practical.

The work examined and analyzed methods of encrypting chaos data that provides an additional degree of security in systems with software protection, and also found a solution that determines the effectiveness of data recovery between authorized and unauthorized users.

The physical and practical implementations of photonic systems combining topology studies with nonlinear optics are considered. A diagram of a laser setup was shown for the study and measurement of laser radiation parameters.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка аттестационной работы: 71 с., 24 рис., 1 табл., 2 приложения, 30 источников.

ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ХАОС В ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ, СИНХРОНИЗАЦИЯ ХАОСА, ФРАКТАЛЬНАЯ РАЗМЕРНОСТЬ, САЛФЕТКА СЕРПИНСКОГО, ПЗС КАМЕРА.

Объект исследования – система исследования фрактальной структуры оптического сигнала содержащая последовательно установленый и оптически согласованный источник когерентного излучения, устройство ввода излучения, коллимирующих линзу, приемный объектов, ПЗС-камеру.

Цель работы – исследовать развитие методов топологических сигналов.

Метод исследования – теоретический и практический.

В работе были рассмотрены и проанализированы способы шифрования данных хаоса которое обеспечивает дополнительную степень безопасности в системах с программным защитой, также найдено решение определяющее эффективность восстановления данных между авторизованными и неавторизованными пользователями.

Рассмотрены физические и практические реализации фотонных систем, объединяющих исследования топологии с нелинейной оптикой. Была изображена схема лазерной установки для исследования и измерения параметров излучения лазера.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні познаки……..8
Вступ…….....9
1 Практичне застосування хаотичної теорії.....…….....10
1.1 Хаос в оптичному зв'язку.....…….....10
1.2 Використання хаотичного сигналу в хаотичному зв'язку…….....19
1.3 Управління хаосом і модулювання інформації з невеликими збуреннями: метод OGY.....……...21
1.4 Експериментальна реалізація зв'язку на основі хаосу: фотонні інтегральні пристрої…….....…….....31
2 Дослідження та розвиток прикладних методів топологічної фотоніки.....…49
2.1 Математичні методи дослідження.....……..……50
2.2 Класифікація фракталів.....……52
2.3 Фрактали змінені або нерегулярні.....……...56
2.4 Топологічна ідентифікація оптичного приладу спостереження ОПС.....57
2.5 Постанова експерименту.....59
2.6 Дослідження параметрів випромінювання лазера.....61
Висновки…….....….67
Перелік джерел посилання……...…...69
Додаток А Графічний матеріал…….....72
Додаток Б Демонстраційний матеріал…….....78

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

КОПБ – коефіцієнтом помилок по бітам;

ЛОС – лазерну оптоелектронну систем;

НДС – нелінійні динамічні системи;

ПЗС – прилад із зарядним зв'язком;

OGY – Отта-Гребогі-Йорка.

ВСТУП

Метою роботи є розвиток методів топологіного аналізу оптичних сигналів. Основні методики вимірювань параметрів лазерного випромінювання і аналізу їх результатів регламентується стандартами та базуються на класичній теорії вимірювань про єдиності істинного значення, та виконанні центральної граничної теореми. У роботі буде показана можливість хаотизації режимів випромінювання, що впливає на значення і стабільність параметрів лазерного випромінювання. А також можливість кодування топологічних сигналів в різних оптичних системах випромінювання.

Топологічна фотоніка – це швидко розвивається область досліджень, в якій геометричні і топологічні ідеї використовуються для проектування і управління поведінкою світла. Натхненні відкриттям квантових ефектів Холла і топологічних ізоляторів в конденсованому речовині, останні досягнення показали, як створювати аналогічні ефекти і для фотонів, приводячи до чудових явищ, таким як стійке односпрямоване поширення світла, які мають великі перспективи для додатків. Оптичні ізолятори застосовуються для захисту резонаторів лазерних передавачів від відбитих сигналів, а також як вхідний елемент оптичних підсилювачів.

Для досягнення мети треба поставити завдання.

1. Дослідити фізичні принципи та методи хаотично-оптичного зв'язку.
2. Дослідження фізичних основ хаотичного шифрування сигналу.
3. Розвиток прикладних методів топологічної фотоніки.

1 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ХАОТИЧНОЇ ТЕОРІЇ

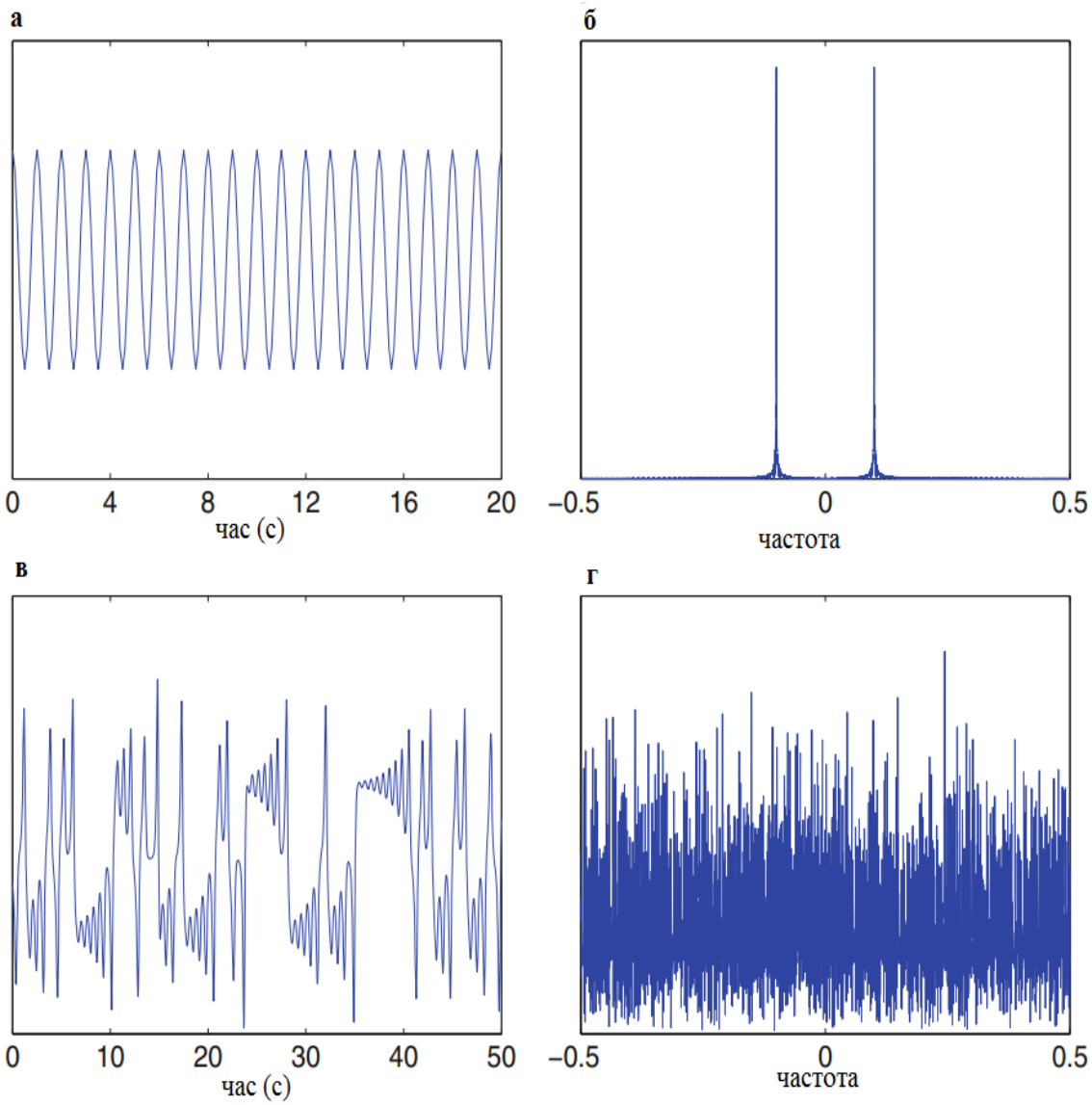
1.1 Хаос в оптичному зв'язку

Багато досліджень було присвячено синхронізації і заснованої на хаосі комунікації в останні два десятиліття. З початку 90-х років у багатьох статтях порушувалося це питання, і було досягнуто значного прогресу.

Схеми зв'язку на основі хаосу, як спочатку задумано, використовують синхронізацію хаотичних генераторів в якості основи. Це означає, що при певних обставинах складна і високочутлива нелінійна динаміка пов'язаних хаотичних осциляторів може синхронізуватися, і таке синхронне стан можна використовувати кількома різними способами, щоб забезпечити зв'язок. Таким чином, щоб представити цей короткий звіт, ми намагаємося зв'язати синхронізацію і взаємодія на основі хаосу, щоб прояснити, як вони пов'язані. Коротко розглядається в контексті її еволюції з плином часу, і в ній викладені сучасний стан та проблеми техніки для майбутніх досліджень.

У схемах, заснованих на когерентному виявленні, синхронізація забезпечує відновлення несучої і відновлення синхронізації на стороні одержувача. Відновлення несучого сигналу відноситься до відтворення або відновлення на стороні приймача сигналу несучоїхвилі, виробленої в передавачі. Як тільки генератори передавача і приймача будуть узгоджені, можлива когерентна демодуляція модульованого сигналу основної смуги частот. На рис 1.1 показані приклади періодичних і хаотичних носіїв. Крім цих причин, хаос володіє деякими дуже бажаними характеристиками з точки зору комунікації [1].

У свою чергу, відновлення синхронізації ставиться до необхідності того, щоб як когерентні, так і некогерентні приймачі повинні були знати точний час і тривалість кожного прийнятого символу в потоці, щоб мати можливість призначати час прийняття рішення і скидати початкові умови корелятора.



а – графік синусоідальноїузкополосної несучоїхвилі;

б– частотна область хаотичної широкосмугової несучої;

в– тимчасова хвиля; г– частотна область.

Рисунок 1.1 – Використання хаосу в якості несучої хвилі натомість синусоїдальної хвилі: основний принцип, що лежить в основі комунікації на основі хаосу

Розглядаючи синхронізацію хаосу, ми маємо на увазі особливий тип відновлення несучої хвилі.

По-друге, навіщо використовувати хаотичні, а не синусоїдальні носії в системах зв'язку? Коли для передачі інформації використовується синусоїдальна несуча, спектральна щільність потужності концентрується у вузькій смузі частот.

Хаотичні сигнали, в свою чергу, можуть займати більшу смугу пропускання, взаємні кореляції між сигналами, що генеруються різними початковими умовами, мають низькі значення. Ці характеристики лежать в основі обґрунтування використання хаотичних сигналів в якості джерел для поширення інформаційних сигналів.

Коли хаотичні сигнали модулюють незалежні вузькосмугові джерела, збільшення ширини смуги призводить до більш низьких рівнів спектральної щільності потужності способом, аналогічним тому, що відбувається в системах з розширеним спектром (РС). Отже, системи на основі хаосу і РС мають кілька загальних властивостей, а саме: їх важко перехопити будь-якому неавторизованому користувачу; вони легко приховані від будь-якого несанкціонованого одержувача, і в багатьох випадках важко навіть виявити їх присутність; вони стійкі до подавлення сигналу; і вони забезпечують міру несприйнятливості до спотворення через багатопроменевого поширення [2].

Встановлено, що за допомогою малих збурень можна управляти хаосом на нестійких періодичних орбітах або нерухомих точках. Вони показали, що завдяки властивості транзитивності хаотичного руху в його привабливому наборі малих збурень досить, щоб управляти хаотичним режимом. Згодом було показано як теоретично, так і експериментально, як цю ідею можна використовувати для створення хаотичного сигналу, що несе інформацію, і тому була введена ідея «спілкування з хаосом».

На рис 1.2 показаний приклад синхронізації хаосу з використанням методу Отта-Гребогі-Йорка (OGY) для системи Лоренца.

Тим часом визначили теоретичні основи синхронізації хаосу, представивши основу для стійкості синхронізації пари ідентичних пов'язаних хаотичних систем за допомогою обчислення умовних показників Ляпунова.

З цих публікацій з'явилася абсолютно нова перспектива в дослідженні нелінійної динаміки, особливо хаосу. Можливість управління і синхронізації хаосу породила пропозицію кількох практичних застосувань, особливо для зв'язку.

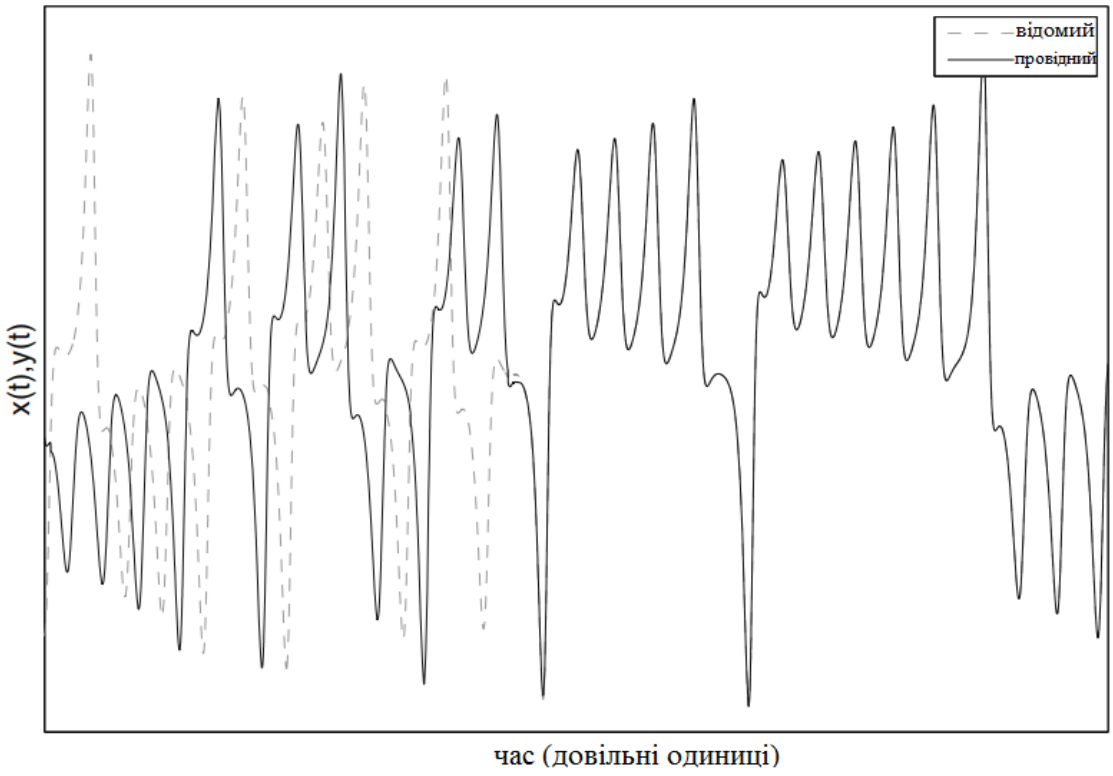


Рисунок 1.2 – Хаос під контролем: системи Лоренца синхронізуються за допомогою методу OGY

Враховуючи, що хаос став важливою темою дослідження, це не зайняло багато часу, поки не запропонували і не продемонстрували першу повну комунікаційну схему на основі хаосу. Ідея була проста: використовувати стійка синхронна поведінка майстер-підлеглий між парою хаотичних систем для кодування, передачі і декодування інформації в хаотичної еволюції [3].

Сигнал зв'язку складався з змінної стану провідної системи, доповненої повідомленням про малої потужності. При адекватному використанні в якості вхідних даних у підпорядкованій системі, хаотична форма хвилі не тільки дозволила системам реалізувати синхронізацію, а й дозволила відновити

інформацію, приховану в хаотичній динаміці. Ця система відома як хаотичне маскування, і її блок-схема показана на рис. 1.3.

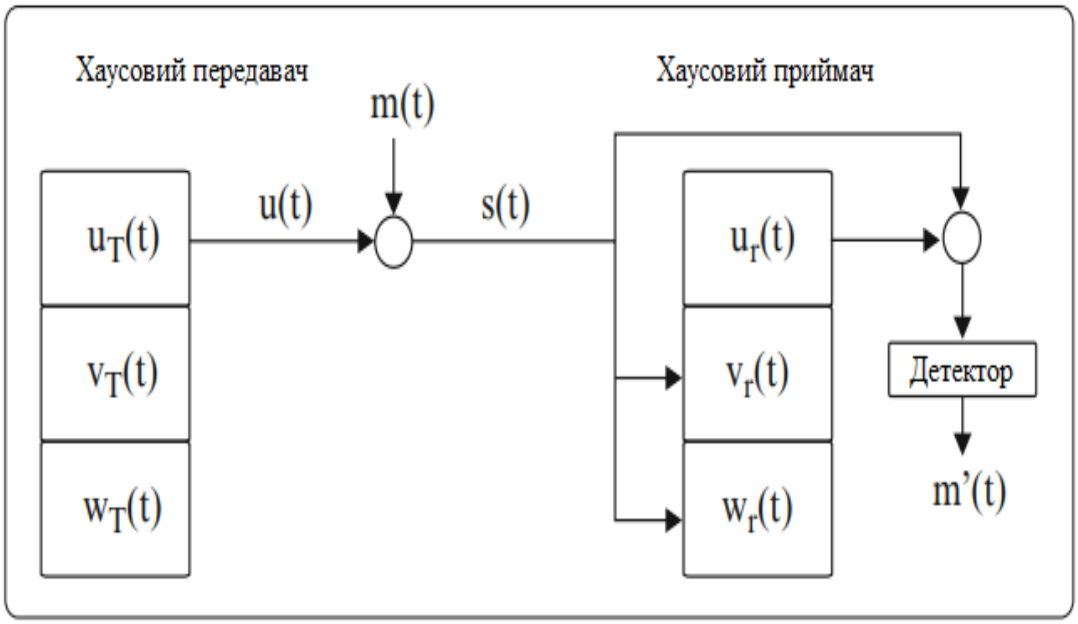


Рисунок 1.3 – Схема хаотичного зв'язку

Хоча сама початкова ідея була проста, вона сприяла розумінню чудового базового явища: підпорядкована система синхронізувалася тільки з хаотичною частиною вхідного сигналу, не дивлячись на те, що були присутні деякий рівень шуму і повідомлення з низьким енергоспоживанням. Пізніше це властивість стало відомо як фільтрація хаосу, тобто властивість синхронних систем відкидати хаотичне частина сигналу, що дозволяє відокремити повідомлення від хаотичного сигналу несучої.

У тому ж році запропонована хаотична модуляція, яка складається з вступу інформаційного сигналу в рівняння хаотичної системи.

Інжекція діє як обурення, яке змінює динаміку передавача, так що сам хаотичний сигнал містить інформацію.

На стороні приймача за допомогою синхронізації приймач здатний відновлювати відповідний незбурених хаотичний сигнал, і пошук інформації здійснюється шляхом порівняння прийнятого обуреного сигналу і згенерованого сигналу.

Минуло десять років з тих пір перших публікацій по синхронізації хаосу, коли інший суперечить ідея була реалізована в затримці пов'язаних хаотичних системи, схильні до відкладеної самовіддачі: підпорядкована система може передбачити траєкторію майстра, що породжує виникає поведінка, яке було названо яка випереджає синхронізацією. Згідно Восс, такі явища нетривіальні і мають універсальний характер, оскільки його основний механізм складається з взаємодії між диссипацією і пам'яттю. Таким чином, очікувана синхронізація може використовуватися для цілей зв'язку між віддаленими генераторами або навіть для швидкого прогнозування, тобто прогнозування стану без використання обчислень [4].

Було запропоновано багато інших можливостей застосування хаосу, починаючи від цифрової та аналогової модуляції до генерації псевдовипадкових послідовностей. Хаос також показаний в зв'язку з пристроями, використовуваними при обробці сигналів, такими як нелінійні адаптивні фільтри та мережі з фазової автопідстроюванням частоти. У міру розвитку досліджень і розробки більш складних сценаріїв для вивчення синхронізації хаосу були введені тимчасові затримки через те, що вони майже напевно присутні в будь-яких реальних системах, і, як наслідок, теоретичні результати, що мають технологічне значення, повинні враховувати їх вплив. Крім того, усвідомлення того, що тимчасові затримки в контурі зворотного зв'язку допускають виникнення хаосу в лазерних випромінювачів, а також потенційно можуть значно ускладнити складність хаосу, призвело до інтенсивного вивчення диференціальних рівнянь із запізненням, щоб точно моделювати і розуміти виникнення хаосу в такі системи.

В результаті проблема синхронізації отримала більше елементів, які дозволили появи невідомих явищ. Особливо цікавим став результат дослідження взаємно пов'язаних із затримки ідентичних хаотичних генераторів, які могли б реалізувати синхронізацію з нульовою затримкою, незважаючи на затримку зв'язку. Таке явище називається ізохронної синхронізацією. Він був успішно протестований на одночасну зв'язок на основі хаосу з використанням ідентичних хаотичних систем з взаємної затримкою [5].

З часу появи перших публікацій про комунікації в хаосі було докладено багато зусиль для розробки методів і фізичних пристроїв, які можуть підтримувати і підтримувати ефективні та економічно ефективні системи зв'язку на основі хаосу. Аспект ефективності в основному пов'язаний з:

– інтенсивним використанням хаотичної динаміки для кодування інформації;

– сигналом малої потужності, необхідним для управління хаотичною динамікою;

– можливістю використання кодування джерела, канального кодування і шифрування. виконується все відразу в тому ж процесі.

Економічно ефективний аспект пов'язаний з простотою установок зв'язку на основі хаосу, пристроями з низьким енергоспоживанням, необхідними для генерації і керування хаотичними сигналами високої потужності, і використанням всіх нелінійних операцій. електронних і оптичних компонентів, що дозволяє уникнути досить складних і енерговитратних заходів, що дозволяють уникнути нелінійностей при генерації синусоїдальних хвильових сигналів, які служать несуть у традиційних схемах зв'язку.

Проте, бажані характеристики хаосу не обмежуються наведеними вище. Повідомлялося про підвищену стійкість до шуму, неузгодженості параметрів і завмирання з-за багатопроменевого поширення, і вони являють собою важливі моменти на користь схем зв'язку на основі хаосу. Крім того, останні результати показують, що деякі схеми оптичного зв'язку на основі хаосу можуть нести на 15% більше користувачів в багатокористувацьких схемах зв'язку з однаковим коефіцієнтом помилок по бітам (КОПБ).

З іншого боку, аналітичні верхні межі продуктивності КОПБ для схем зв'язку на основі хаосу виявилися значно нижче, ніж робочі характеристики їх звичайних аналогів. Це в деякій мірі є практичним недоліком, оскільки знижує ефективність передачі інформації.

В результаті таких хороших і поганих аспектів, засноване на хаосі спілкування все ще залишається спірним предметом. Головне питання полягає в тому, чи може загальна продуктивність схем зв'язку на основі хаосу перевершити

продуктивність їх звичайних аналогів. Цей більш конкретний аналіз стане результатом справедливого розвитку різних тем, пов'язаних з практичною реалізацією комунікації хаосу. Поки що, хоча неможливо відповісти на це питання в більш широкому сенсі, недавні результати показують, що існують конкретні програми, в яких комунікація на основі хаосу дійсно може працювати досить добре.

Як неминуче міждисциплінарне питання, комунікації на основі хаосу булу досліджене фізиками, інженерами і математиками, серед інших. Всеосяжна теорія комунікацій на основі хаосу включає такі теми, як нелінійна динаміка і хаос, управління і синхронізація хаосу, теорія стійкості руху за Ляпуновим, оптика, електроніка, телекомунікація та інші. В результаті вкладу різних областей тема розвинулася до різних і взаємно доповнюють напрямками. Звичайно, в деяких з них результати досягли більшого, ніж в інших, і наслідком цього є те, що сучасний стан заснованого на хаосі спілкування важко визначити, якщо не з точки зору складових його окремих питань. Це правда, що хаос-комунікація була успішно перевірена в реальних умовах, і слід особливо згадати польовий експеримент, можливо, найактуальніший на сьогоднішній день. Але також вірно і те, що навіть в такому експерименті комунікація, заснована на хаосі, не опинилася на межі всіх можливостей, які вона теоретично надає.

1.2 Використання хаотичного сигналу в хаотичному зв'язку

Чи варто витрачати стільки часу і енергії на дослідження систем зв'язку, заснованих на хаосі, коли звичайні системи відмінно справляються? Це, здається, самий фундаментальний і очевидне запитання, оскільки ми спостерігаємо зростання більш швидких і швидких систем зв'язку, заснованих на традиційних методах. Відповідь не очевидна. Засновані на хаосі системи зв'язку відкрили цілий ряд нових можливостей, і в той же час було доведено, що вони не можуть досягти тієї ж продуктивності КОПБ, що і звичайні системи. Таким чином, відповідь на це питання може бути отриманий шляхом обмірковування переваг і недоліків, пов'язаних з конкретним бажаним застосуванням [6].

На цьому етапі розвитку апаратних пристроїв, таких як лазери і електронні компоненти, є випадки, коли використання звичайних синусоїдальних сигналів для передачі інформації саме по собі може розглядатися як недолік. Хоча відомо, що оптичні пристрої характеризуються хаотичним режимом для широкого діапазону своїх параметрів, виняткове використання синусоїдальних хвиль може складатися з порожньої витрати енергії через необхідність досить складних заходів з підтримки лінійності в нелінійних за своєю природою системах [7].

Крім того, оскільки технології лазерів та оптичних волокон досить розвинені, використання їх можливостей в повній мірі має на увазі ефективне використання широкого спектру сигналів, які можуть генеруватися при їх використанні[9]. Дійсно, той факт, що як лазерні, так і електронні пристрої мають набагато більший діапазон роботи параметрів в хаотичному режимі, ніж в періодичному режимі, сам по собі збільшує здатність генерування широкосмугових несучих сигналів. У той час як в традиційних системах зв'язку широкосмугові сигнали генеруються з використанням псевдовипадкових послідовностей для розширення сигналів по частоті, в схемах з хаосом сам по собі факт, що працює пристрій, що генерує хаос, є достатнім для генерації широкосмугових сигналів. Як правило, такий широкосмуговий сигнал має щільний набір нестійких періодичних орбіт в діапазоні частот з плоскою спектральної щільністю потужності.

На практиці це означає, що хаотичні системи використовують вхідний енергію для генерації широкосмугових сигналів [8].

Добре відомо, що довільно близькі траєкторії хаотичних систем експоненціально розходяться в тимчасовій еволюції через характерного властивості експоненційної чутливості до початкових умов. Як наслідок, з огляду на, що два хаотичних сигналу запускаються в довільно близьких початкових умовах, такі сигнали стають статистично некорелірованими з часом, що дозволяє використовувати методи мультиплексування [9].

У разі мультиплексування з частотним поділом відомо, що навіть хаотичний сигнал з смуговий фільтрацією залишиться хаотичним через існування щільного набору нестійких періодичних орбіт в хаотичному наборі тяжіння. Також, що як

би не були доступні методи кодування та ущільнення джерел, вони мають досить обмежені ресурси в порівнянні з відомими методами кодування на основі хаосу [10]. Це пов'язано з тим, що при кодуванні на основі хаосу надмірність не повинна надсилатися по каналу; скоріше, вони побудовані в детермінованому характері хаотичної динаміки.

Що стосується додатків зв'язку, таких як мобільна або внутрішня радіозв'язок, ефект виникає в результаті взаємодії сигналів, що проходять по різних шляхах і виникають в приймальнику. Такий ефект, відомий як багатопроменеве завмирання, складається з деструктивних перешкод між сигналами і може привести до серйозного погіршення сигналу. Теоретично, такий ефект може бути зменшений в схемах зв'язку, заснованих на хаосі, через більш низької взаємної кореляції, яка існує між будь-якими двома зсунутими в часі сегментами хаотичної форми хвилі, в порівнянні з періодичними сигналами [11].

Крім теоретичних переваг схем зв'язку, заснованих на хаосі, апаратне обладнання сходиться до використання нелінійних характеристик оптичних, оптоелектронних та електронних компонент з низьким рівнем шуму [12]. Крім того, згідно з даними, деякі з них можуть бути легко включені в існуючу інфраструктуру оптичних мереж, наприклад, такі як вбудовані на кристалі хаотичних випромінювачі КОПБ[13].

Було продемонстровано, що цифрові системи зв'язку, що використовують хаотичні несучі, мають більш низькі верхні межі для характеристик КОПБ в каналі з адитивним білим гаусовим шумом, ніж їх відповідні версії, засновані на традиційних цифрових методах. Це означає, що при однакових умовах відносини "сигнал до шуму" звичайні методи мають більш низький КОПБ, ніж їх хаотичні аналоги. Хоча це правда, що продуктивність КОПБ може бути поліпшена за рахунок використання оптимізованих методів кодування і декодування або оцінки, також вірно, що традиційні системи часто демонструють вищу продуктивність КОПБ навіть в такому випадку. Альтернативою може бути напрямок схем зв'язку, заснованих на хаосі, до додатків, в яких такий недолік не є критичним, таких як надширокосмугові радіо, персональні мережі з низькою швидкістю передачі даних і оптичні лазерні системи.

1.3 Управління хаосом і модулювання інформації з невеликими збуреннями: метод OGY

У цьому контексті метод OGY вже більше двох десятиліть успішно використовується в задачах управління та синхронізацію хаосу. Ключовим елементом контролю хаосу є спостереження, що в хаотичному наборі існують нескінченні нестійкі періодичні орбіти, які періодично відвідуються траєкторією по мірі розвитку хаотичного процесу в часі. Деякі з цих періодичних орбіт можуть відповідати бажаної траєкторії, на якій ми можемо захотіти встановити систему[14].

Також згідно іншому ключовому компоненту є те, що хаотичні системи схильні чутливої залежності від початкових умов, що також означає, що ми можемо легко змінити траєкторію, використовуючи невеликі збурення. Метод OGY полягає у використанні малих збурень для «захоплення» і стабілізації хаотичної траєкторії в даному кінцевому стані, тобто періодичної орбіти або фіксовані у точці, коли така траєкторія проходить досить близько до цього бажаного кінцевого стану. Використання невеликих збурень для управління хаосом тісно пов'язано з ефективністю пристроїв, що генерують хаос, оскільки на практиці процес перетворення цифрового повідомлення в хаотичну еволюцію може управлятися з невеликою кількістю енергії. Хоча це була перша добре документована ефективна стратегія для контролю і синхронізації хаосу, метод OGY як і раніше широко використовується завдяки енергозберігаючим характеристикам, зберігаючи при цьому ефективність всього процесу. Справа в тому, що знання про динаміку дозволяють використовувати мало енергії для управління хаотичною динамікою і кодування інформації в її еволюції.

Цей факт широко досліджувався при розробці схем зв'язку на основі хаосу з використанням методу OGY. Наприклад, на рис. 1.4, які можуть бути призначені символами 0 і 1 та модулюються в хаотичної еволюції, коли хаотична траєкторія перетинає заданий поріг.

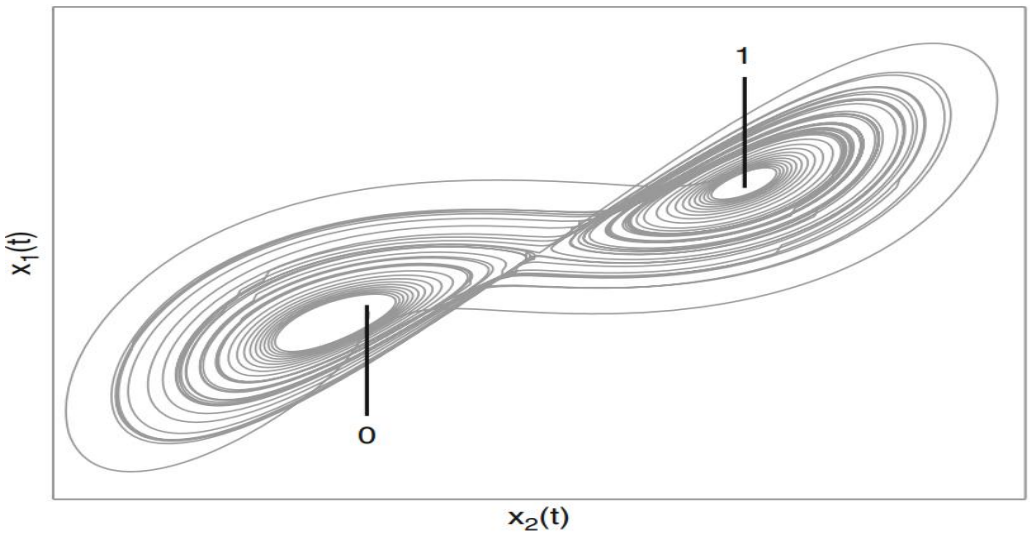


Рисунок 1.4 – Демонстрація хаотичних бітів 0 і 1

Так що хаотична еволюція генерує двійковий потік бітів, як показано на рис. 1.5

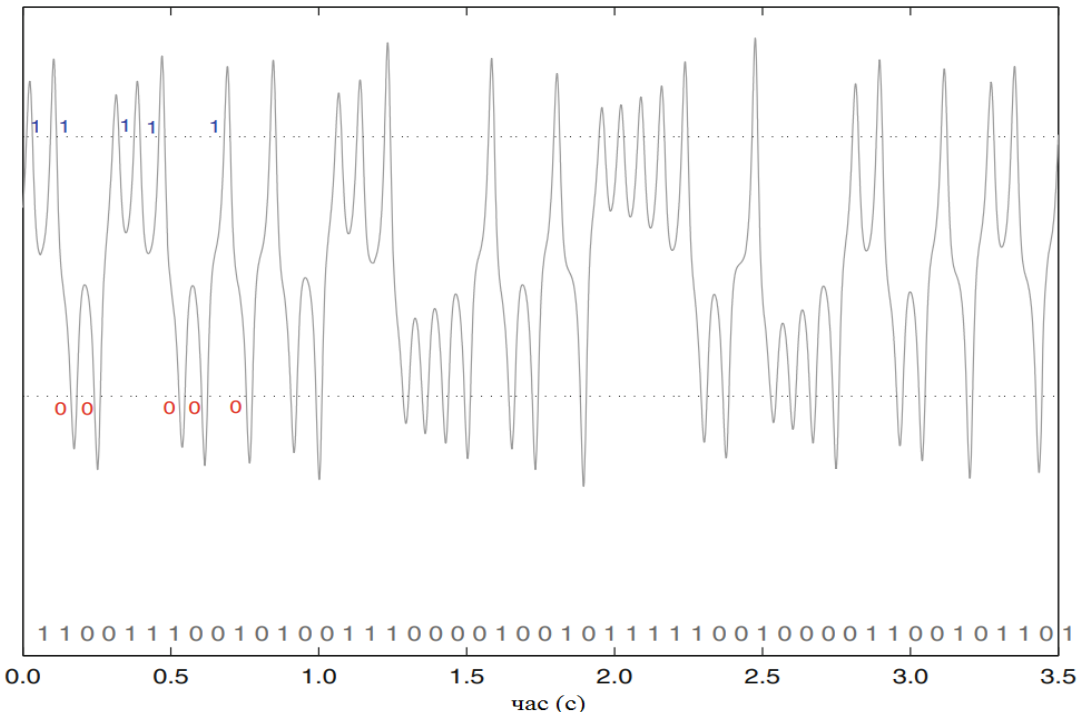


Рисунок 1.5 – Процес модуляції з використанням хаотичної еволюції

Хаос-зв'язок може бути ефективною в ситуаціях, пов'язаних із затримками каналу. Одночасна двонаправлений зв'язок між генераторами з затримкою була

представлена в чисельному моделюванні з використанням лазерів і в експериментальних установках з використанням хаотичних електронних схем. В обох випадках це було досягнуто в сценарії, що включає дві пов'язані хаотичні системи, сполучені каналом затримки.

При розгляді реальних ситуацій, коли тимчасові затримки майже напевно присутні, зв'язок на основі хаосу може використовуватися як засіб подолання незручностей, викликаних затримкою каналу, при збереженні концептуально простий структури [15].

Тим не менш, оскільки концепція одночасної двобічної зв'язку на основі хаосу заснована на синхронізації, необхідно визначити, що означає синхронізація в контексті генераторів з затримкою. Мета, яку потрібно розглянути, це явище "Ізохронної синхронізації", яке є основою системи одночасної двобічної зв'язку на основі хаосу, і змалювати, як таке синхронне стан можна досліджувати в схемах одночасної двобічної зв'язку.

Останні результати показали, що взаємно пов'язані хаотичні системи здатні реалізувати синхронізацію з нульовим запізненням навіть у середовищі з затримкою каналу. Така форма синхронізації називається ізохронної синхронізацією і з'явилася в чисельному моделюванні, в експериментальних установках і, останнім часом, в аналітичних результати, заснованих на теорії стійкості Ляпунова-Красовського [16].

Оскільки розглядається проблема зв'язку в реальних умовах, необхідно враховувати затримки під час передачі інформації. Ефект такого часу передачі може відчуватися в різних формах у відповідності з односпрямованим або двонаправленим характером схеми зв'язку. У односпрямованих схемах зв'язку у формі передавач-приймач такий ефект обмежений тимчасовою затримкою при прийомі інформації.

Як приклад, припустимо, що сигнал $x(t)$, що представляє символ, відправляється провідної або передавальної системою по каналу в момент t, і він піддається затримки τ через характеристик, притаманних такому каналу.

У цьому випадку переданий сигнал $x(t)$ приймається на стороні приймача в момент $t + \tau$, і принцип декодування символу – це ахрональная синхронізація між системами передавача і приймача, тобто $x(t) = y(t + \tau)$, в якому приймач слід за передавачем з запізненням за часом τ і відновлює переданий символ через властивості фільтрації хаосових частот синхронізованих генераторів.

У свою чергу, з огляду на двонаправлені осцилятори з затримкою, ізохронна синхронізація дозволяє створювати схеми одночасної двобічної зв'язку завдяки тому, що $x(t) = y(t)$, незважаючи на час затримки, що вноситься каналом.

Ізохронна синхронізація дозволяє не тільки здійснювати одночасну двосторонню зв'язок, але також шифрувати і дешифрувати інформацію і узгоджувати секретні ключі.

Хоча взаємне управління хаотичними системами, схильними до затримки зв'язку, чутливо до величини тимчасової затримки, невідповідностей параметрів і шуму, успішні реалізації заснованої на хаосі комунікації в простих експериментальних установках підсилюють можливість повне використання хаотичної динаміки для передачі інформації в таких реальних умовах, які представляють затримку.

Ідея одночасної двобічної передачі і прийому заснована на тому факті, що системи можуть синхронізуватися з нульовим запізненням при наявності затримки каналу і, таким чином, інформація може бути введена і витягнута належним чином на обох кінцях лінії зв'язку, як якщо б не було жодної затримки. Оскільки відбувається одночасна передача, існує дві можливості кодування символів в даний момент [17].

1. Обидві системи кодують один і той же символ.

2. Кожна система кодує різні символи.

З огляду на це, виникають два різні обставини, що стосуються підтримання синхронного стану. У першому випадку, оскільки взаємно пов'язані системи кодують один і той же символ в даний момент, синхронізація підтримується з-за того факту, що обидві системи піддаються однаковим обуренню, викликаному введенням інформації.

У цьому випадку зловмисник не може зрозуміти, який символ кодується.

У другому випадку, коли системи кодують різні символи в даний момент, повідомлення обробляється як адитивний шум у адміністратора ланцюга, і воно фільтрується через фільтрації хаосу у синхронізованих системах.

Стверджується, що, оскільки системи кодують один і той же символ в один і той же час, зловмисник не може зробити висновок про кодованої символі, таким чином, одночасна двонаправлений зв'язок може бути використана на практиці для узгодження секретних ключів, так як обидві сторони посилання можуть домовитися на секретному ключі, що складається з перших N символів, які збігаються, таким чином, що ключ з таким великим розміром, як бажаний, може бути узгоджений у відкритому каналі.

Ця структура є вигідною, оскільки вона усуває необхідність у приватному каналі для обміну ключовою інформацією і, таким чином, значно спрощує процес зв'язку. Блок-схема цієї системи показано на рис. 1.6

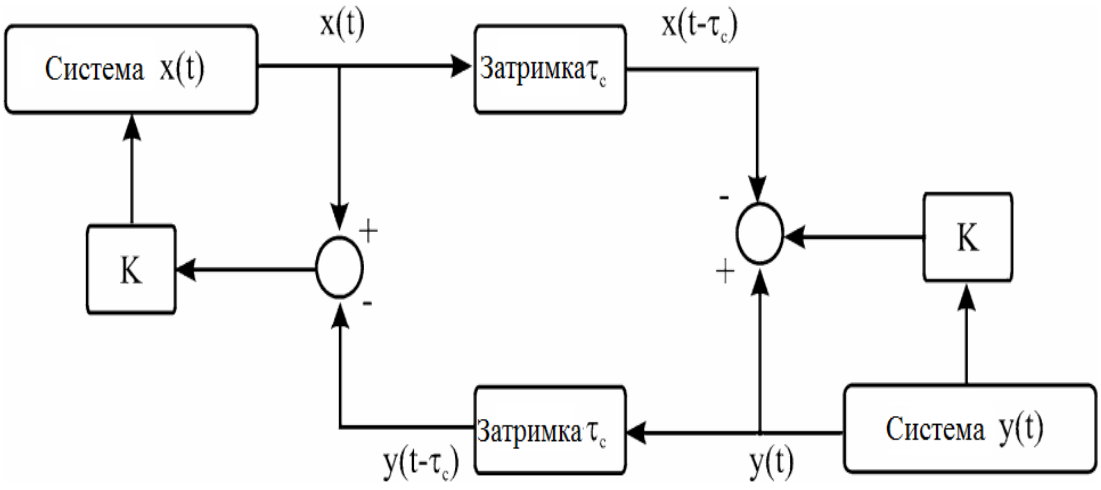


Рисунок 1.6 – Схема взаємо-керованих систем

На рис 1.7 показаний результат одночасної передачі даних: *mx(t)* і*my(t)*– це бітові потоки, які передаються системами *x(t)* і *y(t)* відповідно.

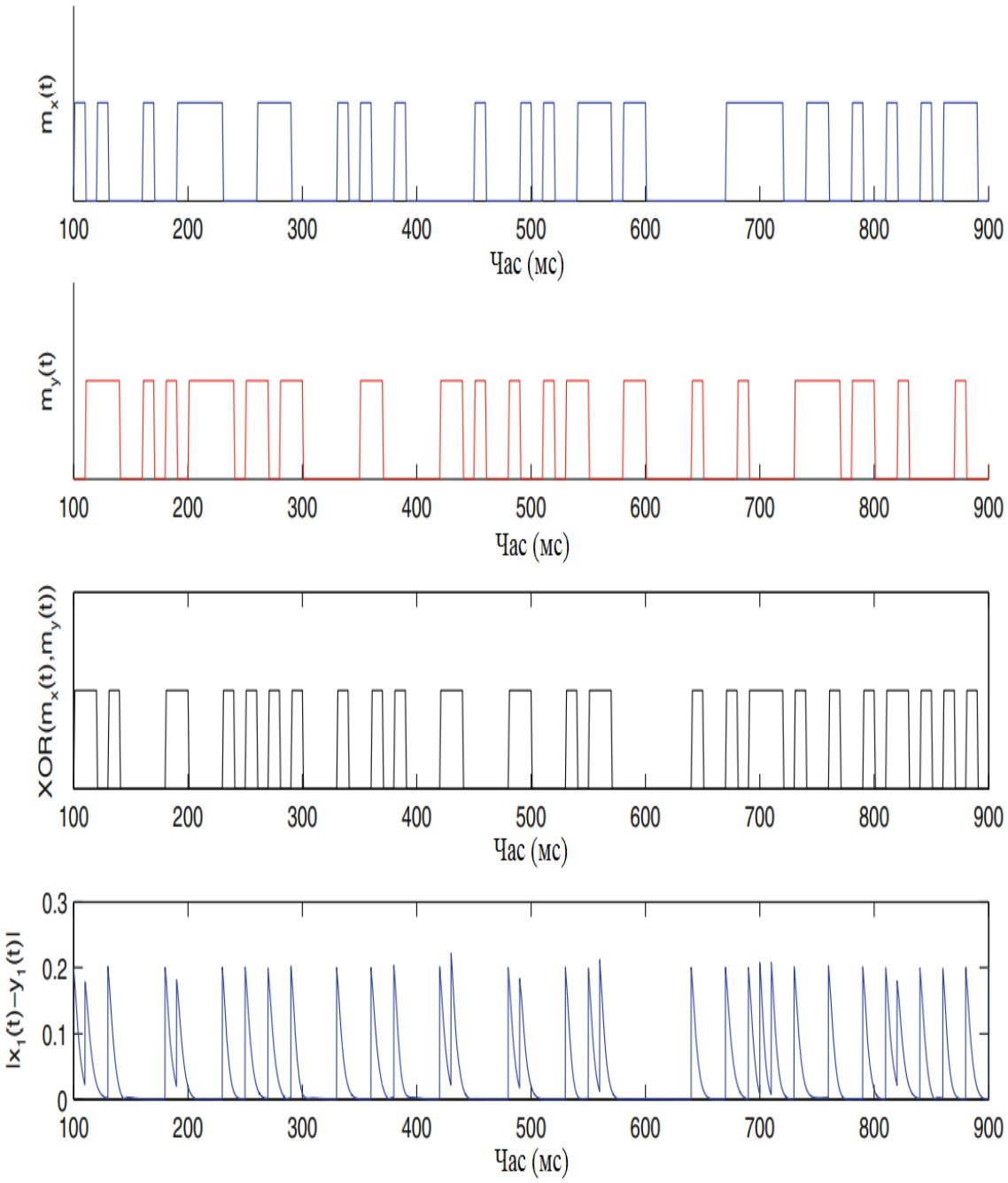


Рисунок 1.7 – Демонстрація двонаправленої схеми зв'язку на основі хаосу

Динаміка помилки синхронізації дозволяє ідентифікувати піки, які відповідають кожній системі, кодує окремий біт. Звідси випливає, що прийняті бітові потоки можуть бути відновлені після простої операції, як показано на рисунку. Варто відзначити, що модуляція різних символів в даний момент викликає сплески в синхронному стані. Коли відбувається повторна синхронізація, у послідовності символів можуть бути закодовані на обох кінцях, і,

як наслідок, швидкість кодування задається зворотною величиною часу повторної синхронізації. Наприклад, у випадку напівпровідникових лазерів ресинхронізація становить близько 0,3 нс, що забезпечує максимальну швидкість кодування 3 Гбіт/с на систему. Враховуючи, що ефективність кодування джерела і швидкості стиснення даних з використанням хаотичної динаміки можуть перевершувати звичайні методи кодування джерела і стиснення даних, одночасний двоспрямований зв'язок на основі хаосу на основі ізохронної синхронізації, як правило, представляє підвищений інтерес для досліджень через її великий пропускної спроможності, зберігаючи при цьому просту структуру і економічно ефективне впровадження.

Роботи Пекора і Керролла, Оппенгейма, надихнули на чисельні і теоретичні дослідження здійсненність систем зв'язку master-slave, заснованих на хаотичної синхронізації.

Однак ці схеми зазвичай не забезпечують задовільної продуктивності, коли беруться до уваги обмеження смуги пропускання, що накладаються каналом зв'язку[18].

Це питання, яким на практиці не можна нехтувати. Фактично, через нелінійного характеру вузлів, що складають мережу, якщо який-небудь спектральний компонент не працює в передачі, тоді можуть бути порушені всі спектральні компоненти. Отже, повідомлення, відправлене майстром, не може бути вірно відновлено на підпорядкованому пристрої. Щоб подолати цю проблему, Рулков, Цімрінг, Айзенкрафт і Геркен незалежно один від одного запропонували метод синхронізації головного і підлеглого, описуваний хаотичними диференціальними рівняннями, в умовах обмеження смуги пропускання. Ідея полягає в тому, щоб використовувати ідентичний фільтр на обох вузлах, щоб обмежити спектральний вміст переданого сигналу доступною пропускною здатністю. Згодом ці результати були поширені на різницеві рівняння. На рис 1.8–1.10 показані результати, отримані в результаті чисельного моделювання з використанням двовимірної карти Хенона. На рис 1.8 показані характеристики схеми, описаної для ідеального каналу.

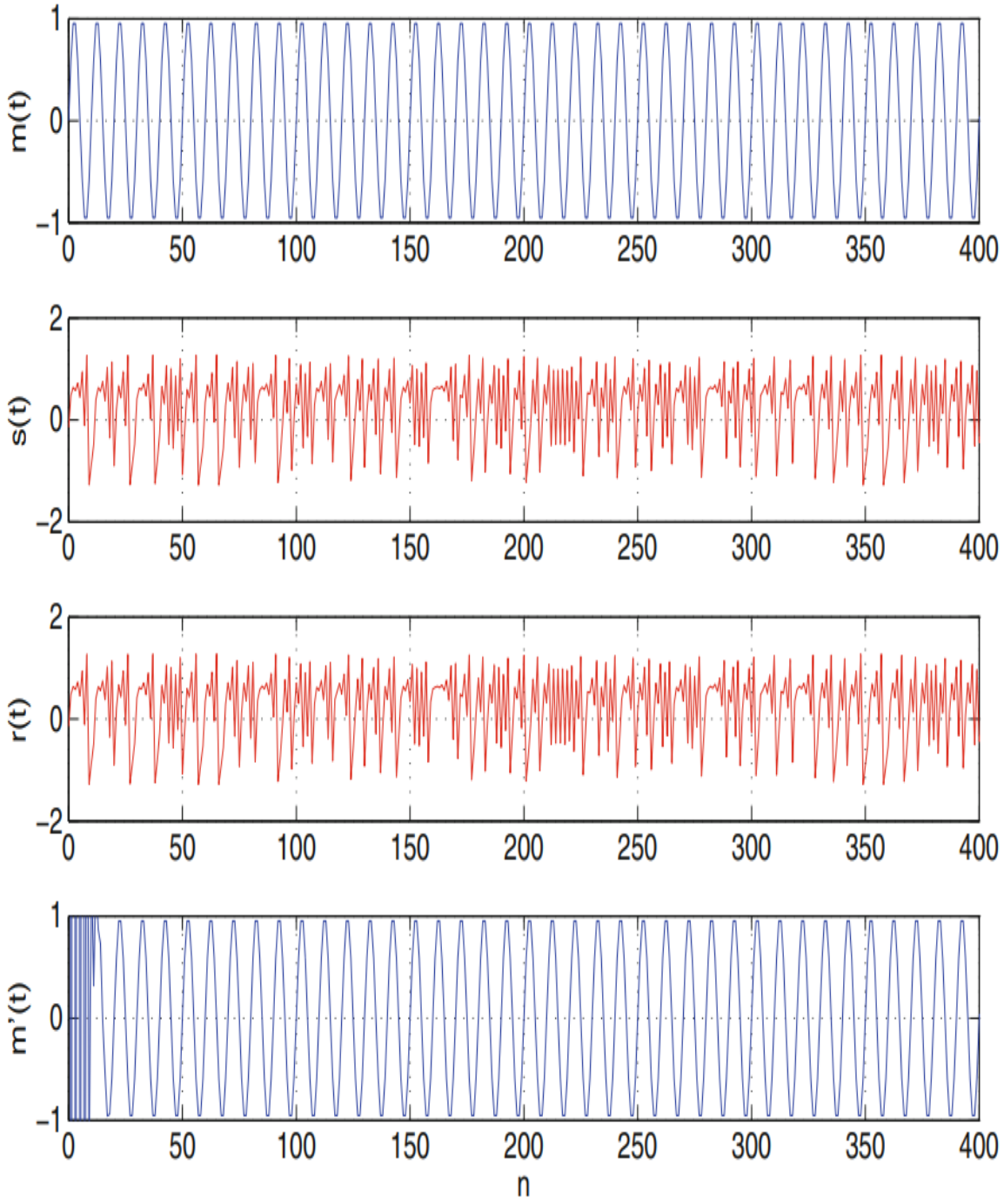


Рисунок 1.8 – Зображення повідомлення, які були передані та прийняті в ідеальному випадку каналу

Після перехідного процесу вихідне повідомлення, надіслане провідним, повністю відновлюється в підпорядкованому пристрою. На рис. 1.9 і 1.10 канал вважається фільтром з кінцевою імпульсною характеристикою (FIR) близько і частотою зрізу $\omega_c = 0{,}8\pi$.

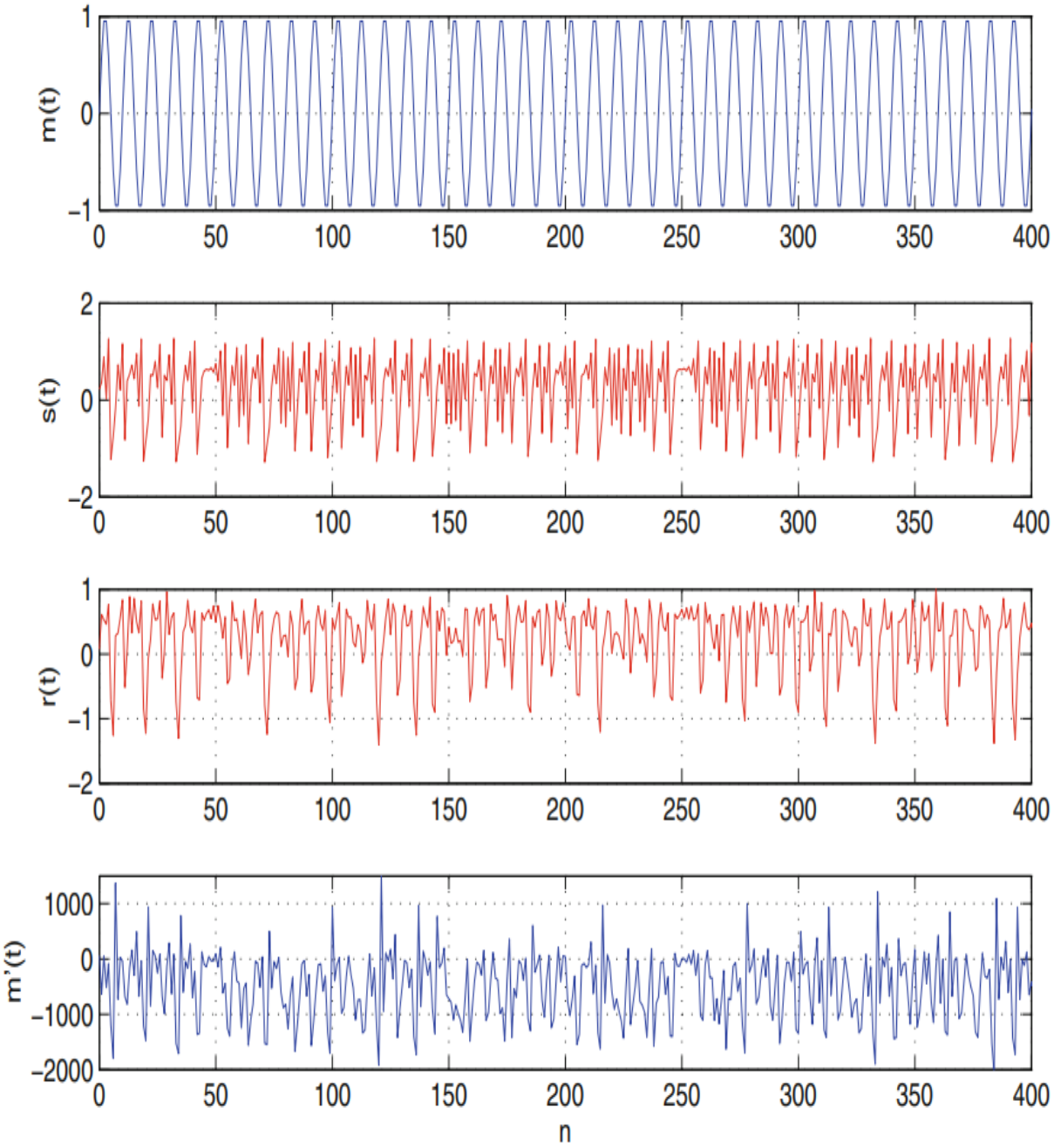


Рисунок 1.9 – Передані прийняті сигнали і відновлене повідомлення

На рис. 1.10 фільтр не використовується у провідному і відомому пристроях для обмеження спектра переданого повідомлення; отже, таке повідомлення не може бути відновлено. На рис. 1.10 FIR-фільтри близько і $\omega_s = 0{,}4\pi$ використовуються в обох вузлах, і повідомлення повністю перебудовується після перехідного процесу. Повідомлення *m(t),* передані *s(t)* і прийняті *r(t)* сигнали і відновлене повідомлення *m(t).*

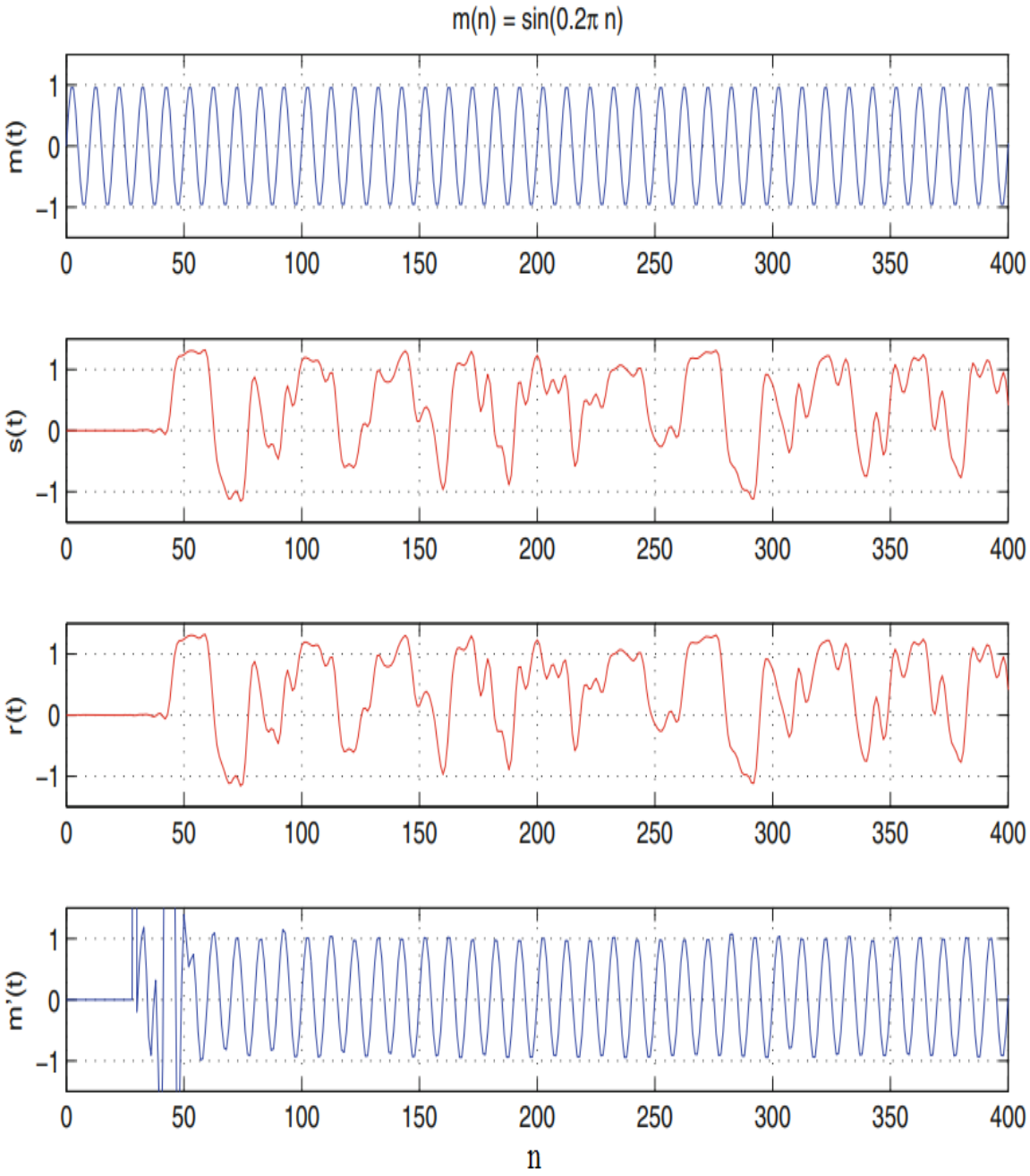


Рисунок 1.10 – Повідомлення, передані і прийняті сигнали та відновлене повідомлення для того ж каналу, що і на рис. 1.9

Отже, в цих рамках провідні-ведені системи, засновані на хаотичної синхронізації, можуть задовільно працювати, навіть якщо враховувати обмеження смуги пропускання, що накладаються каналом зв'язку (рис. 1.9).

Однією з основних проблем схем зв'язку, заснованих на хаосі, є їх низька продуктивність в умовах адитивного білого гаусівського шума.

Якщо, з одного боку, використання сигналів, породжених хаотичними явищами, є багатообіцяючою альтернативою ефективним, безпечним і

енергозберігаючих систем зв'язку, з іншого боку, певним внутрішнім характеристикам цих сигналів – наприклад, аперіодична, чутливість до початкових умов і широкосмуговий спектр – створюють значні труднощі для виконання основних етапів обробки сигналу, таких як шумозаглушення (рис. 1.10).

Простий спосіб проілюструвати цей момент полягає в тому, щоб помітити, що спектральне схожість між хаотичними сигналами і шумом робить непридатним класичний підхід лінійної фільтрації, заснований на прямому формування частотної характеристики.

Проте, було багато робіт по відновленню хаотичних часових рядів з галасливою середовища. Серед них можна згадати кілька різних підходів: теорія оцінки, наприклад; локальне поліноміальне наближення; розкладання по сингулярним значенням і локальна геометрична проекція, а останнім часом і сліпий поділ сигналів [19].

На основі цих методів останнім часом було запропоновано багато схем зв'язку, заснованих на хаосі, які використовують методи шумозаглушення до або під час демодуляції. Хоча їх продуктивність в термінах BER у адитивному білому гаусівському шумі краще, ніж в системах, заснованих на хаосі, які їх не використовують, ще належить пройти довгий шлях, щоб вони стали порівнянними зі звичайною системою в цьому аспекті [20].

Комунікація на основі хаосу в існуючій інфраструктурі демонструє ситуацію, коли малоймовірно, що операційні системи будуть просто замінені, незалежно від того, наскільки розвинена будь-яка інша техніка. Деякі важливі теми, пов'язані з розробкою нових методів і технологій, включають:

– в якій мірі вони можуть використовуватися;

– наскільки легко вони можуть бути включені в існуючу інфраструктуру;

– наскільки вони сумісні зі стандартною технологією.

Маючи це на увазі, деякі статті були присвячені цій темі. Вони отримали теоретичні і чисельні результати BER, які дозволяють оцінити ефективність отриманої гібридної системи для різних співвідношень потужності і коефіцієнтів

розсіювання, потужності хаотичного сигналу, звичайних потужностей сигналу з розширеним спектром та спектральні щільності потужності шуму.

Хоча самі результати не дуже переконливі, вони є важливим кроком до глибшого розуміння переваг і недоліків співіснування методів комунікації.

Варто також привести результати, представлені в якості прикладів використання готових частин обладнання для створення практичних додатків, заснованих на хаосі. Ця стаття представляє проект і перевірку за допомогою відповідно поліпшених тестів випадковості двох різних реалізацій високопродуктивних генераторів справжніх випадкових чисел, які використовують хаотичну схему з дискретним часом в якості джерела ентропії. Пропонована система була розроблена на основі стандартного конвеєрного аналого-цифрового перетворювача, яке легко, модифікованого для роботи в вигляді набору кусково-лінійних хаотичних карт [21].

1.4 Експериментальна реалізація зв'язку на основі хаосу: фотонні інтегральні пристрої

Оптичні мережі вважаються дуже сприятливим середовищем для належного функціонування заснованої на хаосі зв'язку завдяки:

– великому потенціалу пристроїв, які генерують хаотичний світ (напівпровідникові лазери, лазерні діоди);

– низького рівня спотворень і шумів, у якому хаотичному сигналу при подорожі по оптоволоконних каналах.

Як наслідок, в даний час оптичний зв'язок стає предметом інтенсивного і плідного вивчення в цій темі.

Повністю стабільно працюючі монолітні фотонні інтегральні схеми (PIC) були успішно використані для тимчасової зв'язку з оптичної лінії зв'язку через 100 км волоконно-оптичних ліній зв'язку зі швидкістю передачі даних 2,5 Гбіт/с і BER нижче 10^{-12}.

Такі пристрої генерують широкосмуговий хаос високої складності, який є бажаною характеристикою з точки зору заснованої на хаосі зв'язку.

Основним аргументом на користь хаосу є те, що хаотичні носії пропонують додатковий рівень шифрування, який допомагає захистити дані від неавторизованих користувачів, так що потенційні перехоплювачі не зможуть відновити інформацію, вбудовану в хаотичний сигнал, через технічні труднощі настройки їх PIC відповідно. Основним елементом, відповідальним за належне функціонування цієї установки, є точне термоелектричне охолодження пристроїв, яке забезпечує стабільність і керованість важливих властивостей синхронізації, таких як довжина хвилі, оптична потужність, спектральний розподіл і умови фазового узгодження.

Протокольна криптографія включає (безпеку інтернет-протоколу IPsec) та також (безпеку транспортного рівня – TLS або рівень захищених сокетів SSL) мережевий моделі OSI була майже принципом захисту таких каналів зв'язку. Шифрування другого рівня з використанням криптографічних алгоритмів (наприклад, 256-бітний розширений стандарт шифрування AES) все частіше застосовується в останні роки для захисту військових і критичних мережевих інфраструктур, пропонуючи складність вивантаження і знижуючи витрати на обслуговування. Навпаки, апаратне шифрування практично ще не застосовується в звичайних системах оптичного зв'язку; тим не менш, в останні роки віно було явно досліджене у двох різних напрямках через його здатності забезпечити додатковий рівень безпеки. Квантова криптографія забезпечує захищені посилання, використовуючи фундаментальні закони фізики для безпечного поширення ключів; однак існують деякі обмеження, що стосуються швидкості та відстані зв'язку, спеціального обладнання і т.д.

Шифрування даних хаосу забезпечує додатковий ступінь безпеки в системах з програмним захистом. Він заснований на ідентичних апаратних пристроях і застосовується до фізичного рівня, забезпечуючи можливість шифрування даних в режимі реального часу.

Вбудовані в кристал хаотичні випромінювачі з допомогою фотонної інтеграції здаються дуже привабливими, оскільки їх можна легко включити в існуючу інфраструктуру оптичних мереж. Хоча в недавньому минулому було представлено декілька робіт, присвячених фотонним пристроям, які

демонстрували цікаву нелінійну та хаотичну поведінку, випромінює сигнали з низькою складністю і вузькою смугою пропускання зробили їх невідповідними для додатків шифрування даних з високою швидкістю передачі.

Навпаки, в цьому випадку був представлений керований фотонний інтегрований випромінювач, в якому попередні результати довели можливість цього пристрою демонструвати складну хаотичну динаміку в строго певних умовах експлуатації.

У роботі було повідомлено про перші демонстрації повністю керованих широкосмугових хаотичних генераторів на основі PIC, здатних демонструвати видатну продуктивність в архітектурах синхронізації зі зворотним зв'язком з винятковою стабільністю. Також повідомляємо про першої експериментальні демонстрації оптичної системи зв'язку на великі відстані, яка використовує підвищену ефективність синхронізації зі зворотним зв'язком вищевказаних PIC для безпечного обміну даними з швидкістю 2,5 Гбіт/с з частотою помилок по бітам нижче 10^{-12}.

Такі низькі значення BER досягаються лише для авторизованих користувачів, навіть для дуже маленьких амплітуд зашифрованих повідомлень, за допомогою методів прямого виправлення помилок (FEC). Метод FEC, використовуваний в системі, встановлює цифровий поріг швидкості бітрейта ($\Re = 1{,}8 \cdot 10^{-3}$) у роботі, допомагає знайти рішення визначаючи ефективність відновлення даних між авторизованими і неавторизованими користувачами.

Останні, або шляхом безпосереднього виявлення лінії передачі, або шляхом використання порівняно з PIC-випромінювачем – апаратних приймачів, зможуть відновлювати дані зі значеннями BER, настільки низькими, як цей цифровий поріг $\Re$ [22].

Вищевказані досягнення демонструють можливість безперешкодної інтеграції підходу кодування хаосу в існуючі двоточкові оптичні лінії зв'язку.

Пропонований PIC, як показано на рис. 1.11, був виготовлений з використанням епітаксійного росту селективної області і включає в себе фундаментальні принципи теорії оптичної зворотного зв'язку з затримкою за

часом, використовуючи різні розділи, які забезпечують можливість управління хаотичними властивостями оптичного елемента випромінювання.

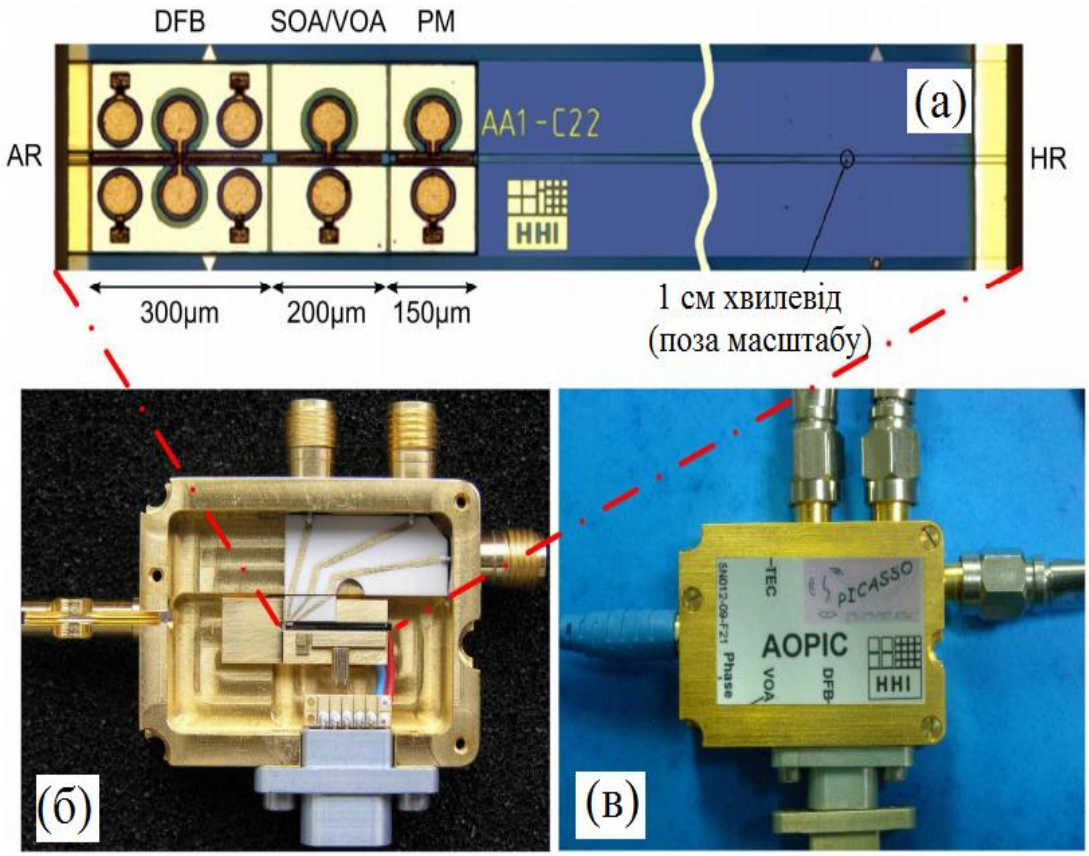


Рисунок 1.11 – Інтегрований генератор фотонного монолітного хаосу

Критерієм вибору короткої довжини зовнішньої порожнини є здатність пристрою створювати хаотичні атрактори високої складності. Обрана довжина 1 см відповідає часу зворотного обходу зворотного зв'язку, рівному приблизно 280 пс, затримці, яка досить велика передбачено теорією і чисельними передбаченнями для забезпечення повною хаотичною поведінкою. В залежності від струму зміщення лазера та сили зворотного зв'язку, ширина смуги хаотичної несучої може бути збільшена з декількох гігагерц до 20 ГГц. Інтеграція секції посилення/поглинання (SOA/VOA) забезпечує контроль сили зворотного зв'язку; відсутність зміщення цієї ділянки призводить до певного коефіцієнту зворотного зв'язку по оптичній потужності, що дорівнює 1,6 %, який зумовлений внутрішніми втратами зовнішнього резонатора.

Хоча останнє значення виявляється досить високим, щоб генерувати хаотичну динаміку, коефіцієнта зворотного зв'язку може бути збільшений до 5% шляхом позитивного зсуву розділу SOA для підвищення заплутаності сигналу. Фазовий перетин (PM) точно налаштовує час проходження резонатора з субхвильовим дозволом; ця операція надзвичайно важлива для синхронізації з іншими пристроями, які можуть мати невелику невідповідність довжини порожнини.

Точне термоелектричне охолодження пристроїв з використанням відповідної упаковки для PIC забезпечує керованість і довготривалу стабільність роботи не тільки з точки зору довжини хвилі і оптичної потужності, але також з точки зору спектрального розподілу хаотичного носія і умови узгодження фаз. Все перераховане вище є життєво важливим параметром для досягнення високопродуктивної синхронізації зі зворотним зв'язком.

На рисунку 1.11, а пристрій складається з DFB-лазера (лазер з розподіленою зворотним зв'язком), який формує зовнішню оптичну порожнину з задньої гранню PIC з високовідбиваючим покриттям (HR); порожнину також включає в себе різні активні/пасивні секції, такі як секція змінного посилення / поглинання (SOA/VOA), фазова секція (PM) і хвилевід довжиною 1 см. Вихідний оптичний сигнал випромінюється від передньої антивідблискової (AR) межі лазера DFB[23].

Рис. 1.11, б – показує внутрішню структуру пакувального модуля: мікросмужкові лінії де з'єднують різні активні секції PIC з роз'ємами SMA, а термоелектричне охолодження пристрою забезпечує надзвичайно стабільний контроль температури. Волокно-стружкова муфта виконана з конічного волокна з антивідбиваючим покриттям. На рис. 1.11, в – упакований модуль.

Синхронізація хаотичних ланцюгів була гаряче продемонстрована в минулому, розкриваючи необхідність ідентичності між пов'язаними генераторами для ефективного здійснення відтворення хаотичних послідовностей.

Особливо, коли такі генератори стають більш складними і витонченими з точки зору їх конструкції, виготовлення та умов експлуатації, шлях до синхронізації хаосу не є більш простим. Модулі PIC, які використовуються в цій

роботі, підтримують конфігурації приймача зі зворотним зв'язком, які передбачають в приймачі точну копію PIC випромінювача.

У разі повної ідентифікації пристрою можуть бути отримані поліпшені характеристики синхронізації порівняно з архітектурами приймача з розімкненим контуром, які включають в себе тільки ідентичну лазерну секцію і відкидають існування будь-яких зовнішніх активних середовищ. Це невідповідність створює підвищену безпеку в системах зв'язку зі зворотним зв'язком, оскільки приймач з прослуховуванням стає все більш вимогливим у своїх специфікаціях. Стандартизований процес виготовлення розроблених PIC гарантує прийнятну відповідність внутрішніх параметрів, робочих характеристик і довжина активного середовища для всіх пристроїв; однак навіть з однієї і тієї ж виробничої пластини лише кілька узгоджених пар з десятків пристроїв виявляються ідентичними для забезпечення ефективної синхронізації зі зворотним зв'язком [24].

Простий спосіб оцінки якості синхронізації цих несучих полягає у вимірюванні їх ефективності подавлення після перетворення хаотичних оптичних сигналів в електричні сигнали і вимірювання коефіцієнта електричного подавлення, які визначаються як:

$$c_{\Delta f}{}^{E}(dB) = \left\langle \left| P_t{}^{E}(f) \right| \right\rangle_{\Delta f}(dBm) - \left\langle \left| P_t{}^{E}(f) - P_r{}^{E}(f) \right| \right\rangle_{\Delta f}(dBm), \qquad (1.1)$$

де $P_t{}^{E}(f) - P_r{}^{E}(f)$ – значення електричної потужності передавача і вихідного сигналу приймача на певній частоті *f*. У формулі (1.1) усереднення виконується в частотній області і відноситься до ширини смуги частот Δf несучої. Як встановлено з проведеного дослідження, подібність спектрального розподілу вибраних несучих узгодженої пари є практичним керівництвом для досягнення ефективної синхронізації.

Пара генеруючих хаос PIC з незначними невідповідностями – менше 5 % за своїм внутрішнім і робочими параметрами, а також за їх спектральним профілями випромінювання – була обрана в якості підсистеми передавач/приймач, забезпечуючи ефективне шифрування даних на стороні випромінювача і

вилучення даних на стороні одержувача. У двох випадках, показаних на рис. 1.12, а та 1.12, б, незв'язана пара узгоджених PIC, взятих з однієї і тієї ж пластини, забезпечує майже однаковий розподіл спектрального профілю (випромінювач: чорна лінія, приймач: червона лінія), застосовуючи відповідні умови роботи. Після одно направленого підключення PIC шляхом подачі невеликої кількості оптичної потужності від випромінювача до приймача – до трьох разів оптичний зворотний зв'язок PIC – подавлення хаосу між двома сигналами (синя лінія) долає навіть 20 дБ в деяких вузьких спектральних областях. Значення коефіцієнта електричної компенсації, досягають 16 дБ, були виміряні в смузі частот 10 ГГц, що означає, що при використанні в конфігурації передавач-приймач хаотичний сигнал несе в кінцевому підсумку буде усунутий з співвідношенням ~ 97 %.

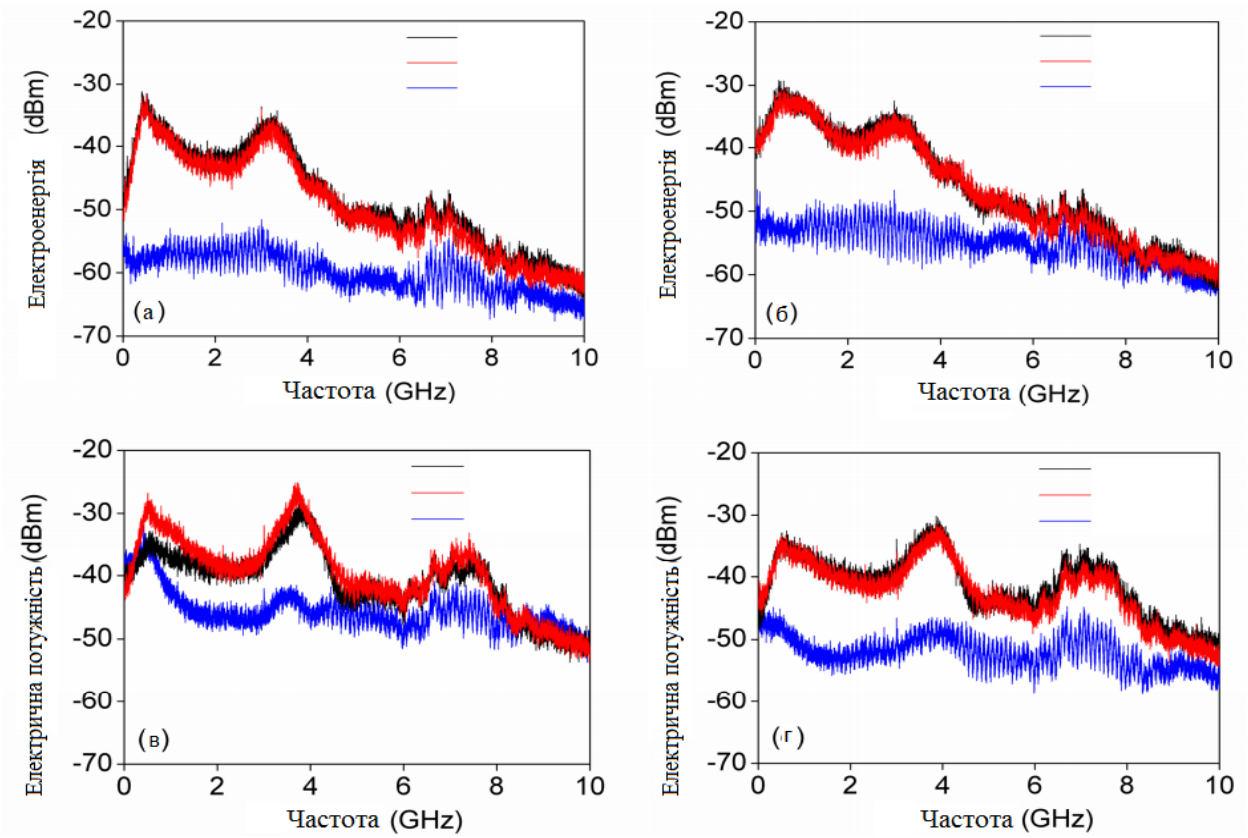


Рисунок 1.12 – Синхронізація між хаотичними носіями, випромінюваними PIC узгодженими парами

Навпаки, навіть у PIC узгодженої з парою будь невелика розбіжність в випромінюваних спектральних профілях із-за неправильних умов роботи призводить до погіршення характеристик скасування після з'єднання (рис. 1.12, в).

У такому випадку точна настройка параметрів управління PIC, які впливають на спектральний розподіл випромінювання, може збалансувати спектральне узгодження і поліпшити синхронізацію рис. 1.12, г.

Спектральний розподіл хаотичних сигналів, випромінюваних PIC емітера (чорний), PIC приймача (червоний) і їх віднімання на приймачі (синій) для різних робочих умов.

Таблиця 1.1 підсумовує характеристики випадків, представлених на рис. 1.12, з точки зору двох різних смуг пропускання сигналу. Смуга пропускання 10 ГГц – це повна ширина смуги виявлення системи, обмежена пропускною здатністю фотоприймачів, в той час як смуга 2,5 ГГц покриває область спектра, що представляє інтерес для системи зв'язку на рис. 1.12, яка підтримує швидкості передачі даних до 2,5 Гіб/с. Відсутність потужних високочастотних хаотичних компонентів (більше 5 ГГц) і більш ефективна синхронізація в низькочастотних хаотичних компонентах (до 4 ГГц) призводять до збільшення значень 2,4 ГГц в порівнянні з відповідними значеннями 10 ГГц.

Таблиця 1.1 Електричне подавлення хаотичних несучих при використанні різної пропускної здатності та умов синхронізації

Умови синхронізації	Коефіцієнт електричного подалення хаотичного носія $C_{\Delta f}{}^{E}$ (dB)	
	Δf:DC−10,Ггц	Δf:DC−2,5,Ггц
Рисунок 1.12, а	16,0	17,7
Рисунок 1.12, б	14,4	16,7
Рисунок 1.12, в	4,6	5,1
Рисунок 1.12, г	11,0	12,1

Залежно від умов роботи PIC можуть бути отримані різні сигнали радіочастотного спектрального розподілу хаотичних носіїв.

Для додатків шифрування даних відповідні завдання виникають з завдання приховати всі спектральні компоненти переданих повідомлень.

Ряди даних, які кодуються за допомогою модуляції основної смуги частот на цих несучих, запитують потужні хаотичні компоненти в своїй покриває спектральної області. У той же час оптимізована синхронізація системи повинна

бути збережена. Робочі умови, відповідних випадків, представленим на рис. 1.12, а та 1.12, б підтримують вищезгадані попередні умови зі значеннями 2,4 ГГц більше 16 дБ (табл. 1.1).

У системному підході очікується, що наявність зашифрованого повідомлення вплине на продуктивність синхронізації за рахунок зниження ефективності остаточного скасування [29].

Однак малі амплітуди повідомлень, зашифровані в таких системах – до 12 % від середньої оптичної потужності несучої хвилі – викликають незначне зниження ефективності подавлення аж до всього 1–2 дБ. З огляду на те, що відновлене повідомлення з SNR 12 дБ може бути виявлено з частотою помилок нижче 10^{-12}, ефективність скасування, що забезпечується вивченими PIC, може вважатися достатньою.

Топологія експерименту з передачі хаос-захищених даних з використанням генераторів хаосу PIC. Послідовності даних застосовуються до хаотичного носію, що генерується PIC (майстром) випромінювача за допомогою зовнішньої модуляції. Після 100 км передачі по лініях зв'язку з компенсацією дисперсії 150 мкВт переданого хаотичного сигналу вводиться в PIC (підлеглий) приймача, змушуючи його синхронізуватися з хаотичною динамікою інжектуємого входу (рис. 1.13)

Віднімання між переданим хаотичним носієм із зашифрованим повідомленням і локально згенерованих хаотичним носієм на приймачі призводить до хаотичної скасування носія і електричному відновленню даних (тонкі лінії: оптичні волокна, товсті лінії: електричні кабелі, OI – оптичний ізолятор, PC – контролер поляризації, EDFA – ербієвий волоконний підсилювач, SMF – одномодове волокно, DCF – волокно з компенсацією дисперсії, 50/50 – оптичний відгалужувач, APD – лавинний фотоприймач) (рис. 1.13).

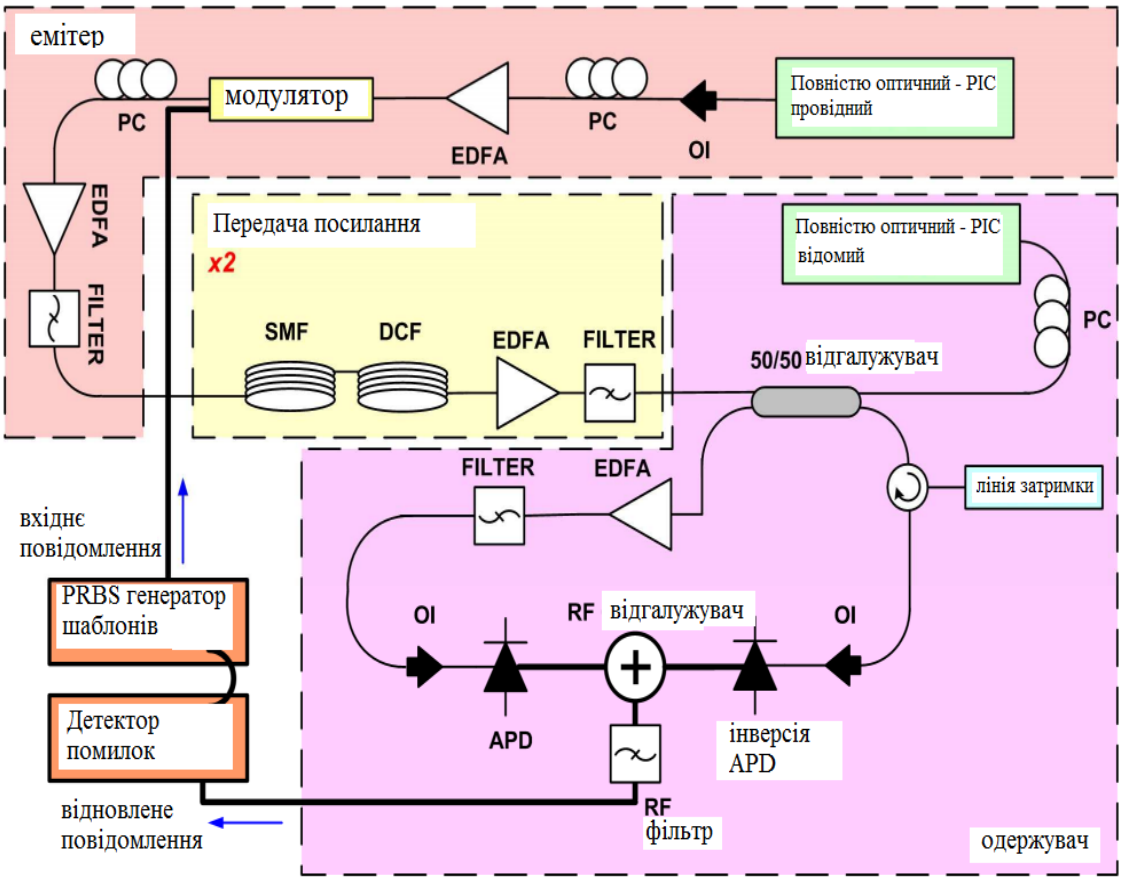


Рисунок 1.13 – Топологія експерименту з передачі хаос-захищених даних з використанням генераторів хаосу PIC

Структура 100-кілометрової передавальної системи, заснованої на хаотичних несучих, була реалізована та показана на рис. 1.13. Обидва PIC, обрані на випромінювачі і приймачі, випромінюють оптичні несучі точно з (1556,111 ± 0,001) нм, та їх робочі умови відповідають у разі рис. 1.13.

Закодовані дані представляють собою ПВДП (псевдовипадкова двійкова послідовність) з регульованою амплітудою та застосовуються зовні з використанням електрооптичного модулятора $LiNbO_3$ 10 Гбіт/с. Оптичний сигнал посилюється ПВДП, за яким слід смуговий оптичний фільтр для подавленя підсиленого спонтанного випромінювання та запускається в лінію передачі.

Два однакових послідовно з'єднаних каналу передачі з компенсацією дисперсії, кожна з яких складається з 50 км SMF, 6 км DCF і необхідних ступенів посилення, направляють зашифровані дані хаосу в приймач [25].

Оптична потужність широкосмугового сигналу, які надсилаються для передачі по волоконно-оптичному зв'язку на десятки або сотні кілометрів, це є ключовим параметром.

Оптичні сигнали малої потужності чутливі до шуму, що виходить від підсилювачів, тоді як оптичні сигнали високої потужності викликають нелінійні ефекти, які змінюють передані хаотичні сигнали. Обидва крайніх випадків призводять до погіршення характеристик синхронізації на приймачі. Найкращі характеристики синхронізації були досягнуті при вхідній оптичній потужності від 2,5 мВт до 4,5 мВт. Таким чином, оптимальне значення 4 мВт розглядалося для того, щоб зберегти потужність сигналу якомога вище, та в той же час, мінімізувати вплив погіршень передачі.

Приймач синхронізується тільки з флуктуаціями хаотичного сигналу після введення невеликої частки до 3-кратної потужності оптичного зворотного зв'язку PIC випромінювача сигналу, що передається в PIC приймач. Тимчасове вирівнювання через оптичну лінію затримки і вирівнювання потужності – через посилення двох сигналів, які передаються по різним оптичним кабелями приймача, призводить до хаотичного подавлення несучої та електричному відновленню даних.

Віднімання практично виконується шляхом складання електрично перетворених сигналів після інвертування сигналів випромінювача з використанням фотоприймача що інвертує. Відповідні мікрохвильові фільтри використовувалися на етапі відновлення для подавлення небажаних залишкових спектральних компонентів, що виникають при відніманні, і завжди смуга пропускання узгоджується зі швидкістю передачі даних: 1,1 ГГц, для 1,25 Гбіт/с та 2 ГГц, для 2,5 Гбіт/с відповідно.

Філософія представленої системи зв'язку двояка. З одного боку, випромінювач відправляє повністю прихований потік даних у хаотичній несучій по лінії передачі, і це досягається для конкретної хаотичної несучої шляхом обмеження амплітуди повідомлення до максимального значення.

З іншого боку, перед одержувачем стоїть завдання скасувати хаотичну несучу і відновити дані з мінімальною частотою помилок по бітам, необхідної для

отримання коефіцієнтів помилок нижче 10^{-12}з використанням методів кодування. Поліпшення BER досягається за допомогою додаткового блоку обробки даних, який використовує швидкий приймач.

Приймач, який використовується для генерації патернів і виявлення помилок, був частиною пристрою FPGA і був налаштований для відповідності різним комерційним стандартам, таким як GigabitEthernet та Sonet/SDH. У приймальнику він виконує відновлення тактової частоти і даних вхідного потоку бітів. Для швидкості передачі даних 1,25 Гбіт/с він був налаштований на сумісність з GigabitEthernet, в той час як для швидкості передачі даних 2,5 Гбіт/с він був налаштований на відповідність SerialRapidIO. В обох випадках схема кодування/декодування 8B/10B була деактивована, та довжина ПВДП не змінилася.

Метод FEC, який використовується для поліпшення внутрішніх відновлених даних, використовував код ReedSolomon (RS) (255), де 32 контрольних символів були додані до кожним 223-х символів корисної інформації, що призвело до накладних витрат в 14,35 %. Частинка поля Галуа становить 28 (256) з 8-бітними довгими символами.

Ця конфігурація дозволяє коригувати до 16 символів на кожне кодове слово (255 символів), а це означає, що безпомилкова операція може бути досягнута, поки вхідний BER досягає $6{,}3\times 10^{-2}$. Це теоретичне граничне значення відноситься до ідеальної ситуації, коли в кожному кодовому слові рівно 16 помилкових символів. Для конкретної вивченої системи порогове значення виявилося рівним $\Re = 1{,}8\times 10^{-3}$ через помилкові пакети даних. Ефективні швидкості передачі даних для простих каналів зв'язку 1,25 Гбіт/с і 2,5 Гбіт/с складають 1,09375 Гбіт/с та 2,1875 Гбіт/с відповідно.

Схема FEC була реалізована разом з тестером BER у пристрої польового програмованого масиву (ППМ).

Невеликі амплітуди повідомлень, які зовні модулюють хаотичний носій, можуть бути повністю сховані в хаотичному сигналі. Амплітуда повідомлення має велике значення в цьому методі шифрування, забезпечує подвійну перевагу: низькі амплітуди повідомлення не можуть бути помітні при торканні лінії

передачі і не схильні до фільтрації, в той же час вони сприяють успішному відновленню тільки авторизованим користувачем з ідентичним приймачем. Послідовності даних малої амплітуди з SNR всього 12 дБ можуть привести до часткового відновлення, яке може бути значно покращено до частоти помилок нижче 10^{-12} з використанням методів прямого виправлення помилок (FEC).Оцінка цієї системи з точки зору шифрування і відновлення даних виконується через коефіцієнт помилок по бітам (BER) в залежності від застосовуваної амплітуди повідомлення, як показано на рис. 1.13. Цей аналіз не слід типовою формою кривих BER, які характеризують традиційні системи оптичного зв'язку, які виражаються в залежності від оптичної потужності в приймачі. У даній роботі основне дослідження полягає в одночасному досягненні шифрування даних по лінії передачі і ефективному відновленні даних постобробці до значень BER нижче, ніж 10^{-12}– уповноваженим одержувачем.

Вимірювання частоти помилок по бітам (BER) в залежності від амплітуди даних для 1,25 Гбіт/с та 2,5Гбіт/с.

Такі значення амплітуди забезпечують ефективне відновлення даних, властиві значення BER нижче $\Re = 1{,}8\ 10^{-3}$ (випадок I). Граничне значення помилки якщо визначає, чи буде, при застосуванні ступені FEC з використанням відповідного приймача, значення BER, принаймні 10^{-12} . Однак такі великі амплітуди діють за рахунок якості шифрування повідомлень, яке нижче 0,5, що вказує на те, що "підслухач" може витягувати деякі біти з прямим виявленням. Друга робоча область з амплітудами повідомлень від 12 % до 4,5 % – забезпечує те, що потрібно: рівень шифрування, який відповідає значенню BER з прослуховуванням, що дорівнює 0,5, відновлені дані в приймачі з притаманним BER нижче значення та після FEC BER продуктивність 10^{-12} в максимумі.

Нарешті, навіть менші амплітуди (нижче 4,5 %), які також зберігають безпечне шифрування даних, не можуть привести до ефективного відновлення, оскільки власні значення BER перевищують значення $\Re$, що забезпечує помилки в процесі декодування навіть для авторизованого приймача, який використовує

метод FEC. Аналогічне дослідження проводиться після подвоєння швидкості передачі даних до 2,5 Гбіт/с.

Розширена смуга пропускання повідомлення викликає іншу ефективність шифрування порівняно з попереднім випадком; проте, як і раніше, великі амплітуди повідомлень не можуть бути достатньо зашифровані. Безпечна передача може бути отримана значно більш вузькому робочому вікні значень амплітуди близько 10 % –з шифруванням на рівні 0,5 і задовільною продуктивністю після FEC

При пропуску лінії передачі, що працює таким чином в конфігурації «спина до спини», продуктивність BER точно така ж для випадку потоків даних 1,25 Гбіт/с і трохи краще (менше ніж на порядок) для випадку 2,5 Гбіт/с. Така поведінка підтверджує, що передача не викликає його погіршення на низьких швидкостях передачі даних.

Такі результати вказують на те, що, ймовірно, можна використовувати набагато довшу лінію передачі, не впливаючи на кінцеву продуктивність конкретної системи зв'язку.

Нарешті, суттєвою проблемою для експлуатації таких систем в реальних умовах є їх експлуатаційна стабільність і стійкість протягом тривалих періодів часу. Хаотичні носії повинні зберігати свої характеристики, що забезпечують початкове шифрування, а синхронізація між хаотичними носіями після включення ліній передачі повинна точно контролюватися.

Аналіз стабільності, виконаний в представленій системі, показав, що вбудовані безладні PIC виявилися надійним рішенням з точки зору захисту волоконно-оптичних ліній зв'язку після безперервної роботи протягом сотень годин, гарантуючи, таким чином, стабільну продуктивність шифрування і відновлення. Компактні монолітні PIC, які генерують складні хаотичні носії, тестуються в системах оптичної передачі, щоб забезпечити додатковий рівень безпеки при обміні даними в реальному часі. Надзвичайно стабільна синхронізація високої якості зі зворотним зв'язком вперше продемонстрована в хаотичних системах, які включають 100 км шляху передачі. Послідовності даних

в гегабітах в секунду з малими амплітудами модуляції повністю зашифровані в цих хаотичних сигналах.

Авторизовані аналоги, забезпечені однаковими PIC та модулем FEC, можуть забезпечити обмін даними BER зі швидкістю 10^{-12} при швидкості передачі даних до 2,5 Гбіт/с. Навпаки, для підслуховування, які стосуються лінії передачі або неавторизовані користувачі, забезпечені незбіжними апаратними приймачами, відчувають погану продуктивність виявлення BER, яка не може бути додатково покращена з обробкою FEC.

Таким чином, надійні фотонні інтегровані випромінювачі хаосу стануть доступні для безпосереднього і ефективного включення в якості модулів оптичних приймачів у встановлених системах повністю прозорих для верхніх рівнів мережі для високошвидкісної передачі зашифрованих даних.

Для будь-якої практичної системи зв'язку можливість множинного доступу є суттєвою. Ранні дослідження систем зв'язку, заснованих на хаосі, були зосереджені на разі одного користувача. В останні кілька років було докладено більше зусиль для дослідження систем з можливістю множинного доступу, що є ключовою особливістю систем зв'язку з розширеним спектром. Проте, вивчення багатокористувацьких можливостей заснованих на хаосі комунікацій в реальних середовищах все ще перебуває на ранніх стадіях розвитку.

Метод, заснований на мультиплексировании хаотичних сигналів, був запропонований Керроллом і Пекора, та деякі засновані на хаосі підходи для генерації кодів розширення були застосовані до звичайних систем множинного доступу з кодовим розділенням каналів.

Був також запропонований множинний доступ з використанням DCSK і FM-DCSK. Щоб мінімізувати перешкоди в суміщеному каналі, Kolumbanta інші. Запропоновано багато користувачів схема FM-DCSK, в якій хаотичний сигнал об'єднується з двома функціями Уолша для формування базових функцій, що представляють символи +1 і –1 для кожного користувача.

В якості ще однієї можливості чисельно продемонстрували можливість генерування хаотичного сигналу з обмеженою смугою частот і використання

традиційного мультиплексування з частотним поділом для розширених можливостей системи зв'язку на основі хаосу (рис 1.14).

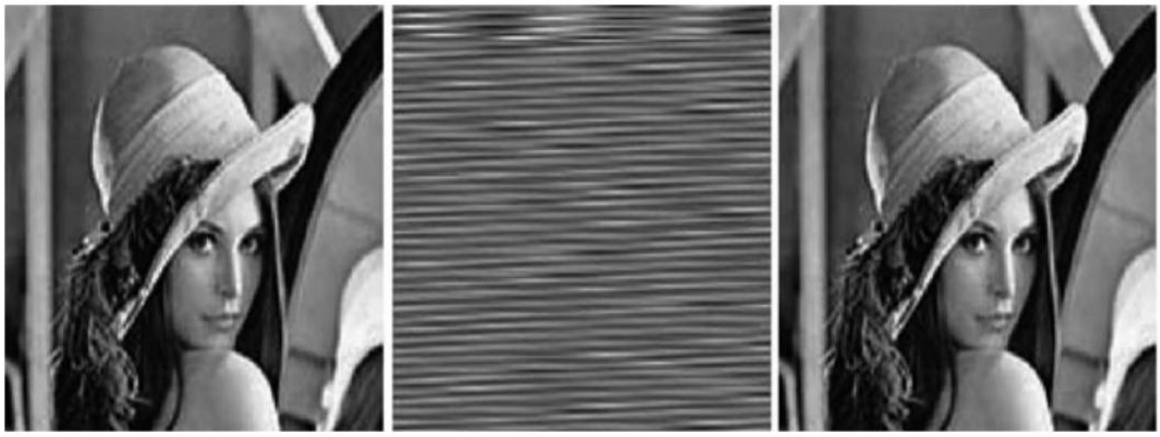


Рисунок 1.14 – Картинка зашифрована та розшифрована з використанням хаосу

Однією з найважливіших характеристик зв'язку на основі хаосу є можливість реалізації криптографії на фізичному рівні, оскільки хаос має багато бажаних характеристик з точки зору криптографії, а саме: складність, ергодичність, транзитивність, детермінізм і чутливість до початкових умов і обурення.

Хоча криптографічні "Предикати хаосу" досить суперечливі, особливо щодо питань безпеки, широке використання хаосу може стосуватися обмежень у деяких країнах, де діють суворі правила щодо приватного використання шифрування.

Масове використання високошвидкісного шифрування в реальному часі на фізичному рівні було б чи побічним продуктом комунікації, заснованої на хаосі, і, якщо, з одного боку, безпеку хаотичного шифрування сумнівна, з іншого боку, це дійсно ускладнює його. контролювати і отримувати доступ до інформації. Такий факт, безумовно, може стати перешкодою для широкого використання схем комунікації, заснованих на хаосі, оскільки він може зачіпати давні правові питання, що стосуються секретності інформації в багатьох країнах:

– оптична зв'язок: когерентний CSK був успішно реалізований з характеристиками, аналогічними звичайним системам. Оскільки оптичні канали наближаються до безшумному, чутливість синхронізації хаосу до шуму не є актуальною проблемою, і хаос може забезпечити додатковий рівень безпеки;

– бездротовий зв'язок: реальні бездротові канали являють собою шум, багатопроменеве поширення і затримку, тому багато хто з пропонованих систем зв'язку на основі хаосу просто не працюють. Однак багато досліджень спрямовані на те, щоб дослідити рішення проблем, що виникають через ці неідеальних та притаманні характеристики каналу;

–передача інформації про положення супутників просторі: багато дрібніших супутники співпрацюють для виконання завдань, які були б неможливі з одним монолітним супутником, таких як розподілені вимірювання для радара з синтезованою апертурою.

Через розподіленого характеру місії синхронізація між годинами супутників необхідна для координації, наприклад, коли необхідно співставити дані, отримані з різних супутників. Через відстаней тимчасові затримки генеруються, коли інформація передається між супутниками, і в цьому сценарії може бути використана ізохронна синхронізація.

Передача інформації про положення супутників просторі: багато дрібніших супутники співпрацюють для виконання завдань, які були б неможливі з одним монолітним супутником, таких як розподілені вимірювання для радара з синтезованою апертурою. Через розподіленого характеру місії синхронізація між годинами супутників необхідна для координації, наприклад, коли необхідно співставити дані, отримані з різних супутників. Через відстаней тимчасові затримки генеруються, коли інформація передається між супутниками, і в цьому сценарії може бути використана ізохронна синхронізація;

Криптографія: можливо, це тема, яка отримує більшу частину публікацій в додатках хаосу. Характеристики хаосу були використані в сотнях методів, запропонованих в літературі.

Так як традиційні методи комунікації управляють досить добре, використання такої великої кількості часу і енергії для розробки методів, заснованих на хаосі, породжує питання, чи варто це спробувати. Однак, з огляду на абсолютно нові теоретичні можливості, які створює хаос, і все більш і більш складні сценарії, в яких надійна, високошвидкісна і ефективна зв'язок

На загальну думку, дослідження комунікації хаосу є далекоглядною мірою. Або в тому випадку, якщо результат будуть успішним, або ні в плані широкого використання такої техніки, предмети, пов'язані з хаосом, надали багато ідей в різних важливих галузях, що становлять науковий інтерес, таких як медицина, соціальні науки, фізика та інженерія. По суті, це можна розглядати як суттєвий науковий внесок.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗВИТОК ПРИКЛАДНИХ МЕТОДІВ ТОПОЛОГІЧНОЇ ФОТОНІКИ

З моменту свого створення, лазер стимулював уяву вчених практично у всіх областях діяльності. Незвичайні властивості лазерного променя розкрилися для дослідження невивчених областей в широкому спектрі електромагнітних випромінювань.

На сьогодні лазер дозволяє робить можливим використання енергії електромагнітного випромінювання і надалі формування їх оптичних властивостей. Внаслідок цього, лазер вже знайшов кілька успішних застосувань в таких різноманітних галузях, як металургія, хімія і медицина.

Модуляція і демодуляція лазерного випромінювання є основними проблеми, які зараз вирішуються інженерами в комунікації в надії на той що призведе до швидкого практичного застосування [26]. Дивовижні теоретичні можливості лазера в цій області дозволяють вирішити проблеми космічного зв'язку. Наземні комунікації зіткнулися з неменш складною проблемою як проблема проходження лазерних променів через атмосферу.

Останнє також становить інтерес для метеорологів, а також передачі даних на відстані. Ідеї були запропоновані і немає ніяких сумнівів в тому, що деякі з них знаходяться в стадії теоретичного дослідження в даний час.

Завдяки гнучкості і різноманітності систем фотоніки, ця область також відкриває нові можливості для реалізації екзотичних топологічних моделей і дослідження і використання топологічних ефектів новими методами.

Всі об'єкти дослідження характеристик і управління ними класифікуються як відкриті нелінійні динамічні системи (НДС). До їхніх загальних характеристик відносяться:нелінійність динаміки, сильна залежність від початкових умов і зовнішніх впливів, можливість хаотичного поведінки і самоорганізації.

Для виконання дослідження і реалізації управління системою НДС треба було скласти комплекс методів та вимірів. Один з них це: "Фрактальний аналіз".

2.1 Математичні методи дослідження

В якості захоплюючої перспективи топологічна фотоніка може поєднуватися з оптичні нелінійностями, приводячи до нових колективним явищ і нових сильно-корельованих станів світла. Розвиваючись, як самостійне математичний напрямок, топологія зарекомендувала себе як ефективна теорія дослідження складних процесів. Топологічний аналіз розглядається як перспективний напрямок розвитку теорії дослідження нелінійних динамічних систем, є інструментом аналізу нелінійної метрології. Розвивається останнім часом топологічна фотоніка – новий напрямок, що вивчає питання реалізації топологічних ефектів в фотонних кристалах, пов'язаних резонаторах, метаматеріалів і квазікристалів. Застосовуються топологічні методи, зокрема фрактальний аналіз, для аналізу зображень Основоположник теорії фракталів франко-американський математик Бенуа Мандельброт створив термін фрактал від латинського “fractus”. Фракталами називаються геометричні об'єкти: лінії, поверхні, просторові тіла, що мають сильно порізаний форму і володіють властивістю самоподібності. Самоподібність як основна характеристика фрактала означає, що він більш-менш одноманітно влаштований в широкому діапазоні масштабів.

Це зумовлює масштабну інваріантність основних геометричних особливостей фрактального об'єкта, їх незмінність при зміні масштабу. Для реального природного фрактала існують деякі мінімальні l_{min} та l_{max} і максимальні масштаби довжини, що обмежують область $l_{min} << l << l_{max}$ за межами якої основна властивість фрактала, самоподібність пропадає.

Фрактальні форми дивно широко поширені в природі (берегова лінія, гористий рельєф, річка, дерево так далі). Відомі фрактальні структури речовин, фрактальні структури множин і випадкових процесів.

При проведенні фізичних досліджень (в тому числі і оптичних) фрактальні ознаки можуть бути виявлені в структурі реєстрованих сигналів і полів. Використовуючи поняття фрактальної розмірності, Мандельброт дав більш суворе, визначення фрактала [4]. Згідно з цим визначенням фрактал являє собою

об'єкт, розмірність Хаусдорфа-Безиковича якого більше його топологічної розмірності (0 – для розсипу точок, 1 – для кривої, 2 – для поверхні і тощо):

$$D = -\lim_{I \to 0} \frac{\ln N(I)}{\ln I}, \tag{2.1}$$

де D – називається розмірністю Хаусдорфа-Безиковича або фрактальною розмірністю цього об'єкта.

Це і служить загальним визначенням фрактальної розмірності *D.* Відповідно до нього величина D є локальною характеристикою даного об'єкта. Абсолютно ясно, що отримали б при оцінці фрактальної розмірності той же самий результат, якби використовували процедуру покриття фрактала кубами (квадратами, якщо фрактальний об'єкт розташовується на площині). Іноді покриття здійснюється елементами, з яких складається даний фрактал. У цьому випадку має місце спрощений варіант формули для визначення фрактальної розмірності.

2.2 Класифікація фракталів

Регулярні фрактали як приклад вид фракталів можна буде привести як три об'єкти: канторівська множина, криву Коха і серветку Серпінського.

Процедура побудови однорідної канторівської множини полягає в отриманні такої картини (рис 2.1.) Спочатку береться відрізок прямої одиничної довжини. Потім він ділиться на три рівні частини, і виймається відрізок в середині, що знаходиться між точками 1/3 і 2/3.

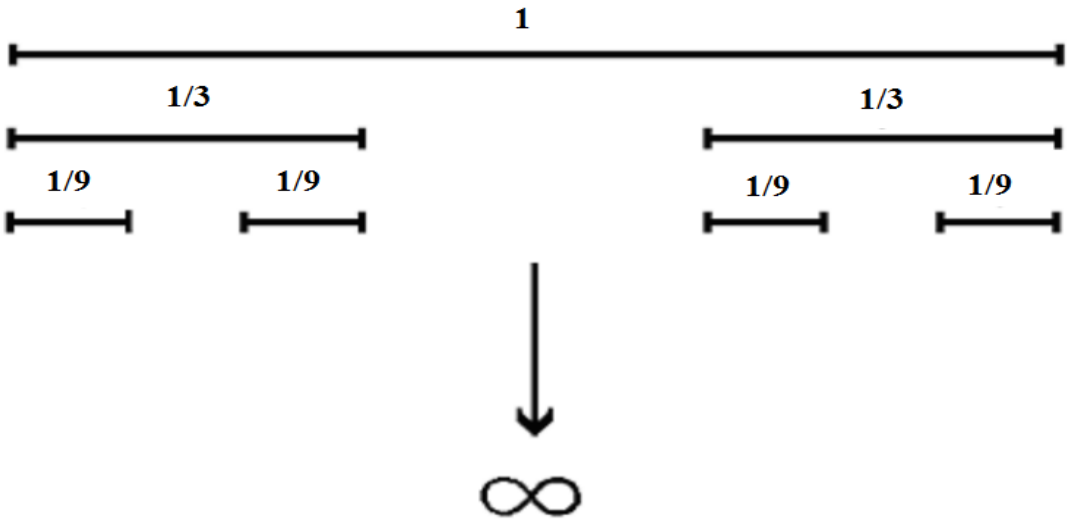


Рисунок 2.1 – Зображення канторівської множини

На другому кроці подібної ж процедури розподілу на три рівні частини і подальшого видалення середини піддається кожний із двох відрізків. Так триває до нескінченності. Неважко бачити, що сумарна довжина (міра) одержані в межі відрізків дорівнює нулю, так як ми виключили в результаті довжину, рівну 1.

Отже, виникла безліч, що являє собою нескінченне число ізольованих точок, яке і отримало назву канторівської множини.

Скористаємося для цього, формулою (2.1). Зрозуміло, що на *n*-му кроці побудови в 2^n відрізків довжиною $1/3^n$ кожен. Тому в якості *N(I)* на цьому кроці можемо взяти величину 2^n, а в якості I – величину $1/3^n$. Межа $I \to 0$ відповідає межі $I \to \infty$. Тому фрактальна розмірність дорівнює:

$$D = -\lim_{I \to 0} \frac{\ln 2^n}{\ln(1/3^n)} = \frac{\ln 2}{\ln 3} = 0,63. \qquad (2.2)$$

Ця формула показала що виявилася менше Евклідовій розмірності простору ($d = 1$), в якому розташовується ця безліч, але все-таки, незважаючи на те, що довжина його дорівнює нулю, відмінна від нуля, тобто більше топологічної розмірності елементів (точок) цієї множини K_0.

Крива Коха будується наступним чином (рис. 2.2). Нехай K_0– початковий відрізок (рис. 2.2, а). Приберемо середню третину і додамо два нових відрізка такої ж довжини, як показано на (рис. 2.2, б). Назвемо отриману множину K_1. Повторимо цю процедуру багато разів, на кожному кроці замінюючи середню третину двома новими відрізками. Позначимо через K_n фігуру, отриману після n-го кроку. Послідовність кривих $\{K_n\}^{\infty}{}_{n=1}$ сходиться до деякої граничної кривої яка і називається кривою Коха.

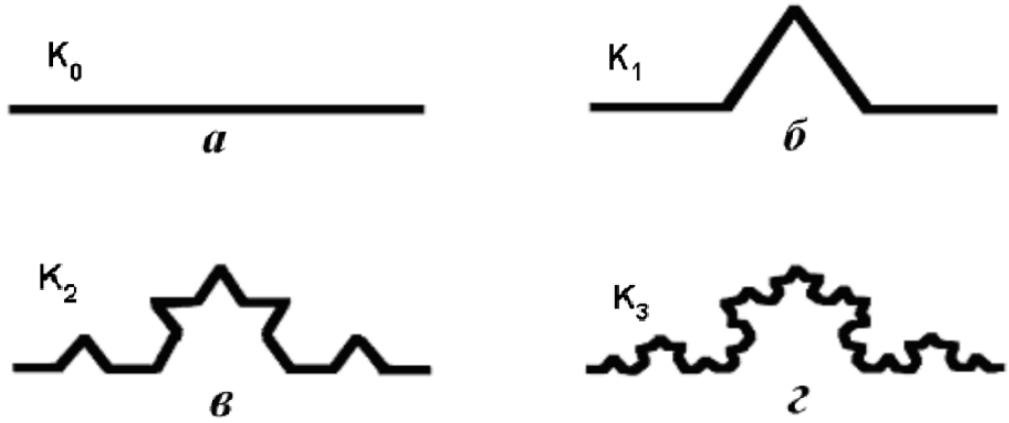


Рисунок 2.2 – Етапи побудови кривої Коха

Підрахуємо її фрактальну розмірність. Візьмемо в якості довжини довжину початкового відрізка $I = 1$, тоді число відрізків такої довжини, які покривають криву Коха на цьому (нульовому) кроці (рис. 2.2, а), так само $N_1(I) = 1$. Потім при переході до наступного кроку (рис 2.2, б) маємо: $I' = 1/3$, а число відрізків $N(I') = 4$.

Тому фрактальна розмірність кривої Коха дорівнює:

$$D = -\lim_{I \to 0} \frac{\ln(1/4)}{\ln(3)} = \frac{\ln 4}{\ln 3} = 1,2618. \qquad (2.3)$$

Ця величина більше одиниці (топологічної розмірності лінії), але менше Евклідовій розмірності площини, $d = 2$, на якій розташована крива. Ще одна важлива властивість, якою володіє крива Коха – її нескінченна довжина[27].

Дійсно, якщо вихідний відрізок K_0 має одиничну довжину, то довжина K_1 дорівнює $4/3$. Довжина кривої K_2 дорівнює $4^n/3^n$. Продовжуючи таким чином, маємо, що крива K_n після n-го кроку має довжину $4^n/3^n$. Отже, довжина граничної кривої K дорівнює нескінченності:

$$(\lim_{n\to\infty})4^n / 3^n = \infty. \tag{2.4}$$

Регулярний фрактал, називається серветкою Серпінського, виходить послідовним вирізанням центральних рівносторонніх трикутників так, як показано на рис. 2.3. Фрактальна розмірність серветки Серпінського також може бути підрахована за формулою:

$$D = \frac{\ln 3}{\ln 2} = 1{,}5849. \tag{2.5}$$

Формула записана з урахуванням того, що на нульовому кроці побудови серветки ми маємо один рівносторонній трикутник з довжиною сторони $I = 1$, а на наступному – три рівносторонніх трикутника зі сторонами $I' = 1/2$.

Тому при серветка має нульову площу, оскільки нескладно перевірити, що в процесі її побудови була виключена площа, в точності рівна площі вихідного трикутника [28]. Про це ж говорить і значення фрактальної розмірності $D < 2$, яка менше розмірності площини, на якій знаходиться цей об'єкт (рис. 2.3).

Рисунок 2.3 – Побудова серветки Серпінського

В результаті виходить "дірява" фігура (рис. 2.4), що складається з нескінченного числа ізольованих точок.

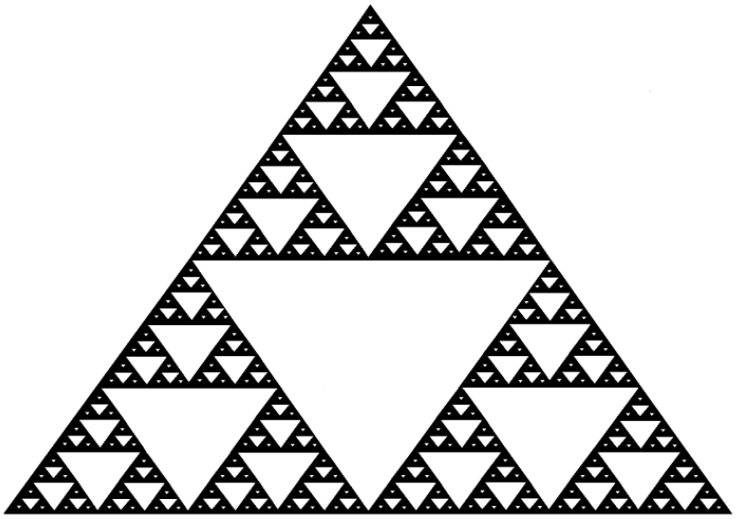


Рисунок 2.4 – Серветки Серпінського

Існує ще один, так званий рандомізований алгоритм побудови серветки Серпінського. Для його реалізації знову візьмемо рівносторонній трикутник з вершинами в точках, А, Б і В (рис. 2.5). Виберемо всередині трикутника довільним чином початкову точку 1.

З'єднаємо точку 1 з вершиною трикутника відрізком прямої і на його середині поставимо крапку 2. З'єднаємо тепер її з вершиною В або С. Вибір однієї з них слід здійснювати випадковим чином, використовуючи, наприклад, для цього підкидання монети [29].

На рис. 2.5 показаний випадок, коли обраній вершині відповідає точка 3.

Потім цю процедуру слід продовжити шляхом рівноймовірного вибору вершини або і т.д. В результаті на кожному кроці ми будемо отримувати все нові і нові точки (4, 5 та інші).

Незважаючи на елемент випадковості закладений в процедуру побудови множини, після досить великої кількості кроків його структура набуває характерну для серветки Серпінського форму.

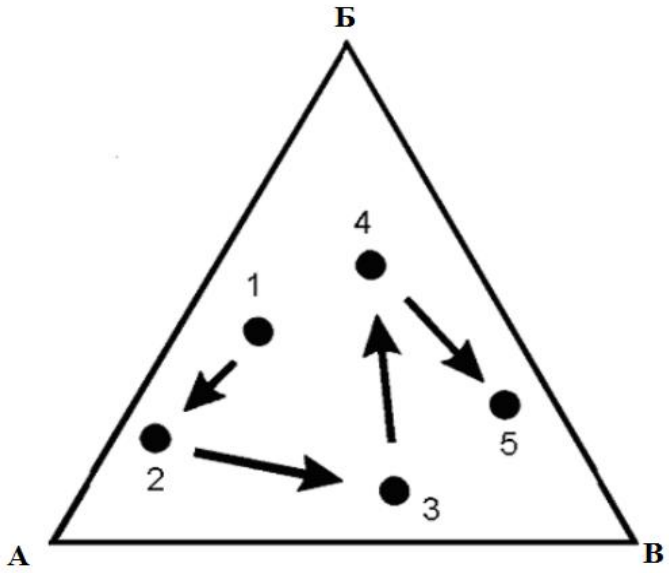


Рисунок 2.5 – Схема рандомізованого алгоритму побудови серветки Серпінського

На рис. 2.6 (зліва направо), показані структури, що складаються з 5 000, 10 000 і 50 000 точок. Видно, що в міру збільшення числа точок все виразніше проступає структура серветки Серпінського.

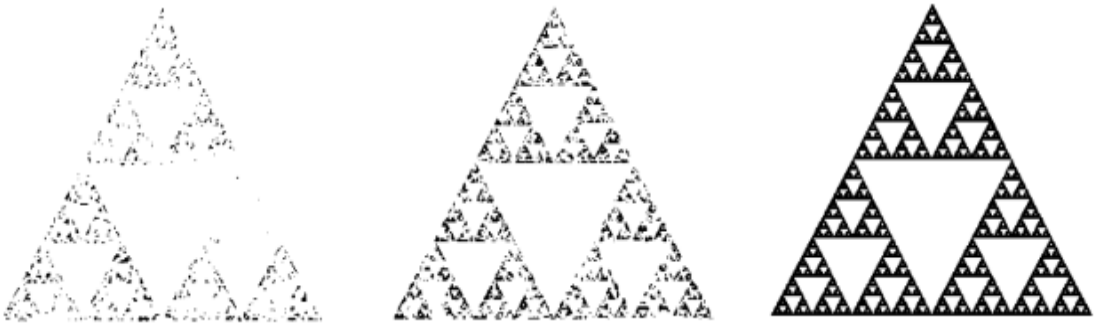


Рисунок 2.6 – Результати реалізації рандомізованого варіанта побудови серветки Серпінського

Таким чином, серветку Серпінського можна розглядати в якості аттрактора, до якого прагне безліч точок при прагненні до нескінченності числа кроків реалізації вищеописаної процедури.

2.3 Фрактали змінені або нерегулярні

Розглянуті алгоритми, використані для побудови регулярних фракталів, можуть бути модифіковані для побудови нерегулярних випадкових фракталів.

Наприклад, в разі серветки Серпінського, при побудові якого зазвичай видаляється середня з чотирьох трикутних областей (рис. 2.3), ми можемо випадково видаляти будь-який з чотирьох трикутників (рис. 2.7). В результаті отримаємо випадковий нерегулярний варіант серветки Серпінського. У кожного реального самоподібного процесу повинен бути найбільший і найменший масштаб: не можна нескінченно збільшувати або зменшувати масштаб. Однак в разі броунівського руху діапазон масштабів, в межах якого зберігається самоподоба, дуже великий – від розмірів посудини з рідиною (припустимо, 0,1 м) до довжини вільного пробігу молекул між зіткненнями, яка для малих пробних частинок може досягати 10^{-9} м.

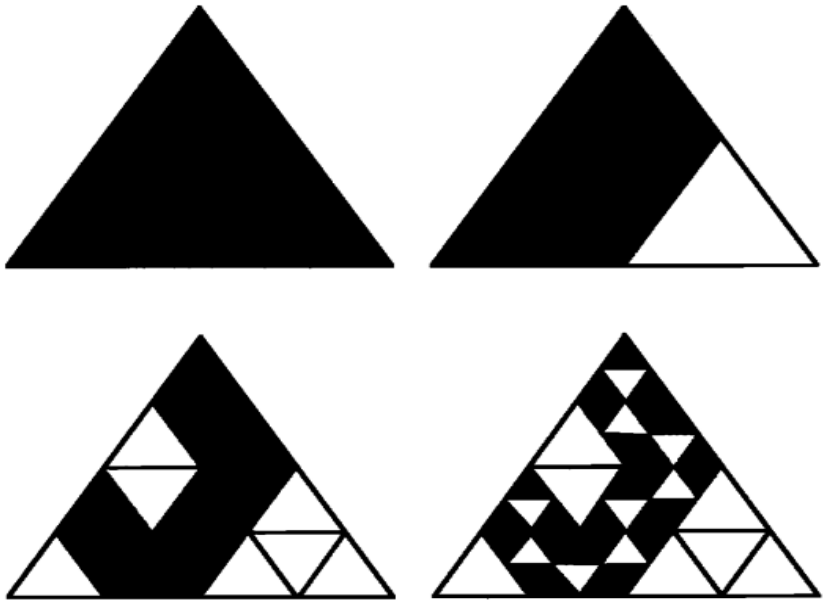


Рисунок 2.7 – Випадковий нерегулярний варіант

Багато випадків де об'єкти дослідження називаються самоподібними, якщо їх можна масштабувати з коефіцієнтом подібності 10 або навіть менше, скажімо,

за три дискретних кроку. Броунівський же рух витримує перетворення подібності з коефіцієнтом до 10^8.

2.4 Топологічна ідентифікація оптичного приладу спостереження ОПС

Представлення як фрактальну структуру сигналів пропонує топологічна модель ідентифікації. Розглянувши лазерну оптоелектронну систем(ЛОС), існуючі відповідно до типу: лазерний імпульс та поширюється в напрямку можливого розташування ОПС, відбиваючись від об'єкта, повертається назад.

Принцип дії таких ЛОС заснований на процесі сканування простору лазерним променем та дані про місцезнаходження відбиває, якій служить лінза об'єктива. Більш складні ЛОС дозволяють не тільки визначити координати прихованих ОПС, а й ідентифікувати і класифікувати.

Визначивши завдання ЛОС, ми змогли зробити висновок що стала можливим знаходження координати віддзеркалювальної поверхні та її ідентифікації. Завдання ідентифікації обумовлена необхідністю пошуку ОПС на фоні існуючих «помилкових» цілей з віддзеркалювальної поверхні.

Характерною особливістю ОПС є те, що на заломлюючі і відображають поверхні оптичних деталей наносять покриття, що представляють собою тонкі плівки різних речовин: металів і їх оксидів, діелектриків, кремній органічних сполук. Це дозволяє змінювати оптичні характеристики деталей і надавати їм нові фізичні властивості. На лінзи біноклів, фото- та відеокамер наносяться покриття, що просвітлюють, матеріал і товщина яких вибираються таким чином, що б пропускати випромінювання видимого діапазону. Практично не відображаються хвилі, для яких виконується умова. Для визначення D ряду $\{x_i\}$ (де x_i– і-те значення величини, $x, i = 1, \dots, n$) використовується метод нормованого розмаху, виведений емпіричним шляхом П. Хьорстом. Аналіз ряду $\{x_i\}$ дозволяє отримати показник Хьорстом H пов'язаний з D:

$$D = 2 - H. \tag{2.6}$$

Значення показника Хьорста знаходяться в інтервалі $0 \leq H \leq 1$ і визначаються через відношення R/σ, де R – розмах між максимальним і мінімальним значеннями функції збільшення $x(i,n)$, величина σ – середнє квадратичне відхилення:

$$R = \max_{1\leq i\leq n} x(i,n) - \min_{1\leq i\leq n} x(i,n); x(\mathrm{i,n}) = \sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x}_i), \quad (2.7)$$

де $\bar{x}_i$– середнє арифметичне значення.

Знання фрактальної розмірності D ряду $\{x_i\}$ дозволяє оцінити характер поведінки об'єкта вимірювання (або структури сигналу) і вибрати відповідний математичних апарат обробки результатів вимірювання [30].

Коли розглядають випадок багатошарового покриття необхідний діапазон довжин хвиль [λ_{min};λ_{max}]. Випромінювання з довжинами хвиль, що не входять в цей діапазон, відображаються, внаслідок накладення випромінювання, відбитого від різних шарів покриття спостерігається інтерференція в відбитих променях.

2.5 Постанова експерименту

ПЗС матриці, на основі яких виготовлені високочутливі ПЗС камери компанії Thorlabs, використовується в експерименті, інтегровані в герметичні вакуумні камери з вхідним вікном (рис. 2.8). ПЗС камери Thorlabs забезпечують широкий спектр функціональних можливостей, включаючи адаптивну систему об'єднання пікселів, різні тригери спрацьовування і синхронізації. Крім того нульова лінія (в спектроскопії, горизонтальна лінія, відповідна відсутності сигналу) і ПЗС матриці регулюються за допомогою фірмового програмного забезпечення.

Рисунок 2.8–ПЗС камера на стенді з лазером та призмою

Коли в відбитому оптичному сигналі існує слід взаємодії з покриттям призводить до можливості ідентифікації ОПС. Як об'єкт дослідження розглянемо площа перетину лазерного пучка відбитого від поверхні, покритої тонкою плівкою. За допомогою ПЗС-камери (рис. 2.9) був проведений аналіз площі перетину пучка, а так само з лінійним об'єктивом, що входить до складу ЛОС.

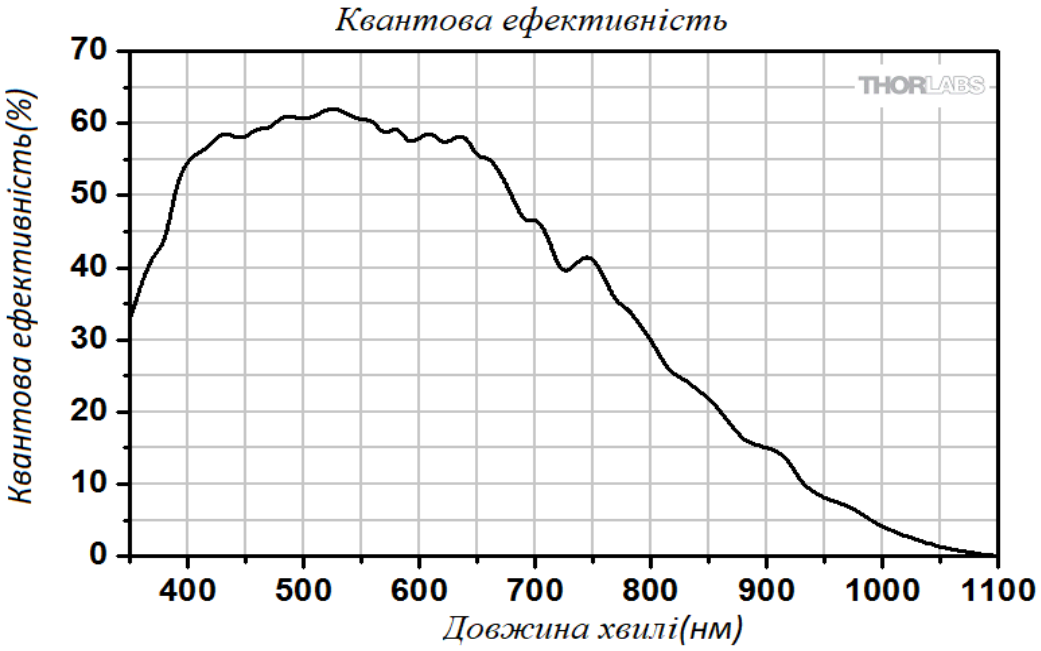


Рисунок 2.9 – Знімок зображення лазерного випромінювання за допомогою ПЗС-камери, і зафіксовано за допомогою програми ThorLabs

Камера дозволяє досліджувати розподіл інтенсивності випромінювання уздовж обраної осі на площині. Розподіл інтенсивності в інтерференційної картині апроксимуємо виразом вигляду:

$$I_{\text{інт}}(x) = I_0 \cos^2(kx) \tag{2.8}$$

де I_0– максимальне значення інтенсивності;

k –хвильове число.

2.6 Дослідження параметрів випромінювання лазера

Дослідження процесів випромінювання волоконних і нано-розмірних лазерів, а також завдання їх практичного застосування та управління режимами випромінювання привели до необхідності розвитку моделі вимірювання і дослідження лазерного випромінювання, у стійкому та хаотичному режимах.

Дослідження та управління режимами випромінювання лазера залишається актуальним завданням з моменту його створення. Теоретично і на практиці була показана можливість хаотизації режимів випромінювання, як багатомодових, так і одномодових лазерів, що впливає на значення і стабільність параметрів лазерного випромінювання.

Виділяють два напрямки досліджень хаосу в лазерах. Перше спрямоване на боротьбу з хаотичними режимами. Хаотизація веде до погіршення стабільності випромінювання, що неприйнятно для лазерів, що застосовуються у вимірювальних, медичних та інформаційних технологіях. Друге охоплює завдання генерації і керування хаотичними режимами випромінювання для використання в інформаційних системах. Інформація в таких системах передається у вигляді подвійного повідомлення, захованого в хаотичному оптичному носії.

У цьому зв'язку становить інтерес можливість генерації лазерних імпульсів з керованим рівнем стабільності частоти випромінювання, частоти проходження,

амплітуди, частоти несучої і т. д. Для цього досліджуються механізми руйнування режиму синхронізації мод, і інші процеси, що призводять до хаотизації. Успіх описаних досліджень залежить від коректності моделей вимірювань. Методики вимірювань параметрів лазерного випромінювання та аналізу їх результатів регламентується стандартами і базуються на класичній теорії вимірювань з постулатами про єдиності істинного значення, ергодичності та виконанні центральної граничної теореми.

З точки зору теорій дослідження складних систем, лазер являє собою НДС з функцією самоорганізації, а параметри випромінювання є динамічними змінними.

Було розглянуто питання виникнення хаотичних режимів в лазерах як НДС. Також раніше було показано, що в разі НДС, гіпотези класичної теорії вимірювання не підтверджуються. З метою забезпечення досліджень і управління НДС розроблена теоретична модель вимірювань в НДС. Її застосування для вимірювання параметрів лазерного випромінювання в стаціонарному і хаотичному режимах сприяє вирішенню як завдання боротьби з хаосом, так отримання і використання хаотичного випромінювання.

На основі теоретичної моделі вимірювань розроблена модель дослідження і вимірювання параметрів випромінювання лазера.

Як об'єкт досліджень розглянемо імпульсний лазер і такі параметри випромінювання: $X(t)$ енергію в імпульсі, тривалість і частоту проходження імпульсів, стабільність значень, та спектральні характеристики випромінювання. Структура схеми експерименту наведена на рис. 2.10: 1 – система інжекції, 2 – лазер, 3, 4, 7 – ділильні пластинки, 5 – вимірювач енергії імпульсів, 6 –спектр-аналізатор, 8 – блок вимірювання тривалості імпульсів, 9 – блок вимірювання частоти проходження імпульсів, 10– система управління, синхронізації і запису результатів вимірювань.

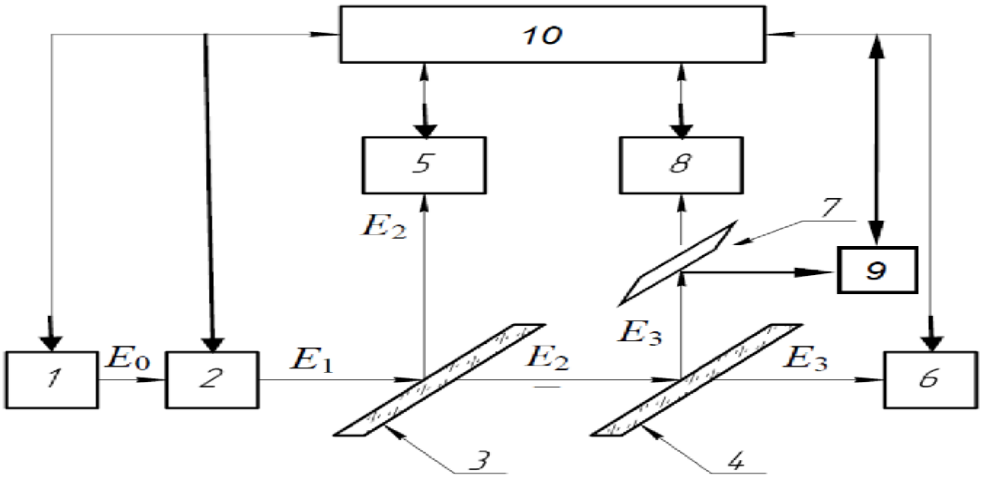


Рисунок 2.10 – Блок-схема лазерної установки

Експеримент виконується таким чином. Випромінювання лазера 2, пройшовши світлоділильні пластинки 3, 4, 7, спрямовується на вхід приладів 5, 6, 8, 9. Вважаємо, що пластинки ділять енергію імпульсу в співвідношенні 50/50. Система 10 управляє накачуванням лазера 1, а також синхронно, в задані моменти часу, фіксує результати вимірів: енергії інжекції $E_0(X_0)$; енергії імпульсу $E_1 = 2E_2 \cdot (X_1)$; тривалості $\tau \cdot (X_2)$ та частоти проходження імпульсів $f \cdot (X_3)$; частоти випромінювання $\upsilon \cdot (X_4)$; ширини спектральної лінії випромінювання $\Delta\upsilon \cdot (X_5)$; час проведення$t_i$ та і-го виміру.

Формується $X_1 \ldots X_5$ вектор стану НДС. З числа виключена енергія накачування, як керуючий параметр. Аналіз отриманих даних дозволяє визначити ступінь монохроматичності випромінювання і стабільність.

В експерименті вимірюється параметри випромінювання лазера, дослідження режимів роботи, можливості та умов переходу в хаотичний режим. При цьому вимірюються інтервали значень в стаціонарному та хаотичному режимах, класифікується динаміка і визначається час прогнозу значень.

В якості керуючого параметра лазера розглядається енергія інжекції, що подається системою. Коли її значення дорівнює заданій величині лазер забезпечує стійку динаміку характеристик випромінювання. Якщо, можлива зміна характеру динаміки і перехід в хаотичний режим. Після повернення керуючого параметра лазер повертається в стаціонарний стан.

Таке повернення притаманний НДС з функцією самоорганізації. Для класифікації динаміки використовується метод фрактальних шкал.

Методики вимірювань параметрів лазера та оцінки результатів вимірювань відображені в стандартах. Вимірювані величини оцінюються за допомогою середнього значення результатів вимірювань:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i. \tag{2.9}$$

А також можливе стандартне відхилення:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1}}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x}). \tag{2.10}$$

Значення стабільності:

$$\Delta x = +\frac{2s}{\bar{x}}. \tag{2.11}$$

Значення розширеної відносної невизначеності:

$$u = \sqrt{(\Delta x^2 + u^2{}_k)}. \tag{2.12}$$

де u_k – розширена відносна невизначеність коефіцієнта охоплення.

Вирази (2.9) – (2.12) справедливі в рамках класичного підходу до вимірювань і виправдані в разі підтвердження гіпотез про єдиності значення вимірюваної величини, ергодичності і виконанні центральної граничної теореми. Ці умови відповідають стаціонарному стійкого стану лазера. При цьому параметри випромінювання не розглядаються, але допускаються їх флуктуації, що відображає стабільність параметрів (2.10). У разі нестійкого стану, при хаотичної динаміці, наведені вислови результат вимірювання як така, що має високу невизначеність, внаслідок зростання значень стандартного відхилення s (2.10) та

стабільності (2.11). Також в рівняннях (2.9) – (2.12) не розглядаються можливі кооперативні ефекти і кореляція.

Для оцінки результатів вимірювань параметрів лазера в нестійкому стані і класифікації його складної динаміки повинні бути використані спеціальні, систематичні підходи та математичні інструменти.

Аналіз та представлення результатів дослідження виконується відповідно до положень теоретичної моделі вимірювання в НДС. При плануванні експерименту з вимірювання параметрів лазера необхідно визначити кількість вимірювань, яке дозволило охопити всі можливі значення динамічний змінної (ДП) та сформувати фазовий портрет НДС.

Для дисипативних НДС фазовий портрет є аттрактор. У разі хаотичної динаміки це дивний аттрактор. Кількість експериментів можна оцінити зверху, прийнявши значення фрактальної розмірності рівним значенню розмірності вектора стану ПДВ, тобто рівній числу n-вимірюваних.

Для класифікації динаміки ДП застосовується фрактальний аналіз тимчасових рядів результатів вимірювання ДП$\{x_j\}, j = 1, \dots, m.$

Процес чітко детермінований та значення може бути передбачене протягом тривалого проміжку часу. Діапазон значень дуже великий та зробити висновок про динаміку неможливо. У першому випадку динаміка зберігає свій тренд (детермінований хаос) а в другому, змінюється на протилежний (недетермінований хаос).

З виразу випливає висновок, що абсолютне значення стабільності ДП зменшується з ростом фрактальної розмірності. При приймає мінімальне значення і збільшується з ростом значення де детермінована динаміка ДП забезпечує найкращу стабільність параметра. Збільшення хаотизації призводить до погіршення стабільності.

Для випадку коли фрактальна розмірність перевищує значення, характерне для випадкового процесу $D_H = 1{,}5$, стабільність прагне до свого мінімального значення, що пояснюється антіперсістентностью процесу, локальної нестійкістю і великим розкидом значень при $D_H \to 2$. Таким чином фрактальна розмірність

може бути використана для оцінки стабільності ДП в разі коли лазер працює як в стаціонарному, так і хаотичному режимах. Також вираз може бути використано для отримання хаотичних сигналів із заданою стабільністю.

Наступне питання, на яке належить відповісти, це питання тимчасового горизонту прогнозу значень ДП. Особливість хаотичних НДС полягає в тому, що мале обурення початкових умов, або мале зміна параметрів самої системи, призводять до непередбачуваності результуючого руху за кінцеве час прогнозування.

На практиці значення часу прогнозування часто вважають за спрощеною формулою.

$$T(\lambda) = \frac{1}{\lambda_{макс}}. \qquad (2.13)$$

Поняття «час прогнозування» має важливе значення для прогнозування значень ДП НДС. Вираз (2.12) разом з виразом стабільності ДП може бути використано для оцінки і управління хаотичними режимами випромінювання лазера.

Таким чином, представлена теоретична модель вимірювання параметрів випромінювання лазера заснована на системному підході до лазеру, як до НДС з функцією самоорганізації.

Модель призначена для вимірювання і дослідження параметрів лазерного випромінювання в стаціонарному і хаотичному режимах. Запропоновані схеми експерименту і процедура оцінки результатів вимірювань можуть застосовуватися, як для забезпечення високої стабільності параметрів випромінювання, так і для отримання та управління хаотичним випромінюванням лазера. Результати роботи розвивають теорію вимірювань в НДС та завдяки використанню таких топологічних характеристик, як фрактальна розмірність і показники Ляпунова, сприяти розвитку топологічної фотоніки, розширюючи сферу її інтересів від фотонних кристалів до лазерного випромінювання.

ВИСНОВКИ

Метою атестаційної роботи було розглянути розвиток методів топологічного аналізу оптичних сигналів. Зокрема, методи хаотично-оптичного зв'язку, а також дослідження методів шифрування за допомогою хаоса.

Описане шифрування даних хаосу яке забезпечує додатковий ступінь безпеки в системах з програмним захистом. Також знайдене рішення визначаюче ефективність відновлення даних між авторизованими та неавторизованими користувачами.

Були зображені схеми взаємно-керованих систем зв'язку на основі хаосу, а також графіки зображення переданих та прийнятих сигналів використовуючих ідентичний фільтр на обох вузлах, щоб обмежити спектральний вміст переданого сигналу з доступною пропускною здатністю.

Приведена таблиця електричного подавлення хаотичних несучих при використанні різної пропускної здатності та умов синхронізації коли частотаΔf:$DC-$10 Ггц та Δf:$DC-$2,5 Ггц.

Зображена блок-схема експерименту передачі хаос-захищених даних звикористанням генераторів хаосу де оптичний сигнал електрооптичного модуля$LiNbO_3$посилюєтьсята запускається в лінію передачі.

Розглянуто фізичні і практичні реалізації фотонних систем, які об'єднують дослідження топології з нелінійною оптикою.

Були зображені різні фрактальні картини.

Базуючись на перерахованих раніше методів, була зображена схема лазерної установки для дослідження та вимірювання параметрів випромінювання лазера.

Спираючись на результати проведеного дослідження можна зробити висновок:

– параметричні процеси перетворення частоти технологічно важливі. Подавлення зворотного зв'язку, що допускається деякими топологічними крайовими станами, може бути корисно для стабілізації підсилювачів біжучої хвилі. Процеси спонтанного хвильового перемішування є важливим джерелом заплутаних фотонних пар для інтегрованих програм квантової фотоніки;

– лазери повсюдно поширені, і вони стають по своїй суті нелінійними пристроями вище порога через насичення посилення. Топологічні граничні стани можуть бути корисні для стабілізації режиму, що забезпечує роботу потужного одномодового режиму, хоча ступінь, в якій ця стабілізація може зберігатися в реалістичних пристроях, все ще обговорюється;

– моделі можуть підтримувати нові механізми формування солітонів (наприклад, топологічні солітони). Нелінійності забезпечують простий спосіб маніпулювати топологічними ґратами, і вони особливо важливі для досягнення надшвидкої модуляції.

Нелінійна топологічна фотоніка, зможе забезпечити майданчик не тільки для вивчення цікавих теоретичних проблем на межі нелінійної динаміки і топології, але і як шлях до нових розробок для безпроблемних додатків фотонних пристроїв, таких як високошвидкісна маршрутизація, та квантові джерела світла.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Alligood K.T., Sauer T.D., Yorke, J.A. Chaos: An Introduction to Dynamical Systems // Textbooks In Mathematical Sciences, Springer, New York 2003.

2. Argyris A., Grivas E., Hamacher M., Bogris A., Syvridis D. Chaos-on-a-chip secures data transmission in optical fiber links // Opt. Express.2010.P. 5188–5198.

3. Arroyo D., Alvarez G., Fernandez V. A basic framework for the cryptanalysis of digital chaos-based cryptography. In: Systems, Signals and Devices. SSD: 6th International Multi-Conference. 2009.P.1–6.

4. Baptista M.S., Macau E.E., Grebogi C., Lai Y.C., Rosa E. Integrated chaotic communication scheme // Phys. Rev. 2000.P. 4835–4845.

5. Aburakawa Y., Otsu T. Dense wavelength division multiplexed optical wireless link towards terabit transmission: Microwave Photonics. MWP 2003 Proceedings: International Topical Meeting.2003. P. 135–138.

6. Argyris A., SyvridisD., Larger L., Annovazzi-Lodi V., at all. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links. 2005. P. 343–346.

7. Avila J.F.M., Leite J.R.R. Time delays in the synchronization of chaotic coupled lasers with feedback // Opt. Express. 2009. 17(24).

8. Bollt E., Lai Y.C., Grebogi C. Coding, channel capacity, and noise resistance in communicating with chaos // Phys. Rev. Lett. 1997. 79(19). P. 3787–3790.

9. Eisencraft M., do Amaral M.A., Lima C.A.M. Estimation of chaotic signals with applications in communications. Saint-Malo, France. 2009. P. 1–6.

10. Faleiros A.C., Perrella W.J., Rabello T.N., Santos A.S., Chaotic signal generation and transmission.2005.

11. Endo T., Chua L. Chaos from phase-locked loops // IEEE Trans. Circ. Syst. 35(8), P. 987–1003.

12. GrzybowskiJ.M.V., Macau E.E.N., Yoneyama T. Isochronal synchronization of time delay and delay-coupled chaotic systems // Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical. 2011.

13. Gu K., Kharitonov V., Chen J. Stability of time-delay systems // 1st edn. Birkhauser. Boston. 2003.

14. Hayes S., Grebogi C., Ott E., Mark A. Experimental control of chaos for communication // Phys. Rev. Lett. 73(13). 1994. P. 1781–1784.

15. Eisencraft M., Fanganiello R., Baccala L. Synchronization of discrete-time chaotic systems in bandlimited channels // Math. Probl. 2009.

16. Grassberger P., Procaccia I. Measuring the strangeness of strange attractors // Phys. D Nonlinear Phenom. 1983. P. 189–208.

17. Itoh M., Chua L. Multiplexing techniques via chaos // Circuits and Systems, 1997. ISCAS'97. Proceedings of 1997 IEEE International Symposium on. 1997. Vol. 2. P. 905–908.

18. Kennedy M.P., Kolumban G. Digital communications using chaos. Signal Process. 2000. P. 1307–1320.

19. Kisel A., Dedieu H., Schimming T. Maximum likelihood approaches for noncoherent communications with chaotic carriers // IEEE Trans. Circ. Syst. I. Fund. Theor. Appl. 2001. 48(5). P. 533–542.

20. Klein E., Gross N., Kopelowitz E., Rosenbluh M. Public-channel cryptography based on mutual chaos pass filters // Phys. Rev.2006.

21. Kolumban G., Kennedy M., Chua L. The role of synchronization in digital communications using chaos fundamentals of digital communications // IEEE Trans. Circ. Syst. I. Fund. Theor. Appl.1997. P. 927–936.

22. Kolumban G., Kennedy, M. Chua L. The role of synchronization in digital communications using chaos chaotic modulation and chaotic synchronization // IEEE Trans. Circ. Syst. I. Fund. Theor. Appl.1998. P. 1129–1140.

23. Landsman A.S., Schwartz I.B. Complete chaotic synchronization in mutually coupled timedelay systems // Phys. Rev.2007.

24. Lau F., Tse C., Ye M., Hau S. Coexistence of chaos-based and conventional digital communication systems of equal bit rate // IEEE Transactions on Circuits and Systems.2004. P. 391–408.

25. Lawrance A. Recent theory and new applications in chaos communications // Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and System. 2010.

26. Федер Е. Фракталы. Москва: Мир. 1991. 374 с.

27. Божокин С.В., ПаршинД.А. Фракталы и мультифрактала // НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика». Ижевск, 2001. 128 с.

28. Морозов А.Д. Введение в теорию фракталов: учебное пособие. Нижний Новгород: издательство Нижегородского университета. 1999. 140 с.

29. Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Бунин И.Ж. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов. // НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”. Москва – Ижевск. 2001. 116 с.

30. Дивин Г.Д. Оценивание характеристик случайных фрактальных изображений. // Оптический журнал 1995, № 9. С. 12–17.