

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2025 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Інженерія та програмування
інфокомунікацій»**

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Розроблення завадозахищеного приймально-передавального
модуля у терагерцовому діапазоні для визначення відстані до об'єкту»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ТЗ-12

Буглак Андрій Олександрович _____

Керівник:

Професор кафедри ТК НН ІТС, к.т.н.,

Наритник Теодор Миколайович _____

Консультант:

Доцент кафедри ТК НН ІТС, к.т.н.,

Авдєєнко Гліб Леонідович _____

Рецензент:

Професор кафедри прикладних інформаційних систем,

Факультету інформаційних технологій,

Київського національного університету ім. Тараса Шевченка,

д.т.н., професор

Сайко Володимир Григорович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування
інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Буглаку Андрію Олександровичу

1. Тема роботи «Розроблення завадозахищеного приймально-передавального модуля у терагерцовому діапазоні для визначення відстані до об'єкту», керівник роботи Наритник Теодор Миколайович, к.т.н. професор кафедри телекомунікацій, затверджені наказом по університету від «26» травня 2025 р. № 1755-с.
2. Термін подання студентом роботи 9 червня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: концепція сучасних радіодатчиків та антен терагерцового діапазону.
4. Зміст роботи:
 - Аналіз особливостей передачі сигналів у терагерцовому діапазоні.
 - Аналіз універсальності SiRad Easy та порівняння лінзових антен
 - Розроблення приймально-передавального модуля
 - Проведення експериментальних досліджень розробленого

макету.

- Практична цінність роботи

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)

1. Постановка завдань дослідження: назва роботи, мета та завдання роботи, об'єкт та предмет дослідження.
2. Актуальність дослідження.
3. Проектування лінзової антени.
4. Виготовлення макетних зразків антен за допомогою 3-Д друку.
5. Проведення практичного дослідження.
6. Корисна модель антени.
7. Приймально-передавальний модуль.
8. Мініатюрний радіодатчик.
9. Висновки по роботі.
10. Рекомендації щодо подальших напрямків досліджень та впровадження отриманих результатів

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розроблення приймально-передавального модуля	Авдєєнко Г.Л. ктн, доцент		

7. Дата видачі завдання 21.09.2024 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Розробка, оформлення, узгодження та затвердження завдання на дипломну роботу	22.09.2024-01.10.2024	Виконано
2	Ознайомлення з особливостями та можливостями існуючих радарів ТГц діапазону, в тому числі й на основі ІМС	02.10.2024-18.10.2024	Виконано

	компанії Silicon Radar		
3	Обґрунтування можливості використання радарних пристроїв ТГц діапазону в різних сферах людської діяльності	20.10.2024-03.11.2024	Виконано
4	Моделювання та створення схем лінзової антени	10.11.2024-01.12.2024	Виконано
5	Розробка та друк антен. Розробка методики експериментальних досліджень	02.12.2024-25.12.2024	Виконано
6	Проведення експериментальних досліджень розробленого макету	05.01.2025-24.01.2025	Виконано
7	Моделювання та створення схем приймально-передавального модуля ТГц діапазону	04.02.2025-10.04.2025	Виконано
8	Аналіз результатів.	17.04.2025-30.05.2025	Виконано

Студент

Андрій БУГЛАК

Керівник

Теодор НАРИТНИК

РЕФЕРАТ

Текстова частина бакалаврської дипломної роботи містить: 67 сторінки, 24 рисунків, 2 таблиці та 27 джерел.

Актуальність роботи. Розроблення завадозахищеного приймально-передавального модуля в терагерцовому діапазоні є актуальним з огляду на потребу в інфокомунікаційних системах із надвисокою пропускнуою здатністю. Терагерцовий спектр забезпечує передачу даних зі швидкістю кількох Гбіт/с, що критично для масивних багатоядерних мереж, широкосмугового доступу та передачі телевізійних сигналів високої чіткості. Його застосування сприяє розвантаженню низькочастотних діапазонів і відповідає вимогам до екологічно безпечного електромагнітного випромінювання.

Модуль також дає змогу точно визначати відстань до об'єктів, що має значення для радіолокаційних і навігаційних систем, зокрема для автономних платформ. Забезпечення завадозахищеності є ключовим через вплив електромагнітних перешкод на якість сигналу. Дослідження інтегрує напрями високочастотної радіотехніки, електродинаміки та цифрової обробки сигналів, сприяючи розвитку передових технологій безпроводового зв'язку.

Мета. Метою даної роботи є розробка завадозахищеного приймально-передавального модуля, що працює в терагерцовому діапазоні, призначеного для забезпечення високої пропускнуої здатності та точного визначення відстані до об'єктів з метою підвищення ефективності широкосмугових інфокомунікаційних і радіолокаційних систем ближньої дії. Робота передбачає створення компактного модуля з рупорно-лінзовою антеною, що має регульовану спрямованість і високий коефіцієнт підсилення, для застосування в автомобільних системах безпеки, дронах, роботах і портативних сенсорних пристроях. Особлива увага приділяється оптимізації завадозахищеності через адаптивні алгоритми фільтрації та модуляційні схеми, а також використанню доступних матеріалів для 3D-друку антен, забезпечуючи економічну ефективність і високу точність спрямованості сигналу в умовах вузьконаправлених терагерцових частот.

Об'єкт дослідження. Процес поширення радіохвиль терагерцового

діапазону у сфері лінзованих антен для радіодатчиків.

Предмет дослідження. Приймально-передавальний модуль, що працює в терагерцовому діапазоні для визначення відстані до об'єкта, зокрема його конструктивні елементи, принципи роботи та функціональні характеристики. Дослідження охоплює аналіз компонентів модуля, таких як рупорно-лінзові антени, частотно-модульований сигнал, діелектричні матеріали та метаматеріали, а також систему дистанційного керування через AnyDesk для обробки параметрів і даних. Вивчаються технічні аспекти, включаючи вплив матеріалів на якість сигналу, методи інтеграції та адаптацію модуля до різних умов експлуатації з метою застосування в системах безпеки, безпілотних платформах і телекомунікаціях.

Метою дослідження є розробка приймально-передавального модуля в терагерцовому діапазоні для визначення відстані до об'єкта та його вдосконалення з акцентом економічних чинників для підвищення точності вимірювань, збільшення дальності дії та забезпечення ефективності системи в умовах дистанційного керування. Дослідження спрямоване на досягнення оптимальних характеристик модуля шляхом використання різних матеріалів, а також на впровадження дистанційного керування для оперативного налаштування й аналізу даних у реальному часі, щоб забезпечити адаптивність і широке застосування модуля в системах безпеки, безпілотних платформах і телекомунікаціях.

Поставлена мета передбачає розв'язання таких завдань:

- Аналіз особливостей передачі сигналів у терагерцовому діапазоні.
- Вибір та обґрунтування архітектури приймально-передавального модуля.
- Виготовлення зразків лінзових антен з різних матеріалів.
- Проведення практичного дослідження порівняння.
- Розробка мініатюрного радіодатчика.

Методи дослідження. Для проведення дослідження побудови

приймально-передавального модуля терагерцового діапазону для визначення відстані до об'єкту, використовуються підходи аналізу існуючої електронної елементної бази, теоретичних та практичних досліджень.

Отримані результати. Аналіз отриманих результатів роботи дав можливість створити мініатюрний радіодатчик з надвисокочастотною рупорно-лінзовою антеною з приймально-передавальний модулем та зробити внесок у розробку інноваційних та ефективних рішень у телекомунікацій.

Практична цінність розробленого завадозахищеного приймально-передавального модуля в терагерцовому діапазоні полягає в його здатності забезпечувати високоефективне рішення точно визначати відстань до об'єктів. Дистанційне керування через AnyDesk забезпечує зручність налаштування та аналізу даних у реальному часі, що робить пристрій універсальним і перспективним для сучасних технологій. Також можливість друку антен з 3D матеріалів для зменшення вартості та спрощення виробництва.

Апробація результатів роботи. Результати досліджень представлено на Десятій Міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційно-комунікаційні технології та кібербезпека» (ІКТК-2024) у Харкові, що проходила в дистанційному режимі, де вони отримали позитивні відгуки від експертів. Крім того, на основі розробки отримано патент на корисну модель № 159277 «Мініатюрний радіодатчик» (заявка № u 2024 06120, опубліковано 07.05.2025, Бюл. № 19), а також подано заяву на патент на надвисокочастотну рупорно-лінзову антену (№ u 2024 05939, станом на 27.12.2024 перебуває на формальній експертизі). Результати також опубліковано у матеріалах конференції (Авдеєнко Г.Л., Наритник Т.М., Бичок А.В., Буглак А.О. «Приймально-передавальний модуль в терагерцовому діапазоні частот», с. 46–53; Авдеєнко Г.Л. та ін. «Транзисторні джерела генерації міліметрових хвиль», с. 54–66), що підтверджує їхню наукову новизну та практичну значущість.

Ключові слова: приймально-передавальний модуль, рупорно-лінзова антена, лінзова антена, , визначення відстані, радіолокація, інфокомунікації, 3D-друк, діелектричні матеріали, метаматеріали, дистанційне керування, AnyDesk.

ABSTRACT

The thesis contains 67 pages, 24 figures, 1 table, 27 sources were used.

Relevance of work. The development of an interference-resistant transceiver module in the terahertz range is relevant given the need for information and communication systems with ultra-high bandwidth. The terahertz spectrum provides data transmission at speeds of several Gbit/s, which is critical for massive multi-core networks, broadband access and high-definition television signal transmission. Its use helps to relieve the load on low-frequency bands and meets the requirements for environmentally safe electromagnetic radiation.

The module also allows for accurate determination of the distance to objects, which is important for radar and navigation systems, in particular for autonomous platforms. Ensuring interference immunity is key due to the impact of electromagnetic interference on signal quality. The research integrates the fields of high-frequency radio engineering, electrodynamics and digital signal processing, contributing to the development of advanced wireless communication technologies.

Goal. The aim of this work is to develop a noise-protected transceiver module operating in the terahertz range, designed to provide high throughput and accurate distance measurement to objects in order to improve the efficiency of broadband infocommunication and short-range radar systems. The work involves the creation of a compact module with a horn-lens antenna, which has adjustable directivity and a high gain coefficient, for use in automotive safety systems, drones, robots and portable sensor devices. Particular attention is paid to optimising noise immunity through adaptive filtering algorithms and modulation schemes, as well as the use of affordable materials for 3D printing of antennas, ensuring cost-effectiveness and high signal directivity accuracy in narrowband terahertz frequencies.

Object of research. Analysis of the use of terahertz range technologies in the field of radio sensors.

Subject of research. A transceiver module operating in the terahertz range for determining the distance to an object, including its structural elements, operating principles and functional characteristics. The research covers the analysis of module components, such as horn-lens antennas, frequency-modulated signals, dielectric

materials and metamaterials, as well as a remote control system via AnyDesk for processing parameters and data. Technical aspects are being studied, including the influence of materials on signal quality, integration methods, and adaptation of the module to different operating conditions for use in security systems, unmanned platforms, and telecommunications.

Purpose of the study. The research involves the development and improvement of a transceiver module in the terahertz range to determine the distance to an object, with an emphasis on economic factors and improving measurement accuracy, increasing range, and ensuring system efficiency. The research aims to achieve optimal module performance through the use of different materials, as well as to implement remote control for real-time configuration and data analysis to ensure the adaptability and wide application of the module in security systems, unmanned platforms and telecommunications.

The set goal involves solving the following tasks:

- Analysis of signal transmission characteristics in the terahertz range.
- Selection and design of the transceiver module architecture.
- Manufacture of lens antenna samples from various materials.
- Conducting a practical comparative study.
- Development of a miniature radio sensor.

Research methods. To conduct research on the construction of a terahertz range transceiver module for determining the distance to an object, approaches based on analysis of the existing electronic component base, theoretical and practical research are used.

The results. Analysis of the results obtained made it possible to create a miniature radio sensor with an ultra-high frequency horn-lens antenna with a transceiver module and contribute to the development of innovative and effective solutions in telecommunications.

Practical Value. The practical value of the developed interference-resistant transceiver module in the terahertz range lies in its ability to provide a highly efficient solution for accurately determining the distance to objects. Remote control via

AnyDesk ensures convenient configuration and real-time data analysis, making the device versatile and promising for modern technologies. Additionally, the ability to print antennas using 3D materials reduces costs and simplifies production.

Validation of Results. The research results were validated through presentation at the Tenth International Scientific and Technical Conference "Information and Communication Technologies and Cybersecurity" (ICTC-2024) held remotely in Kharkiv, where they received positive feedback from experts. Furthermore, a patent for the utility model No. 159277 "Miniature Radio Sensor" was obtained (application No. u 2024 06120, published on 07.05.2025, Bulletin No. 19), and an application for a patent on the ultra-high-frequency horn-lens antenna was submitted (No. u 2024 05939, under formal examination as of 27.12.2024). The results were also published in the conference proceedings (Avdeyenko G.L., Narytnyk T.M., Bychok A.V., Buglak A.O. "Transceiver Module in the Terahertz Frequency Range," pp. 46–53; Avdeyenko G.L. et al. "Transistor Sources for Millimeter-Wave Generation," pp. 54–66), confirming their scientific novelty and practical significance.

Keywords:, transceiver module, horn-lens antenna, lens antenna, radar, infocommunications, 3D printing, dielectric materials, metamaterials, remote control, AnyDesk.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	14
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛІВ У ТЕРАГЕРЦОВОМУ ДІАПАЗОНУ	16
1.1 Визначення терагерцового діапазону	16
1.2 Тенденції розвитку терагерцових технологій	18
1.3 Застосування терагерцового діапазону	20
Висновки	22
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ УНІВЕРСАЛЬНОСТІ SiRad Easy ТА ПОРІВНЯННЯ ЛІНЗОВИХ АНТЕН	23
2.1 Вибір та об'єднання архітектури модуля.	23
2.2 Універсальність SiRad Easy	25
2.3 3D-моделювання лінзової антени.....	27
2.4 Виготовлення зразків лінзових антен з різних матеріалів	29
2.5 Проведення практичного дослідження порівняння.....	32
2.6 Результати вимірювань.....	38
2.7 Розрахунок та аналіз параметрів лінзових антен.....	39
Висновки	42
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБЛЕННЯ ПРИЙМАЛЬНО-ПЕРЕДАВАЛЬНОГО МОДУЛЯ.	44
3.1 Пропозиція рупорно-лінзової антени з метаматеріалами	44
3.2 Архітектура приймально-передавального модуля	48
3.3 Мініатюрний радіодатчик	51
3.4 Дистанційне керування радіодатчика	54
Висновки	57
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	62
Додаток 1	66

Додаток 2	67
-----------------	----

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

IoT	Internet of Things
ITU	International Telecommunication Union
WRC-23	World Radiocommunication Conference 2023
WRC-23	World Radiocommunication Conference 2023
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
SOFIA	Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy
ALMA	Atacama Large Millimeter/submillimeter Array
SiGe	Silicon-Germanium
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
MMIC	Monolithic Microwave Integrated Circuit
LNA	Low Noise Amplifier
DSP	Digital Signal Processor
LMS	Least Mean Squares
LDPC	Low-Density Parity-Check
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
BPSK	Binary Phase Shift Keying
FFT	Fast Fourier Transform
HDTV	High Definition Television
UHD	Ultra High Definition
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
mMTC	Massive Machine-Type Communications
uRLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communications
IEEE ComSoc	IEEE Communications Society
JPL	Jet Propulsion Laboratory
BER	Bit Error Rate
HDPE	High-Density Polyethylene
PLA	Polylactic Acid
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene

PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol
TPU	Thermoplastic Polyurethane
SIW	Substrate Integrated Waveguide
TLS	Transport Layer Security
RSA	Rivest-Shamir-Adleman
TPU	Thermoplastic Polyurethane
WebGUI	Web Graphical User Interface
FMCW	Frequency-Modulated Continuous Wave
CW	Continuous Wave
ТГц	Терагерцовий діапазон
СЕПТ	Європейська конференція адміністрацій зв'язку
ECC PT1	Комітет з електронних комунікацій
6G	Шосте покоління мобільних мереж
ФАПЧ	Фазова автопідстройка частоти

ВСТУП

Сучасний етап розвитку телекомунікаційних і радіолокаційних технологій характеризується невпинним прагненням до створення систем із безпрецедентно високою пропускнуою здатністю, міліметровою точністю визначення відстані та абсолютною стійкістю до складних електромагнітних перешкод. У цьому контексті терагерцовий діапазон електромагнітного спектра, що охоплює частоти від 0.1 до 10 ТГц, виступає як ключова і надзвичайно перспективна область досліджень. Його унікальні властивості, такі як можливість надвисокої швидкості передачі даних, що теоретично сягає 100 Гбіт/с і навіть більше, висока просторова роздільна здатність, зумовлена короткою довжиною хвилі, та низька імовірність перехоплення сигналу через значне поглинання в атмосфері на певних частотах та вузьку спрямованість променів, відкривають нові горизонти для інноваційних технологій. Актуальність розробки високопродуктивного та завадозахищеного приймально-передавального модуля, що функціонує в терагерцовому діапазоні, зумовлена експоненційно зростаючою потребою в ефективних та надійних рішеннях для майбутніх мереж, систем автономного транспорту, прогресивних систем безпеки та високошвидкісного міжсупутникового зв'язку. Зокрема, результати Всесвітньої конференції радіозв'язку (ITU WRC-23) додатково підкреслили стратегічну важливість освоєння частот вище 100 ГГц для задоволення вимог майбутніх безпроводових систем, що вимагатимуть значно ширших смуг пропускання.

Створення компактних, ефективних та технологічно доступних антенних систем для терагерцового діапазону залишається складним науково-технічним завданням через малі фізичні розміри елементів та високі вимоги до точності їх виготовлення. Аналіз сучасних літературних джерел та практичного досвіду провідних світових компаній, таких як німецька Silicon Radar, що спеціалізується на розробці мікросхем для радарних систем міліметрового та субміліметрового діапазонів, показує, що наявні на ринку радіодатчики, наприклад, демонстраційний набір SiRad Easy на базі їхніх чіпів, забезпечують базові функціональні можливості для тестування та макетування. Однак для застосування в реальних умовах експлуатації, особливо в системах, що

вимагають підвищеної дальності дії та надійної роботи в умовах інтенсивних завад, ці рішення потребують суттєвого удосконалення та адаптації.

Практична цінність роботи полягає в комплексному підході до розробки приймально-передавального модуля на базі передового інтегрального чіпа TRA_120_002 виробництва Silicon Radar, який доповнюється інноваційною рупорно-лінзовою антеною. Ключовою особливістю запропонованої антени є використання метаматеріальних структур, інтегрованих у її конструкцію для цілеспрямованого покращення діаграми спрямованості, зокрема, збільшення коефіцієнта підсилення та зменшення рівня бічних пелюсток, що безпосередньо впливає на дальність та завадостійкість системи. Окрім розробки нової антени, важливим аспектом практичної цінності є проведення порівняльного експериментального дослідження характеристик саморобних лінзових антен, виготовлених із різноманітних діелектричних матеріалів, з оригінальними лінзами, що постачаються виробником. Це дозволить не лише оцінити економічну доцільність такого підходу, але й дослідити вплив властивостей матеріалу лінзи на параметри антени в терагерцовому діапазоні, що є важливим для оптимізації майбутніх розробок.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛІВ У ТЕРАГЕРЦОВОМУ ДІАПАЗОНУ

1.1 Визначення терагерцового діапазону

З розвитком науки і техніки діапазон терагерцових хвиль все частіше використовується в різних галузях народного господарства. Новим технічним результатом запропонованих інноваційних рішень є можливість створення в терагерцовому діапазоні частот радіoeлектронних пристроїв та систем радіозв'язку і радіолокації ближньої дії для перспективних застосувань у сфері передачі високошвидкісної інформації і наведення та керування.

Цифрове майбутнє людства залежить від зростаючої кількості пристроїв, послуг і продуктів, які покладаються на обмежений радіочастотний спектр. Гармонізація спектру підвищує економію за рахунок масштабування та доступності пристроїв і послуг. Виявлення і узгодження доступного спектру для систем зв'язку 5G та 6G із розширеним покриттям і пропускну здатністю має важливе значення для економічного розгортання в Україні і є прерогативою Всесвітньої конференції радіозв'язку (WRC), яка регулює використання радіочастотного спектру та геостационарних і негеостационарних супутникових орбіт. Нині проектними групами, у тому числі, Комітетом з електронних комунікацій (ECC PT1) Європейської конференції адміністрацій зв'язку (СЕРТ), в якому Україна приймає активну участь [1,2]. На ITU WRC-23, на якій планується прийняття рішення щодо використання спектру для подальшого розвитку 5G і встановлення основи для спектру 6G. На ITU WRC-23 очікується також обговорення додаткових частотних діапазонів вище 100 ГГц з демонстрацією повного потенціалу терагерцового (ТГц) діапазону зв'язку в техніко-економічних обґрунтуваннях.

Спектр ТГц (рис.1.1) випромінювання знаходиться між мм-хвилями (mmWave) та далеким інфрачервоним (ІЧ) діапазоном і довгий час був найменш вивченим електромагнітним спектром та може доповнити традиційний радіочастотний спектр. Проте останні досягнення в галузі генерації ТГц

сигналів, модуляції та методів випромінювання пропонують набагато більш високу пропускну здатність порівняно з mmWave діапазоном та більш сприятливі умови поширення порівняно з ГЧ діапазоном. На рівні цифрової інфраструктури нові технології, що виходять за рамки 5G, такі як інтелектуальні поверхні, що реконфігуруються, інтегрований доступ і транзитний зв'язок, можуть збільшити переваги ТГц зв'язку. На алгоритмічному рівні нові методи обробки сигналів та мережеві протоколи можуть обійти квазіоптичні характеристики поширення ТГц і забезпечити безперебійний зв'язок. Більш високі частоти в ТГц діапазоні (0,1-10 ТГц) відіграватимуть центральну роль у повсюдному бездротовому зв'язку в мережах після впровадження мереж 6G покоління. Згідно досліджень міжнародних провідних компаній, які досліджують ТГц комунікації, включаючи генезис флагманської програми 6G (6GFP), кластер проектів H2020 ICT-09 THz ЄК [3] й широкосмугові комунікації і будівництво мереж нового покоління в Китаї [4]. Ефективна обробка сигналів базової смуги ТГц може скоротити розрив між величезною доступною смугою пропускання та обмеженою швидкістю дискретизації, що існує на сьогоднішній день.

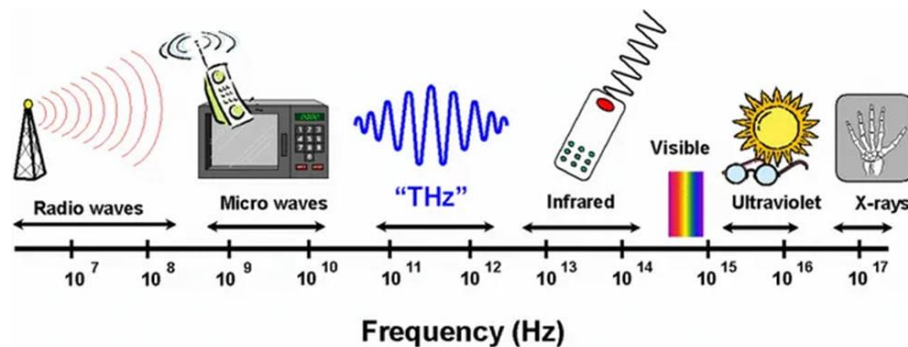


Рис.1.1 Діаграма електромагнітного спектра

Зокрема, частоти ТГц обіцяють забезпечити широкий спектр, швидкість передачі даних більше сотні гігабіт за секунду (Гбіт/с), масове підключення, щільніші мережі та високобезпечну передачу даних. Агентством перспективних оборонних дослідницьких проектів США (DARPA) технологія ТГц визначена, як одна з чотирьох основних сфер досліджень і основних компонентів наступної революції у галузі інформаційних технологій, які можуть спричинити на суспільство більший вплив, ніж сам Інтернет.

Те, як сучасне суспільство створює, розповсюджує та споживає інформацію, призвело до безпрецедентного зростання загальної кількості взаємозалежних пристроїв, а також швидкості передачі даних, з якою ці пристрої передають інформацію. Розглядаючи основні сфери застосування терагерцового діапазону, Міжнародний союз електрозв'язку (ITU) виділив декілька основних напрямів, а саме: розширений мобільний широкосмуговий зв'язок (eMBB), масовий зв'язок машинного типу (mMTC) та розширений мобільний широкосмуговий зв'язок (eMBB). Комунікації mMTC та наднадійні комунікації з низькою затримкою (uRLLC) визначені для підтримки широкого спектру традиційних та нових додатків та послуг у будь-який час та в будь-якому місці [3]. Оскільки зв'язок на mmWave стає промисловим стандартом, IEEE ComSoc визначена комунікативною платформою і виникає необхідність вивчення нових бездротових технологій, що працюють в діапазоні ТГц [4].

Очікується, що мережі 6G, які стануть ключовим фактором інтелектуального інформаційного суспільства до 2030 року, забезпечать продуктивність вищу за 5G у космічних, повітряних, наземних та підводних мережах для забезпечення повсюдного та необмеженого бездротового зв'язку на основі інтеграції різних перспективних технологій радіо доступу для екосистеми 6G, включаючи ТГц зв'язок [4].

Вже нині американським вченим з Лабораторії реактивного руху НАСА (JPL), які займаються розробкою та інтеграцією технологій аерокосмічної війни, вдалось досягнути терагерцевої передачі сигналу зі швидкістю 2 Гбіт/с на відстань 2,03 км без коефіцієнта бітових помилок (BER), що може сприяти розвитку 6G [4].

1.2 Тенденції розвитку терагерцових технологій

Дослідження та розвиток технологій терагерцового діапазону формувалися на межі мікрохвильової техніки і фотоніки, поступово долаючи так званий «терагерцовий провал». Цей термін позначає діапазон частот, у якому раніше існував дефіцит ефективних джерел і приймачів, що обмежувало широке застосування цієї частини електромагнітного спектра.

Основні етапи розвитку терагерцових технологій можна умовно розділити на кілька десятиліть, кожне з яких характеризувалося певними досягненнями та технологічними проривами.

У 1980–1990-х роках розпочався активний розвиток напівпровідникових технологій, які базувалися на використанні арсеніду галію (GaAs) і фосфіду індію (InP). Ці матеріали дозволили створювати ефективні джерела терагерцового випромінювання, що знайшли своє застосування в спектроскопії та астрофізичних дослідженнях. Відомими прикладами таких застосувань стали проекти великих телескопів, таких як Стратосферна обсерваторія інфрачервоної астрономії (SOFIA) і Великий міліметровий радіотелескоп Атакама (ALMA). Ці телескопи використовували частоти у діапазоні 120–950 ГГц, що дозволило значно поглибити наші знання про структуру міжзоряного простору, зокрема хімічний склад і фізичні властивості космічних об'єктів.

На початку 2000-х років стався важливий технологічний прорив, пов'язаний із впровадженням кремній-германієвих (SiGe) технологій. Завдяки своїй ефективності, компактності і відносній економічності SiGe-технології швидко стали основою для розробки інтегральних мікросхем компактних трансиверів, що значно розширило потенціал використання ТГц-діапазону. Ці розробки дозволили активно використовувати терагерцові пристрої в системах радіолокації, високоточних навігаційних системах, системах безпеки та бездротового зв'язку.

У 2010-х роках розвиток терагерцових технологій перейшов у фазу практичної реалізації з появою комерційних платформ, таких як SiRad Easy від компанії Silicon Radar. Ця платформа працює у діапазоні частот 119–126 ГГц і дозволяє забезпечувати зв'язок на відстані до 300 метрів при потужності випромінювання лише близько 3 мВт. Такі системи почали широко використовуватись для тестування нових пристроїв, забезпечуючи науково-дослідні та комерційні організації необхідною базою для проведення експериментів.

Останні досягнення у 2020-х роках пов'язані з розвитком CMOS-технологій, які дозволяють створювати трансивери з технологічними нормами

90 нм, що забезпечують швидкість передачі інформації до 15 Гбіт/с. Це значно розширює спектр можливостей для використання ТГц-технологій у високошвидкісних комунікаційних системах. Паралельно з цим ведеться активна робота над створенням надпровідникових приймачів із фазовою автопідстройкою частоти (ФАПЧ). Ці приймачі дозволяють досягти високої точності і чутливості, що є особливо важливим для систем міжсупутникового зв'язку та високоточної радіолокації. Останні дослідження, наприклад, роботи, проведені в Лабораторії реактивного руху NASA, продемонстрували можливість передачі даних зі швидкістю до 2 Гбіт/с на дистанцію понад 2 км без виникнення бітових помилок ($BER=0$), що відкриває значні перспективи для майбутніх технологічних розробок у сфері терагерцових комунікацій та систем точного позиціонування[5].

1.3 Застосування терагерцового діапазону

Терагерцовий діапазон знаходить широке застосування у багатьох сферах завдяки своїм унікальним властивостям, таким як висока пропускна здатність, точність і можливість створення компактних, спрямованих антенних систем. Основні напрямки використання ТГц-діапазону включають супутниковий зв'язок, радіолокацію, безпеку та різноманітні наукові дослідження.

Особливий інтерес до використання терагерцового діапазону виникає у сфері супутникових комунікацій, особливо для міжсупутникових ліній зв'язку. Частоти в діапазоні 275–1000 ГГц є перспективними через відсутність жорстких регуляторних обмежень, що дозволяє значну свободу в розробці технологій і рішень. Водночас значним технічним викликом для супутникових систем залишається проблема атмосферного поглинання, яка суттєво впливає на дальність і якість передачі сигналів. Вченими активно пропонуються різноманітні підходи до зменшення діелектричних втрат, але наукові дослідження щодо створення компактних і ефективних антенних систем у цьому діапазоні все ще є недостатніми та потребують подальшого вивчення.

У сфері радіолокації терагерцові системи дозволяють отримувати зображення з високою роздільною здатністю, що важливо для навігації, безпеки

та високоточного позиціонування. Терагерцові радары мають потенціал для виявлення дрібних об'єктів на малих відстанях, що є особливо важливим для безпеки аеропортів, громадських місць, а також у військових застосуваннях.

Безпека є ще одним важливим напрямком використання ТГц-технологій, завдяки їх здатності проникати крізь різноманітні матеріали, окрім металевих та деяких інших щільних речовин. Це відкриває можливості для використання таких технологій у системах контролю та безпеки, наприклад, при огляді пасажирів у транспортних вузлах або виявленні прихованих небезпечних предметів.

Сучасні терагерцові системи, такі як комерційна платформа SiRad Easy компанії Silicon Radar (рис.1.2), яка працює в діапазоні 119–126 ГГц, використовують високоефективні HDPE-лінзи. Незважаючи на те, що ці лінзи забезпечують необхідні параметри тестування і високу точність, їх значний недолік — висока вартість та обмежена спрямованість. В якості альтернативних рішень активно вивчаються метаматеріальні антени, що можуть забезпечити значно кращі характеристики спрямованості та чутливості, проте вони є дорогими у виробництві та складними для впровадження.



Рис.1.2 Радар SiRad Easy

Останнім часом також відзначається активний розвиток надпровідникових приймачів, що інтегрують фазову автопідстройку частоти (ФАПЧ), які демонструють високий потенціал для застосування у високоточних системах зв'язку та радіолокації. Проте їх широке впровадження ускладнюється необхідністю використання криогенного охолодження, що суттєво збільшує вартість та складність експлуатації таких систем.

Таким чином, використання терагерцового діапазону відкриває широкі перспективи у багатьох технологічних і прикладних сферах, хоча реалізація повного потенціалу цих технологій ще потребує вирішення ряду технічних, економічних та експлуатаційних викликів.

Висновки

Застосування радіосигналів терагерцового діапазону частот підвищує чутливість приймачів і зменшує вплив завмирань при багатопроменевому поширенні хвиль та відповідно забезпечує підвищення завадостійкості каналів передачі інформації, наведення, управління та керування. Крім того, можливість роботи з малою випромінюваною потужністю забезпечує на додаток до скритності передачі сигналу ще й мініатюризацію обладнання і економне енергоспоживання.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ УНІВЕРСАЛЬНОСТІ SiRad Easy ТА ПОРІВНЯННЯ ЛІНЗОВИХ АНТЕН

2.1 Вибір та обґрунтування архітектури модуля.

Розроблення приймально-передавального модуля для роботи в терагерцовому діапазоні частот є ключовим етапом у створенні заводозахищених систем для інфокомунікаційних і радіолокаційних застосувань. Архітектура модуля визначає його здатність забезпечувати високу пропускну здатність, заводозахищеність, точність визначення відстані та енергоефективність. У цьому розділі розглядаються вимоги до архітектури, аналізуються можливі архітектурні рішення, обґрунтовується вибір оптимальної конфігурації та описуються її компоненти.

Для забезпечення ефективної роботи приймально-передавального модуля в терагерцовому діапазоні сформульовано низку вимог. Модуль має підтримувати високу пропускну здатність на рівні кількох гігабіт на секунду, що необхідно для сучасних інфокомунікаційних систем, таких як бездротові мережі високої пропускну здатності. Архітектура повинна забезпечувати стійкість до електромагнітних перешкод, атмосферних шумів і поглинання сигналу атмосферними газами, зокрема водяною парою. Для радіолокаційних застосувань модуль має мати роздільну здатність на рівні сантиметрів, що вимагає високої частотної стабільності та чутливості приймача. Важливими є також компактність і енергоефективність для інтеграції в портативні пристрої, а також економічна доцільність, що досягається завдяки використанню доступних технологій, таких як 3D-друк для антен.

Для вибору оптимальної архітектури проаналізовано три основні підходи, які застосовуються в приймально-передавальних модулях для терагерцового діапазону. Гетеродинна архітектура використовує змішувачі та локальний осцилятор для перетворення вхідного терагерцового сигналу на проміжну частоту, а потім у базову смугу, що забезпечує високу чутливість і селективність,

але характеризується складністю реалізації, високим енергоспоживанням і великими габаритами. Архітектура прямого перетворення (Zero-IF) перетворює вхідний сигнал безпосередньо в базову смугу, що спрощує конструкцію та знижує енергоспоживання, але є чутливою до фазових шумів і має проблеми з нерівномірністю каналу, що знижує завадозахищеність. Архітектура на основі монолітних мікрохвильових інтегральних схем (MMIC) базується на інтеграції підсилювачів, змішувачів, фільтрів і антенних елементів в одному чіпі, що забезпечує компактність, високу інтеграцію та можливість роботи на терагерцових частотах, хоча потребує ретельної оптимізації компонентів.

На основі аналізу обрано архітектуру на основі MMIC з інтеграцією лінзової антени на базі платформи Silicon Radar. Цей вибір обґрунтовується компактністю та інтеграцією, що дозволяють об'єднати ключові компоненти в одному чіпі, зменшуючи розміри модуля та спрощуючи його виробництво. Платформа Silicon Radar забезпечує високу частотну стабільність у діапазоні 0.1–0.3 ТГц, який характеризується помірним атмосферним поглинанням, що дозволяє ефективно працювати в реальних умовах. Лінзові антени забезпечують вузьку діаграму спрямованості ($5\text{--}10^\circ$) і коефіцієнт підсилення до 20 дБ, що підвищує завадозахищеність і дальність передачі сигналу. Архітектура дозволяє використовувати різні модуляційні схеми, такі як QPSK або BPSK, та адаптивні алгоритми обробки сигналів, наприклад метод найменших квадратів (LMS), для компенсації перешкод у реальному часі. Використання 3D-друку для виготовлення лінзових антен із доступних діелектричних матеріалів, таких як PLA або ABS, знижує собівартість порівняно з традиційними методами виробництва.

Обрана архітектура включає лінзову антену, виготовлену з діелектричних матеріалів за допомогою 3D-друку, що забезпечує спрямованість сигналу та знижує витрати на виробництво. Малошумний підсилювач (LNA) підвищує чутливість приймача з коефіцієнтом шуму менше 6 дБ, дозволяючи ефективно обробляти сигнали в умовах атмосферних шумів. Змішувач виконує перетворення частоти вхідного сигналу в базову смугу, забезпечуючи високу лінійність і низькі втрати. Цифровий сигнальний процесор (DSP) реалізує

алгоритми адаптивної фільтрації (LMS) і кодування (LDPC), що підвищують завадозахищеність. Синтезатор частоти забезпечує стабільну генерацію сигналів у діапазоні 0.1–0.3 ТГц, що є критичним для точності роботи модуля.

Архітектура на основі MMIC із інтегрованою лінзовою антеною на платформі Silicon Radar є оптимальним рішенням для створення приймально-передавального модуля в терагерцовому діапазоні. Вона забезпечує високу пропускну здатність, завадозахищеність, компактність і економічну доцільність. Використання 3D-друку для виготовлення антен і сучасних алгоритмів обробки сигналів дозволяє створити ефективний і універсальний модуль, придатний для інфокомунікаційних і радіолокаційних застосувань.

2.2 Універсальність SiRad Easy

Платформа SiRad Easy від Silicon Radar є універсальним рішенням для створення приймально-передавальних модулів у терагерцовому діапазоні частот завдяки своїм унікальним характеристикам, які забезпечують адаптивність до різноманітних застосувань, технологічну гнучкість і відповідність сучасним вимогам до завадозахищених систем. Цей пункт присвячено аналізу універсальності платформи SiRad Easy, її здатності адаптуватися до різних сценаріїв використання та її переваг як основи для інфокомунікаційних і радіолокаційних систем.

Основою універсальності SiRad Easy є її базування на технології монолітних мікрохвильових інтегральних схем (MMIC) із використанням кремнієво-германієвої (SiGe) технології. Це дозволяє створювати модулі з високим рівнем інтеграції, що забезпечує компактність і можливість використання в портативних пристроях, таких як мобільні комунікаційні системи, компактні радіолокатори, біосенсиори та системи терагерцового зображення. Така універсальність робить платформу придатною для широкого спектра застосувань, від високошвидкісної передачі даних до точного зондування об'єктів у складних електромагнітних умовах.

SiRad Easy підтримує гнучке налаштування для різних типів модуляції, що дозволяє адаптувати модуль до специфічних вимог застосувань. Наприклад, для

інфокомунікаційних систем платформа може бути налаштована на використання складних модуляційних схем для забезпечення високої пропускної здатності, тоді як для радіолокаційних застосувань можливе налаштування на простіші схеми для підвищення точності визначення відстані. Крім того, платформа підтримує інтеграцію адаптивних алгоритмів обробки сигналів, що забезпечують динамічну компенсацію перешкод, підвищуючи надійність роботи в реальних умовах.

Ще однією важливою особливістю SiRad Easy є її сумісність із сучасними технологіями виготовлення, зокрема з 3D-друком для створення антен. Використання доступних матеріалів, таких як діелектричні полімери, дозволяє швидко та економічно виготовляти антени з високими характеристиками спрямованості, що є важливим для застосувань, де потрібна точна фокусування сигналу. Такий підхід знижує витрати на розроблення та виробництво, роблячи платформу привабливою для дослідницьких і комерційних проєктів.

SiRad Easy також вирізняється своєю здатністю працювати в широкому діапазоні сценаріїв, включаючи не лише традиційні інфокомунікаційні та радіолокаційні задачі, а й нові напрями, такі як терагерцова спектроскопія, безконтактне зондування матеріалів і медична діагностика. Наприклад, у біосенсориці платформа може використовуватися для створення систем із високою чутливістю до біологічних об'єктів, а в системах зображення — для формування деталізованих зображень із субміліметровою роздільною здатністю. Ця універсальність забезпечується можливістю точного налаштування параметрів роботи модуля, включаючи частотний діапазон, підсилення та алгоритми обробки даних.

Енергоефективність SiRad Easy є ще одним фактором, що сприяє її універсальності. Завдяки оптимізованій конструкції чіпа та низькому енергоспоживанню платформа підходить для використання в автономних системах, де обмежено джерела живлення, наприклад, у безпілотних апаратних платформах або портативних сенсорах. Водночас SiRad Easy забезпечує достатню продуктивність для обробки складних сигналів, що робить її придатною для високопродуктивних застосувань, таких як мережі 6G.

Платформа відповідає сучасним вимогам до терагерцових систем, описаним у науковій літературі, зокрема щодо необхідності створення компактних, енергоефективних і економічно вигідних рішень. Її здатність адаптуватися до різних умов експлуатації, включаючи роботу в середовищах із високим рівнем перешкод, забезпечується гнучкою архітектурою та підтримкою передових методів обробки сигналів. Це дозволяє використовувати SiRad Easy як універсальну основу для розробки модулів, що відповідають як поточним, так і перспективним потребам терагерцових технологій.

Таким чином, SiRad Easy є універсальним рішенням для розробки приймально-передавальних модулів завдяки високій інтеграції, підтримці гнучких модуляційних схем, сумісності з сучасними технологіями виготовлення та адаптивності до широкого спектра застосувань. Її здатність забезпечувати компактність, енергоефективність і економічну доцільність робить платформу ідеальною основою для створення інноваційних завадозахищених систем для інфокомунікаційних, радіолокаційних і нових технологічних застосувань.

2.3 3D-моделювання лінзової антени

Виготовлення лінзових антен за допомогою 3D-друку є перспективним підходом для створення вискоефективних компонентів приймально-передавальних модулів у терагерцовому діапазоні частот. Метою цього етапу було оцінити можливості 3D-моделювання та друку для створення лінзованих антен, які відповідають вимогам до продуктивності, економічної доцільності та технологічної доступності. Основна увага приділялася визначенню оптимального матеріалу, порівнянню якості виготовлення на різних типах 3D-принтерів і перевірці можливості самостійного виробництва антен як альтернативи комерційним аналогам.

Як показано на Рис.2.1, набір SiRad Easy зліва з додатковою лінзованою антеною та справа без неї. Максимальна дальність дії, наприклад фронтальної частини TRX120_001 на 122 ГГц становить приблизно 40 метрів з кутом розкриття 30 градусів (-6дБ) для цілей, таких як будівля або автомобіль. Кут розкриття пелюстки радару можна зменшити за допомогою лінзової антени.

Ефект фокусування залежить від відстані між передньою частиною радара і лінзової антени.

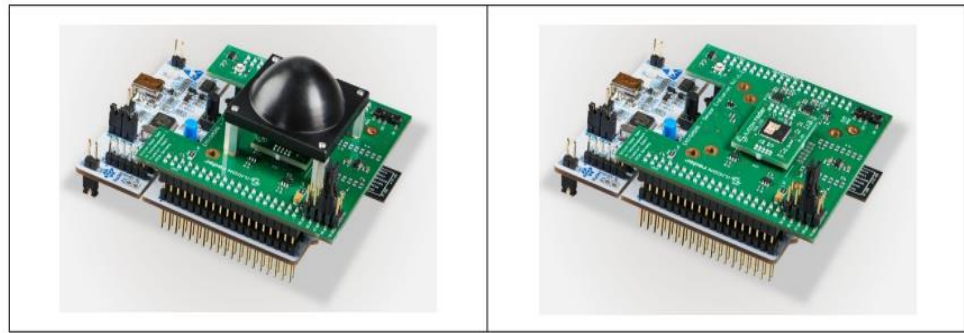


Рис.2.1 набір SiRad Easy з додатковою лінзованою антеною та без неї

На Рис.2.2 показана діаграма спрямованості без лінзи та з нею . Лінзу слід встановлювати на відстані 10-15 мм від поверхні передньої панелі радара , як показано праворуч .

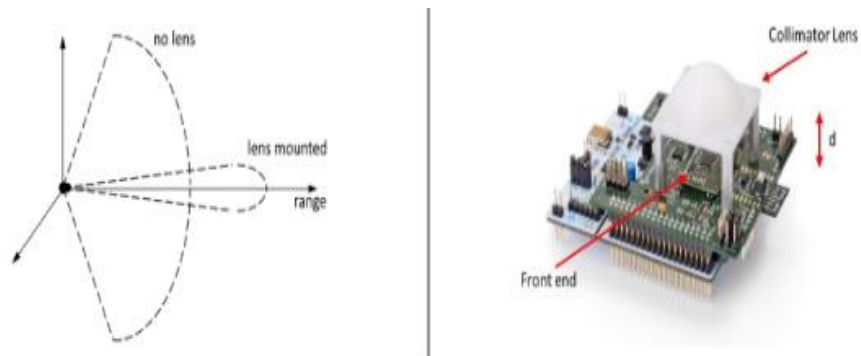


Рис.2.2 діаграма спрямованості та місце розміщення лінзи

Основними цілями виготовлення зразків лінзових антен було визначення оптимального матеріалу за критеріями коефіцієнта підсилення, стійкості до перешкод і економічної ефективності; порівняння характеристик антен, виготовлених на професійному та побутовому 3D-принтерах, для оцінки впливу якості друку; а також перевірка можливості самостійного виробництва антен для зниження витрат порівняно з комерційними аналогами.

Для реалізації цих цілей було проведено 3D-моделювання лінзових антен із використанням спеціалізованого програмного забезпечення, такого як SolidWorks Рис.2.3 , яке дозволило точно проектувати антени з урахуванням їхньої геометрії та електромагнітних характеристик у терагерцовому діапазоні.

Моделі антен розроблялися геометрично ідентичні до Collimator Lens for SiRad

Рис.2.4

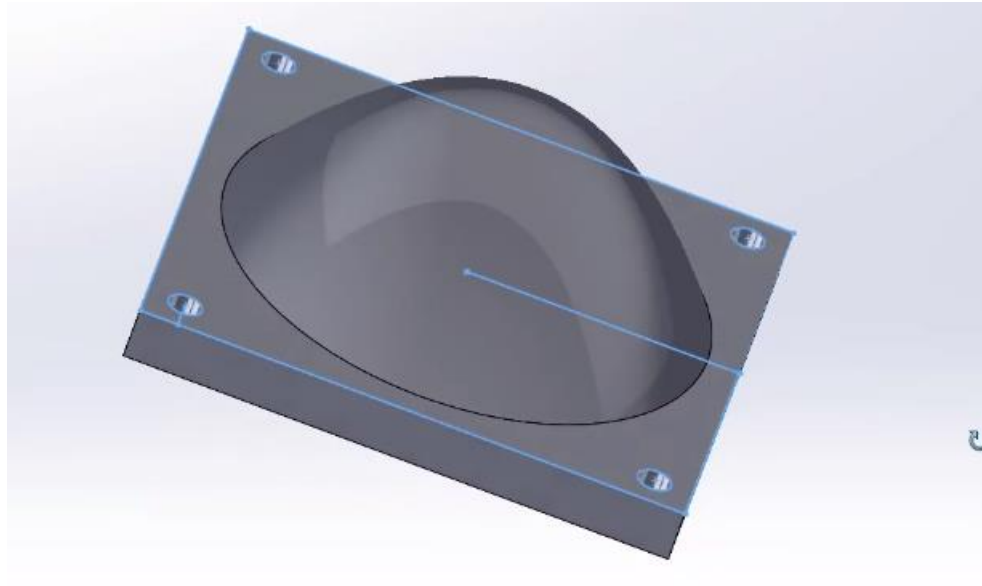


Рис.2.3 SolidWorks макет лінзи

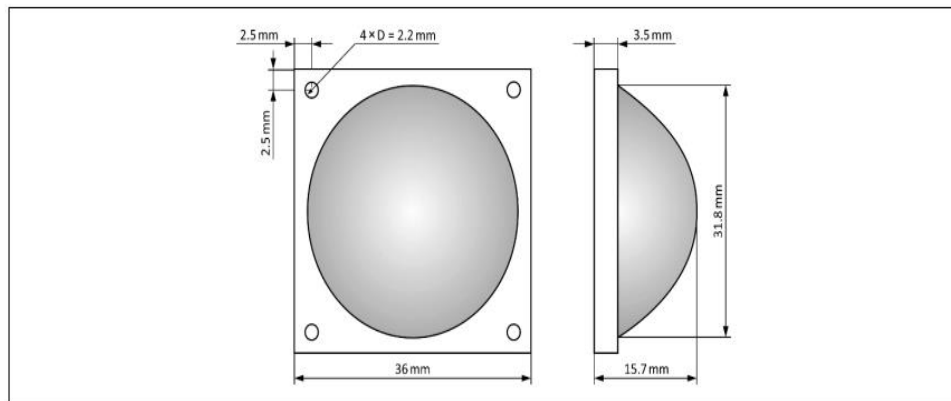


Рис.2.4 Геометричні розміри Collimator Lens for SiRad

2.4 Виготовлення зразків лінзових антен з різних матеріалів

Було обрано п'ять матеріалів для 3D-друку: PLA, ABS, PETG, D70 і TPU 95A. PLA характеризується легкістю обробки та екологічністю, що робить його доступним для швидкого прототипування. ABS вирізняється високою механічною міцністю і стійкістю до зовнішніх впливів, що підходить для застосувань у складних умовах. PETG поєднує міцність і стійкість до атмосферних впливів, забезпечуючи баланс між продуктивністю та

довговічністю. D70, як високоефективний діелектричний полімер, має низькі діелектричні втрати, що сприяє високій ефективності антени. TPU 95A, завдяки своїй гнучкості, дозволяє створювати антени, стійкі до деформацій, що є перевагою для портативних або носимих пристроїв. Для оцінки впливу якості друку зразки виготовлялися на професійному 3D-принтері (з точністю шару 0.05 мм) і побутовому 3D-принтері (з точністю шару 0.1–0.2 мм), що дозволило порівняти вплив точності геометрії на електромагнітні характеристики.

Для створення лінзових антен у терагерцовому діапазоні частот (0.1–0.3 ТГц) за допомогою 3D-друку необхідно врахувати склад матеріалів, їхню діелектричну проникність (ϵ_r), довжину хвилі (λ) у середовищі матеріалів і вартість виготовлення однієї антени. У цьому розділі розглянуто характеристики матеріалів PLA, ABS, PETG і TPU 95A, з акцентом на їхню придатність для виготовлення антен. Для PLA, ABS і PETG наведено склад, діелектричну проникність, довжину хвилі та розрахунок вартості однієї антени. Матеріали TPU 95A та D70 виключено з аналізу, оскільки вони належать до гнучких матеріалів.

Вартість матеріалів:

- ABS: 272 грн за 2 шт (1 шт 100% + 1 шт 50% білий), тобто 136 грн шт.
- PETG: 378 грн за 2 шт (1 шт 100% + 1 шт 25% сірий), тобто 189 грн шт.
- PLA: еквівалентно PETG, 378 грн за 2 шт (1 шт 100% + 1 шт модифікований), тобто 189 грн/шт.
- TPU 95A: 297 грн за 1 шт, тобто 297 грн/шт.

1. PLA (полілактид)

Склад: Полілактид є біорозкладним термопластом, виготовленим із відновлювальних джерел, таких як кукурудзяний крохмаль або цукрова тростина. Основним компонентом є молочна кислота, полімеризована в полімолочну кислоту. PLA може містити добавки (пластифікатори, барвники)

для покращення властивостей друку, але вони незначно впливають на діелектричні характеристики.

Діелектрична проникність (ϵ_r): Відносна діелектрична проникність становить 2.72–3.48 у діапазоні 1–100 МГц, середнє значення (3.1) у терагерцовому діапазоні (75–110 ГГц). Втрати ($\tan \delta$) від 0.03 до 4.31, що забезпечує низькі діелектричні втрати для безбарвного PLA.

2. ABS (акрилонітрил-бутадієн-стирол)

Склад: ABS є нафтобазованим термопластом, що складається з акрилонітрилу (15–35%), бутадієну (5–30%) і стиролу (40–60%). Акрилонітрил забезпечує хімічну стійкість, бутадієн — ударну міцність, стирол — жорсткість і легкість обробки. Може містити добавки для кольору або термостійкості.

Діелектрична проникність (ϵ_r): Відносна діелектрична проникність становить 2.88–3.42 у діапазоні 1–100 МГц, середнє значення (3.15). Втрати ($\tan \delta$) від 0.03 до 4.31, що забезпечує стабільність діелектричних властивостей.

3. PETG (поліетилентерефталатгліколь)

Склад: PETG є модифікованим поліетилентерефталатом із додаванням гліколю для підвищення гнучкості та ударної міцності. Основні компоненти — терефталат і етиленгліколь, із можливими добавками для стійкості до УФ-випромінювання або обробки. PETG не біорозкладний, але має високу хімічну стійкість.

Діелектрична проникність (ϵ_r): Відносна діелектрична проникність становить 2.675–3.48 у діапазоні 1–100 МГц, середнє значення (3.08). Втрати ($\tan \delta$) від 0.03 до 4.31, що забезпечує хороші діелектричні властивості.

Результатом виготовлення та порівняння матеріалів можна побачити на (рис.2.5), на ньому зображені всі виготовлені лінзові антени та оригінал в центрі.

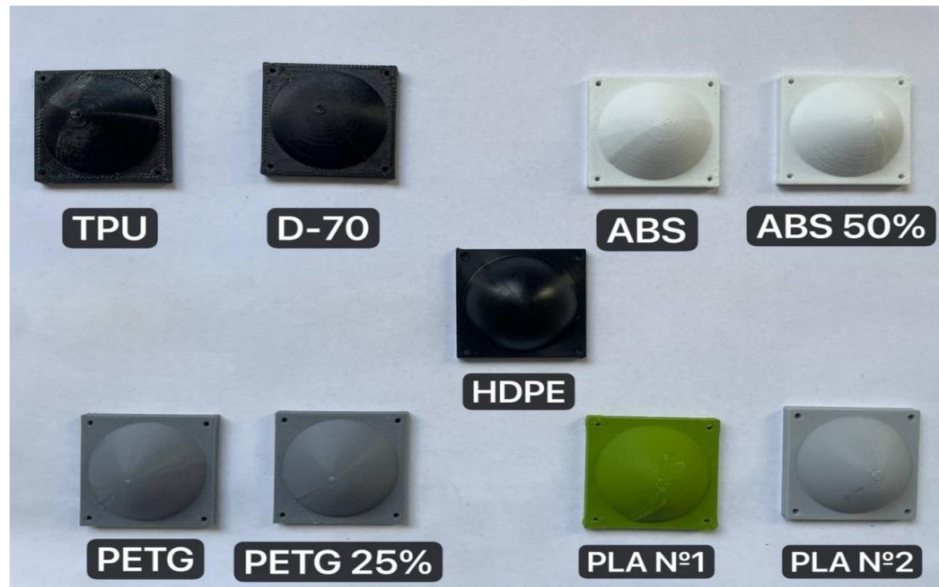


Рис.2.5 Макетні вироби за допомогою технології 3D-друку

2.5 Проведення практичного дослідження порівняння

У рамках дослідження лінзових антен для завадозахищеного приймально-передавального модуля в терагерцовому діапазоні частот (0.3 ТГц) було проведено експериментальне порівняння електромагнітних характеристик восьми зразків антен, виготовлених із різних матеріалів за допомогою технології 3D-друку Рис, а також еталонної антени з поліетилену високої щільності (HDPE) і контрольного тесту без антени. Цей розділ описує умови експерименту, параметри налаштування вимірювального обладнання, результати вимірювань, вплив діелектричних проникностей матеріалів та інших параметрів на характеристики антен, а також аналіз отриманих даних.

Вимірювання проводилися в кабінетних умовах для забезпечення контрольованого середовища з мінімальними зовнішніми перешкодами. Для імітації об'єкта, що відбиває терагерцові хвилі, використовувався відбивач у вигляді металевої пластини розміром 51 см × 40 см, розташованої на відстані 3 м від приймально-передавального модуля (рис.2.6) та (рис.2.7). Такий відбивач забезпечував стабільне відбиття сигналу, що дозволяло точно оцінити коефіцієнт підсилення антен. Відстань 3 м була обрана для моделювання типових умов роботи радіолокаційних або інфокомунікаційних систем у терагерцовому діапазоні.



Рис.2.6 Фотографія лабораторної установки для тестування

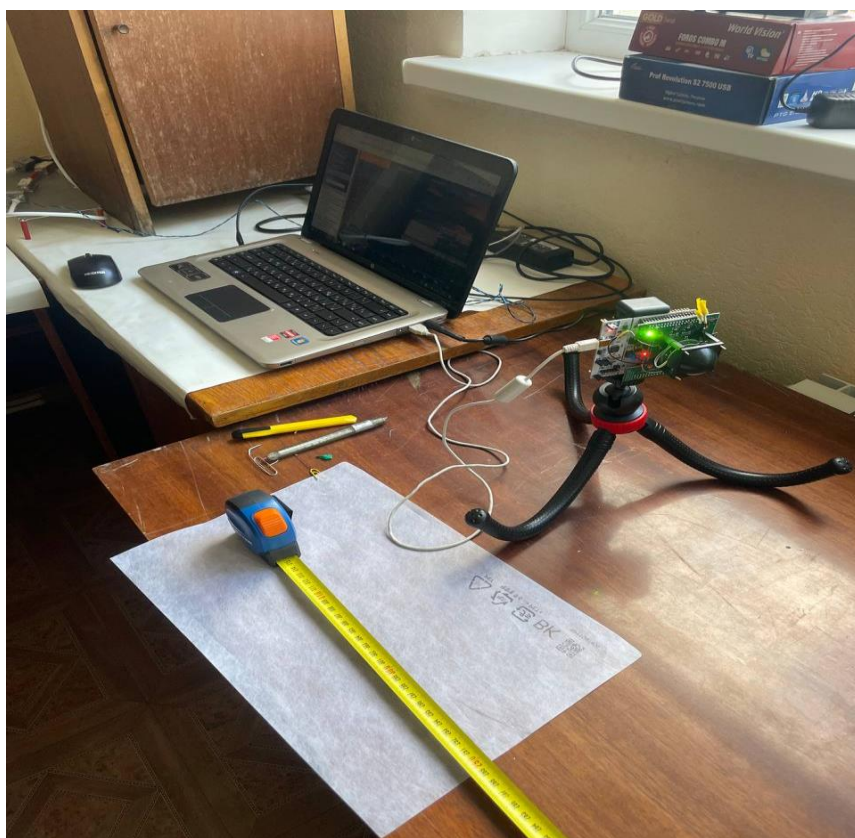


Рис.2.7 Фотографія лабораторної установки для тестування

Параметри налаштування обладнання

Для забезпечення точності вимірювань було використано наступні параметри налаштування вимірювального обладнання:

- **Смуга пропускання (bandwidth):** 300 МГц, що відповідає широкосмуговому сигналу в терагерцовому діапазоні для оцінки частотної характеристики антен.
- **Дільник тактової частоти АЦП (ADC clock divider):** 5, для забезпечення достатньої частоти дискретизації сигналу.
- **Кількість імпульсів (number of ramps):** 16, для підвищення точності вимірювань шляхом усереднення сигналів.
- **Час імпульсу (ramp time):** 1227 мкс, що забезпечує стабільну обробку сигналу.
- **Скасування постійної складової (DC cancellation):** увімкнено, для усунення впливу постійних шумів.
- **FIR-фільтр:** вимкнено, щоб уникнути додаткової обробки, яка могла б спотворити результати.
- **Зменшення вибірки (downsampling):** 0, для збереження повної роздільної здатності сигналу.
- **Віконна обробка (windowing):** увімкнено, для зменшення спектральних витоків.
- **Швидке перетворення Фур'є (FFT):** 1024 точки, для детального аналізу спектра сигналу.
- **Усереднення (average):** 1, для отримання даних із одного вимірювання без додаткового усереднення. Ці параметри забезпечували високу точність вимірювань і відповідність умов експерименту специфіці терагерцового діапазону.

Графіки приймально-передавального модуля з радіолінзами різних матеріалів у програмному середовищі WebGUI (рис.2.8-2.16) під час лабораторних випробувань.

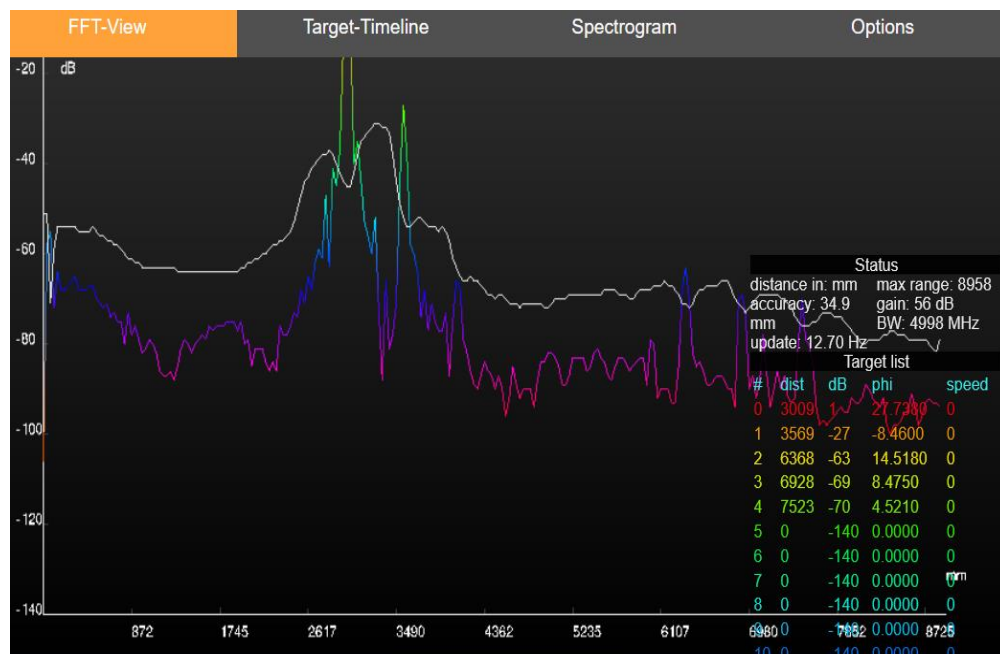


Рис.2.8 Лінза Silicon Radar HDPE

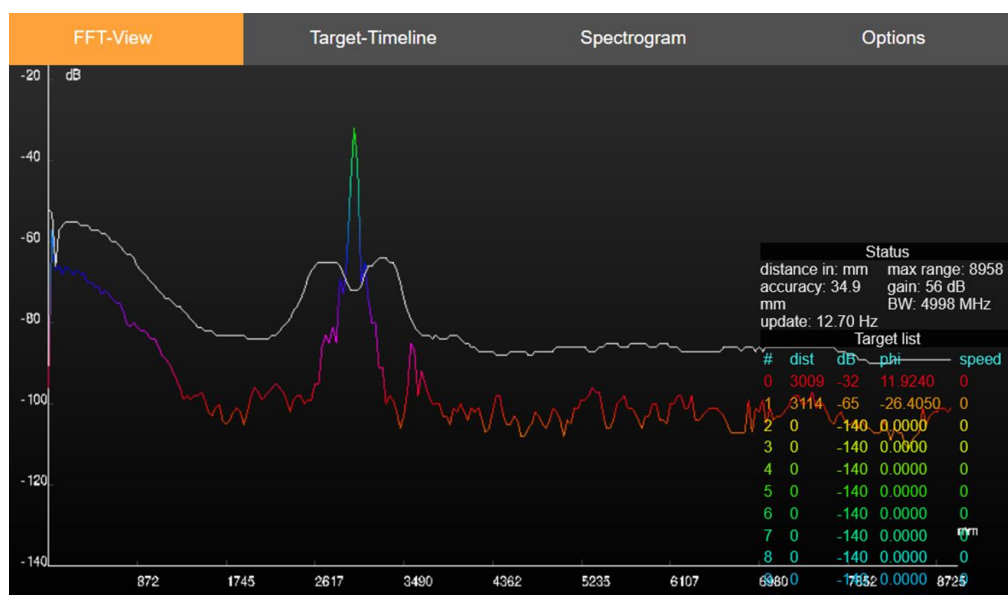


Рис.2.9 Лінза TPU95A

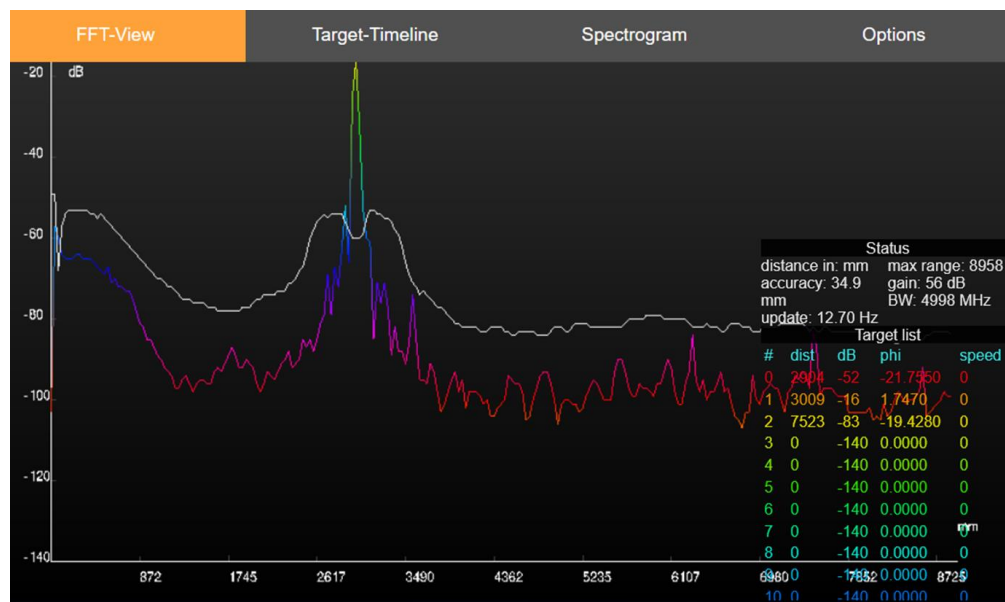


Рис.2.10 Лінза D70

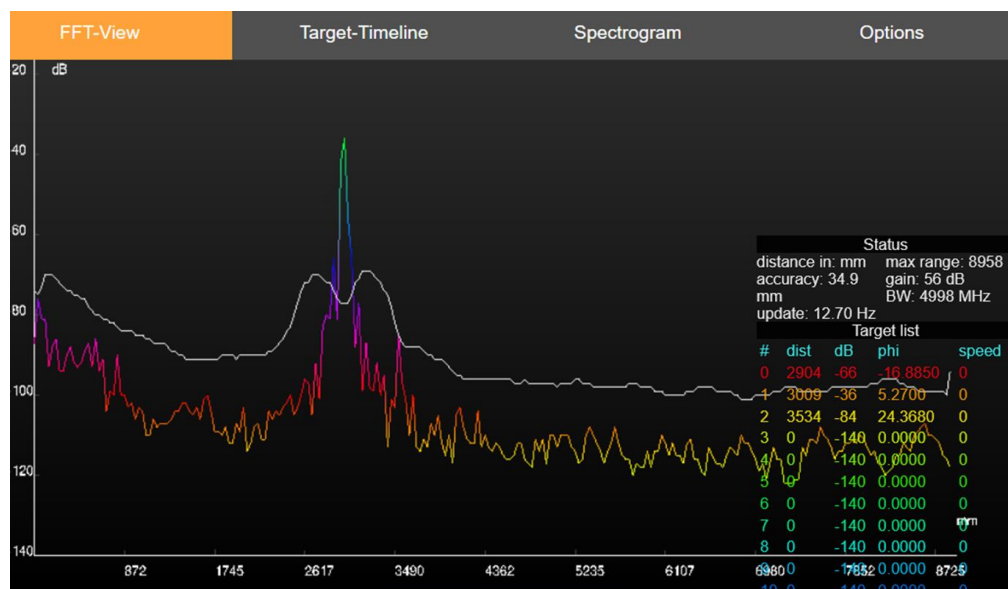


Рис.2.11 Лінза ABS (№1)

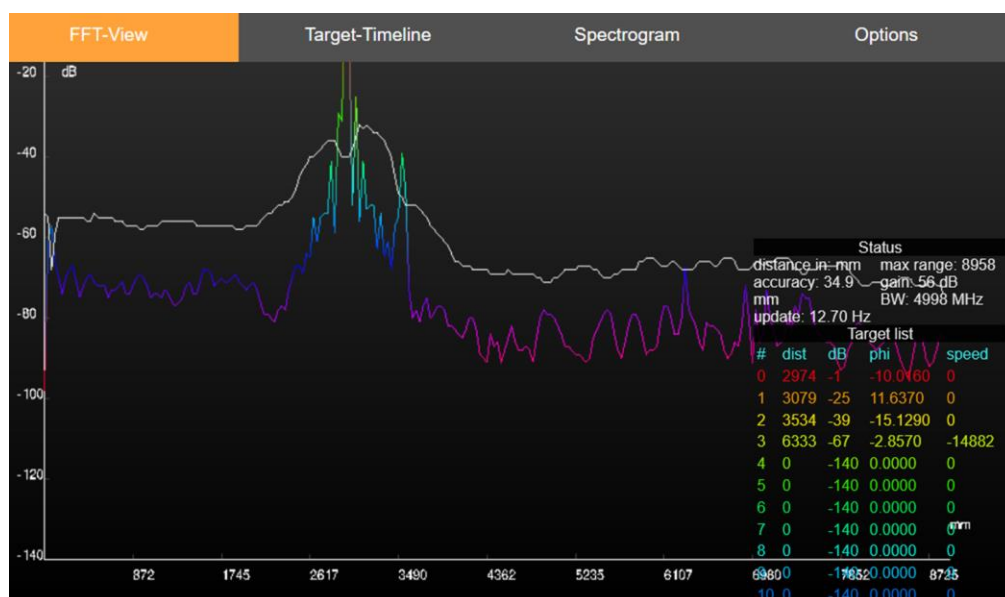


Рис.2.12 Лінза ABS (№2)

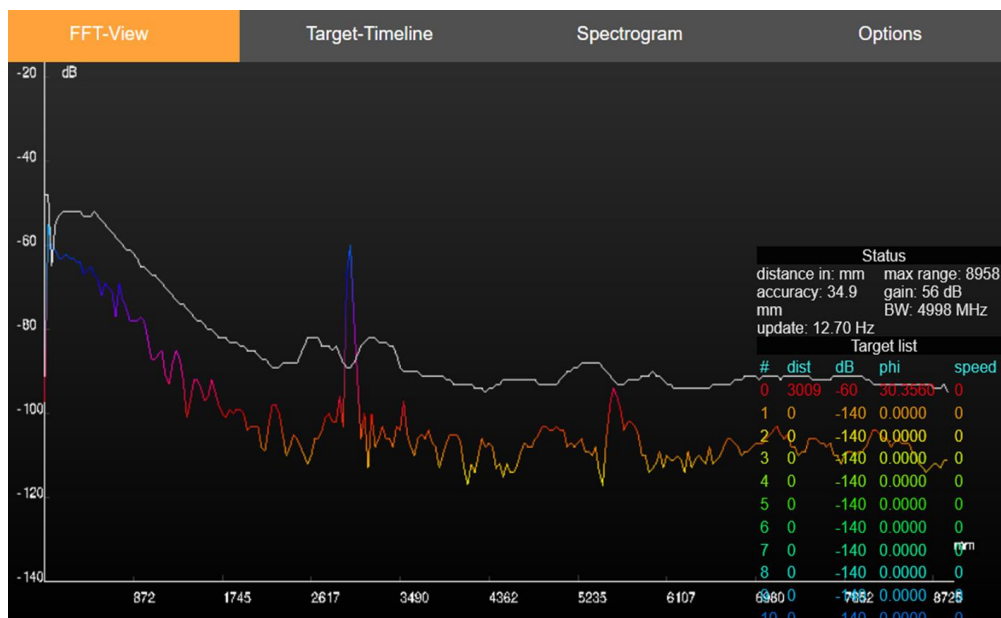


Рис.2.13 Лінза PETG(№1)

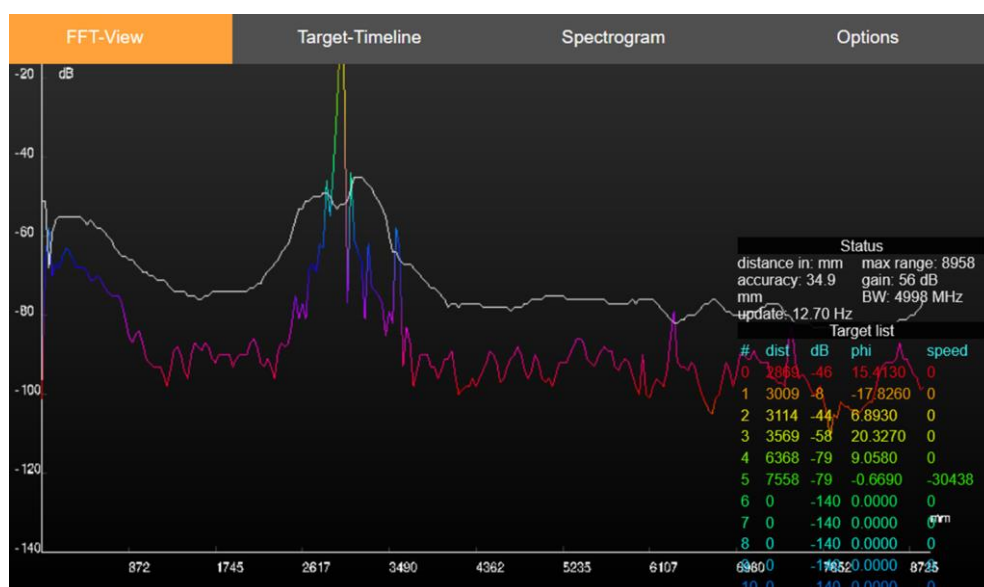


Рис.2.14 Лінза PETG(№2)

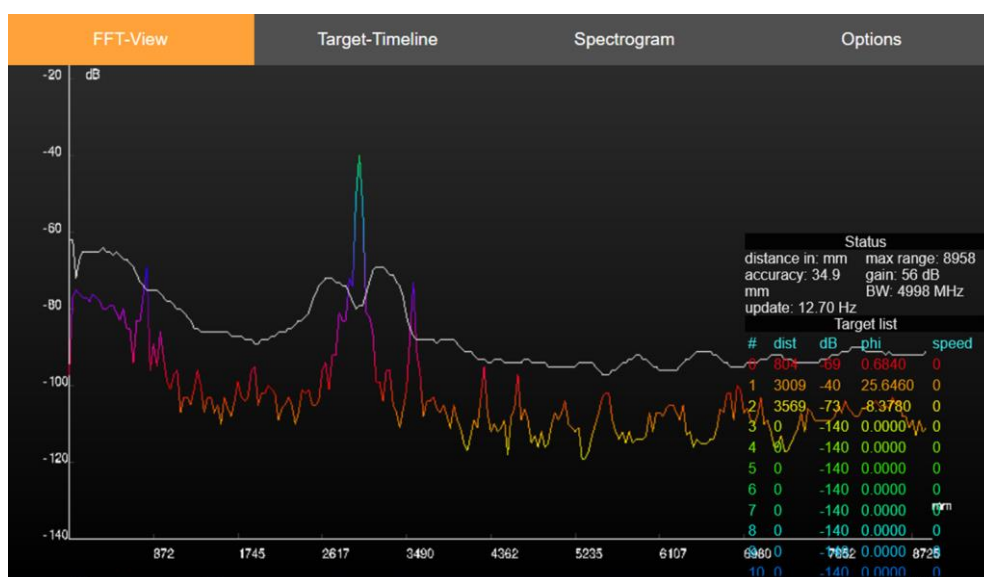


Рис.2.15 Без лінзової антени



Рис.2.16 Лінза PLA зелена

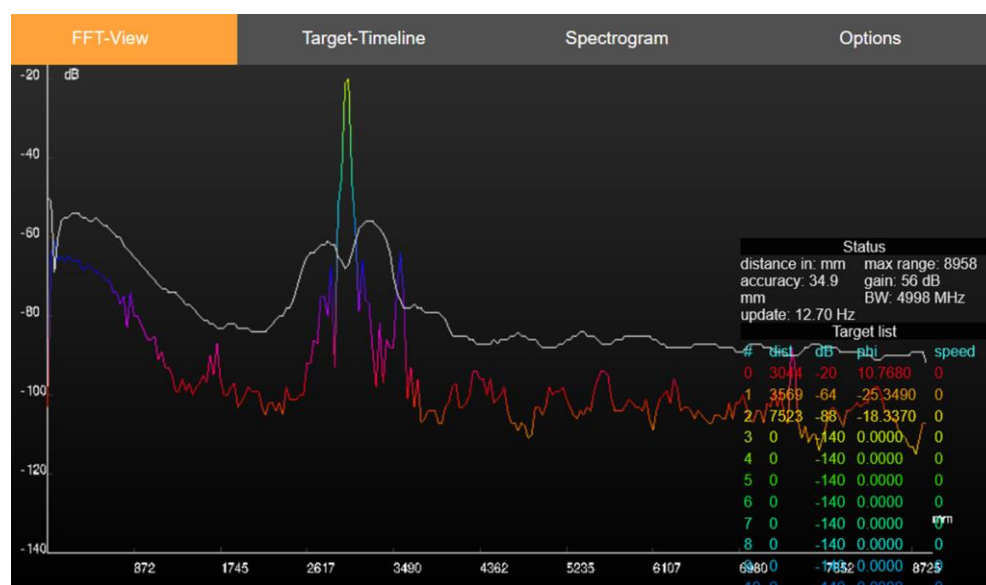


Рис.2.17 Лінза PLA сіра

2.6 Результати вимірювань

Результати вимірювань наведено нижче:

- **HDPE:** 1 дБ
- **TPU 95A:** -32 дБ
- **D70:** -16 дБ
- **ABS (50% заповнення):** -36 дБ
- **ABS (100% заповнення):** -1 дБ
- **PETG (25% заповнення):** -60 дБ
- **PETG (100% заповнення):** -8 дБ
- **Без антени:** -40 дБ

- **PLA (дешевий, домашній):** -10 дБ
- **PLA (високої якості):** -20 дБ

Еталонна антена (HDPE) показала найкращий результат (1 дБ), що пояснюється її низькою діелектричною проникністю ($\epsilon_r \approx 2.3$) і мінімальними втратами в терагерцовому діапазоні. HDPE є стандартним матеріалом для терагерцових антен завдяки високій прозорості для електромагнітних хвиль.

ABS (100% заповнення) продемонстрував результат, близький до еталонного (-1 дБ), що свідчить про його високу ефективність. Щільна структура матеріалу та діелектрична проникність ($\epsilon_r \approx 2.7$) забезпечують хороше фокусування сигналу з мінімальними втратами.

PETG (25% заповнення) показав найгірший результат (-60 дБ), що пояснюється низькою щільністю матеріалу через пористу структуру, що призводить до значних втрат сигналу та погіршення спрямованості.

TPU 95A (-32 дБ) і ABS (50% заповнення) (-36 дБ) показали незадовільні результати через підвищені втрати, спричинені неоднорідністю структури та вищими діелектричними втратами порівняно з HDPE або ABS (100%).

D70 (-16 дБ) і PLA (високої якості) (-20 дБ) продемонстрували середні результати, що може бути пов'язано з помірними діелектричними втратами та неоднорідністю матеріалу.

PLA (дешевий, домашній) (-10 дБ) виявився кращим за дорожчий PLA, що може вказувати на відмінності в якості друку або складі матеріалу, які впливають на втрати сигналу. Контрольний тест без антени (-40 дБ) показав базовий рівень сигналу, що підтверджує ефективність використання лінзових антен для підсилення сигналу, оскільки навіть антени з гіршими показниками (наприклад, ABS 100% і HDPE) перевищують цей рівень.

2.7 Розрахунок та аналіз параметрів лінзових антен

Проведемо теоретичний аналіз та розрахунки для визначення характеристик лінзової антени радара, зокрема чутливості приймача, та коефіцієнта підсилення антени, а також максимальної фактичної дальності роботи. Дослідження базуються на принципах роботи частотно-модульованого безперервного хвильового (FMCW) радара (122 ГГц). Радар працює шляхом

передачі сигналу, його відбиття від цілі та прийому відбитого сигналу для визначення відстані до об'єкту.

На основі наданих та отриманих з практичного дослідження даних, у нас є наступні параметри:

Потужність передавача: $P_t = 0.003$ Вт,

Довжина хвилі радіосигналу визначається через частоту:

$$\lambda = \frac{c}{f} \approx 2.46 \text{ мм} \quad (2.1)$$

де: $c=3 \times 10^8$ м/с — швидкість світла у вакуумі,

$f=122$ ГГц — частота сигналу радара (Гц)

Коефіцієнт підсилення антени (G):

За технічним довідником діаметр антени 31,8 мм, тобто:

$$A = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 = \frac{\pi D^2}{4} = 1296 \text{ мм}^2 = 1.296 \times 10^{-3} \text{ м}^2 \quad (2.2)$$

Розрахунок підсилення:

$$G = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \approx 2683.5 (\approx 34.3 \text{ dB}) \quad (2.3)$$

Втрати у вільному просторі:

$R=3$ м:

$$L_0 = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) = 20 \log_{10} (1.53 \times 10^4) = 20 \times 4.19 \approx 83.8 \text{ дБ} \quad (2.4)$$

$$L = 2L_0 = 167.6 \text{ дБ} \quad (2.5)$$

Прийнята потужність (P_r):

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^2 R^4} \quad (2.6)$$

Для HDPE лінзи:

$$P_r = \frac{(0.003) \times (112.2) \times (112.2) \times (2.46 \times 10^{-3})^2 \times (0.195)}{(4\pi)^2 \times (3)^4}$$

$$P_r \approx -65.65 \text{ дБм}$$

Для ABS 100% лінзи:

$$P_r = \frac{(0.003) \times (89.1) \times (89.1) \times (2.46 \times 10^{-3})^2 \times (0.124)}{(4\pi)^2 \times (3)^4}$$

$$P_r \approx -67.65 \text{ дБм}$$

Мінімальний рівень прийнятого сигналу ($S_{\min}$):

$$S_{\min} = \frac{SNR}{kTBF} \quad (2.7)$$

де:

$$SNR = \frac{P_k}{P_{\text{шуму}}} \quad (2.8)$$

$$S_{\min} \approx 1.004 \times 10^{-12} \text{ Вт}$$

Максимальна дальність дії радара ($D_{\max}$):

$$D_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot L \cdot S_{\min}}} \quad (2.9)$$

Для HDPE лінзи:

$$D_{\max,1} = \frac{4\sqrt{(0.003) \cdot (112.2) \cdot (112.2) \cdot (2.46 \times 10^{-3})^2 \cdot (0.195)}}{\sqrt{(4\pi)^3 \cdot (10^{167.6/10}) \cdot (1.004 \times 10^{-12})}}$$

$$D_{\max,1} \approx 7.89 \text{ м}$$

Для ABS 100% лінзи:

$$D_{\max,2} = \frac{4\sqrt{(0.003) \cdot (89.1) \cdot (89.1) \cdot (2.46 \times 10^{-3})^2 \cdot (0.124)}}{\sqrt{(4\pi)^3 \cdot (10^{167.6/10}) \cdot (1.004 \times 10^{-12})}}$$

$$D_{\max,2} \approx 6.45 \text{ м}$$

Виходячи з розрахунків максимальної дальності антени, ми отримали результати, які відрізняються від заявлених від виробника. Різниця матеріалів показує, що дальність лінз відрізняється на 6,45%, еталонна лінза все ж залишається ефективнішою, але різниця до 10% залишає її актуальною через її собівартість, яка є легко доступною та матеріал можливий для друку без додаткових до опрацювань, що дає економічну вигідність лінзі власного виробництва.

Практичне дослідження можливої дальності застосування лінзової антени без додаткових змін. Для цього потребують випробування з обчисленням результатів. Для випробувань було створено програму випробувань (таблиця 2.1), а саме змінюючи дальність від металевого відбивача дивитись рівень відбитого сигналу. Площа прямокутного відбивача 0,2 м². Параметри налаштування радарного модуля: bandwidth= 300 Mhz, ADC clock divider = 5, number of ramps =16, ramp time = 1227, DC cancellation ON, FIR filter OFF, downsampling 0, windowing ON. FFT 1024, average 1.

Таблиця 2.1

Програма виробництва приймально-передавального модуля терагерцового діапазону

ВМ, МГц	30 00	30 00	30 00	30 00	30 00	300 0	300 0	300 0	300 0	300 0	25 00	250 0	250 0
Відста нь, мм $\times 10^3$	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Рівень відбит ого сигнал у, дБм	-10	-27	-28	-30	-35	-31	-28	-37	-41	-42	-56	-66	-72
Виміре на відста нь, мм $\times 10^3$	5,0 47	6,1 27	7,0 61	8,0 53	9,0 74	10, 066	11, 058	12, 050	13, 072	14, 064	15, 06	16, 111	17, 127

Виходячи з практичного дослідження після 17 м важко сфокусувати об'єкт у вигляді відбивача через конструктивні недоліки та розміри самого відбивача у ролі об'єкту.

Розрахунок потужності приймача на практичному досліді:

$$P_{\text{приймач}} = P_{\text{передавач}} + G_{\text{передавач}} + G_{\text{приймач}} - L + G_{\text{відбивач}} \quad (2.10)$$

Потужність передавача: 3мВт = 4.8дБм

Коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антени(заявлені): 45,2 дБ

Втрати базові: 96,7 дБ

Втрати сумарні: 193,4 дБ

$$P_{\text{приймач}} = 4.8 \text{ дБм} + 45.2 \text{ дБ} + 45.2 \text{ дБ} - 193.4 \text{ дБ} + 55 \text{ дБ}$$

Висновки

Практичне дослідження порівняння лінзових антен для завадозахищеного

приймально-передавального модуля в терагерцовому діапазоні частот (0.3 ТГц) продемонструвало, що HDPE та ABS із 100% заповненням є найефективнішими матеріалами завдяки низьким діелектричним втратам і високій однорідності, забезпечуючи коефіцієнти підсилення 1 дБ і -1 дБ відповідно. PETG із 25% заповненням і TPU 95A показали найгірші результати через значні втрати сигналу, спричинені пористою структурою та високими діелектричними втратами. Дешевий PLA виявився ефективнішим за дорожчий аналог, що підкреслює важливість якості 3D-друку та складу матеріалу. Контрольний тест без антени, який показав -40 дБ, підтвердив необхідність використання лінзових антен для підсилення сигналу. Для покращення відстані передачі та якості сигналу рекомендується замінити традиційні діелектричні матеріали на метаматеріали, які дозволяють точно керувати електромагнітними властивостями, зменшуючи втрати та підвищуючи спрямованість із можливим коефіцієнтом підсилення до 25–30 дБ. Заміна класичної лінзової антени на лінзорупорну конструкцію є перспективним рішенням завдяки вищій спрямованості, ширшій смузі пропускання та стійкості до неточностей виготовлення. Оптимізація якості 3D-друку, зокрема використання SLA-принтерів і композитних матеріалів, сприятиме підвищенню точності геометрії антени. Впровадження адаптивних алгоритмів обробки сигналів і підсилювачів низького шуму покращить продуктивність. Ці заходи забезпечать створення ефективних і завадозахищених модулів для інфокомунікаційних і радіолокаційних застосувань у терагерцовому діапазоні. За результатами випробувань, зрозуміло потребує поліпшення антена для збільшення відстані. Тому пропонується створення нової антени та власного радіодатчика.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ ПРИЙМАЛЬНО-ПЕРЕДАВАЛЬНОГО МОДУЛЯ

3.1 Пропозиція рупорно-лінзової антени з метаматеріалами

Так, з рівня техніки відома рупорна антена з діелектричною лінзою [1], що має квадратно-круглий хвилеводний перетворювач, конічний рупор і діелектричну лінзу. Ця конструкція дозволяє значно покращити діаграму спрямованості, забезпечує компактність антени та підвищує коефіцієнт посилення випромінюваного сигналу на виході. Антена ефективно перетворює сферичний хвильовий фронт у плоский, що підвищує якість передачі сигналу в мікрохвильовому діапазоні. Використання діелектричної лінзи дозволяє зменшити довжину антени, покращити спрямованості та знизити коефіцієнт стоячої хвилі. Недоліками такої антени є обмежена здатність адаптації до змінних умов експлуатації, а також залежність характеристик спрямованості від точності встановлення діелектричної лінзи, що може впливати на стабільність роботи антени.

Також відома широкосмугова рупорна антена з лінзою [2], що має конструкцію з прямокутним хвилеводом, короткозамикачем, коаксіальним збуджувачем та пірамідальним рупором. Така конструкція забезпечує широкосмугові характеристики антени, покращує якість спрямованості та зменшує рівень бічних перешкод. Антена ефективно працює в широкому діапазоні частот, зменшуючи рівень небажаних перешкод і підвищуючи якість сигналу. Конструкція з прямокутним хвилеводом і пірамідальним рупором забезпечує широкосмугову роботу та зниження рівня бічних пелюсток діаграми спрямованості. Це сприяє підвищенню спрямованості антени та зменшенню небажаних випромінювань у напрямках, відмінних від основного. Зниження рівня бічних пелюсток також зменшує можливість виникнення інтерференції з іншими сигналами та покращує загальну ефективність антени. Недоліками рупорної антени є обмежена можливість налаштування кута спрямованості та регулювання параметрів фокусування, що може знизити універсальність антени в різних умовах експлуатації.

Ще з рівня техніки відома пірамідальна рупорна антена з інтегрованим хвилеводом [3]. Конструкція включає пірамідальну рупорну структуру, інтегровану з хвилеводом Substrate Integrated Waveguide (SIW), що означає інтегрований у підкладку хвилевід. Посилення рупорної антени додатково покращується завдяки оптимізації геометрії вихідного отвору рупора та використанню середнього навантаження, яке сприяє зменшенню ширини променя на рівні половинної потужності. Це дозволяє покращити спрямованість антени, збільшити робочу відстань, підвищити здатність до придушення перешкод, а також досягти переваг у вигляді компактного розміру, вузького променя та значного коефіцієнта підсилення.

Зазначені особливості забезпечують багатопроменеву спрямованість для одночасного формування кількох променів. Це дозволяє покривати кілька напрямків одночасно, що є корисним для радіолокаційних або комунікаційних систем з багатопроменевим випромінюванням. Недоліками є обмежена смуга пропускання і труднощі в узгодженні з іншими системами, оскільки специфічна конструкція антени може не відповідати стандартним вимогам і потребує додаткових налаштувань для ефективної роботи.

Найбільш близьким за конструкцією до запропонованої корисної моделі є лінзо-рупорна антена [4]. До її складу, зокрема, входять рупор та діелектрична лінза, закріплена на його вихідному отворі. У основі рупора знаходиться вхідний отвір, в якому закріплена резонаторна пластина. На цій пластині є конічна порожнина, з'єднана з хвилеводною порожниною, утворена стінками рупора. Діелектрична лінза закріплена на вихідному отворі так, щоб її фокус був спрямований на фазовий центр рупора, забезпечуючи ефективну концентрацію і передачу електромагнітних хвиль.

Недоліком описаної лінзо-рупорної антени є обмеження відстані та спрямованості сигналу через жорстку конструкцію, яка фокусує сигнал лише в заданому напрямку, що знижує її ефективність у ситуаціях, коли потрібне широке покриття або зміна напрямку передачі. Крім того, неможливість коригування параметрів діелектричної лінзи унеможливорює адаптацію антени до змінених умов експлуатації, наприклад, до іншого частотного діапазону чи

напрямку. Це також ускладнює виправлення похибок, що виникають під час виготовлення, і зменшує універсальність антени в динамічних системах.

В основу корисної моделі, що заявляється, поставлено задачу отримати надвисокочастотну рупорно-лінзову антену, яка забезпечує високоякісне фокусування і передачу сигналів з підвищеним коефіцієнтом підсилення та вузькою діаграмою спрямованості.

Поставлену задачу вирішують створенням надвисокочастотної рупорно-лінзової антени (рис.3.1), яка містить рупор і розташовану на його вихідному отворі діелектричну лінзу, в якій новим є те, що діелектрична лінза інтегрована таким чином, що її кріплення до рупорного випромінювача було виконане з можливістю регулювати кут нахилу антени шляхом зміни відстані між рупором і лінзою, а також до складу антени додатково входить блок інтеграції метаматеріальних антен у вигляді інтегрованої кристало-підсилюючої мікросхеми, розташованої у вхідному отворі рупору.

Інтеграція метаматеріальних антен у кристало-підсилюючу мікросхему дозволяє зменшити розміри конструкції, зберігаючи її ефективність.

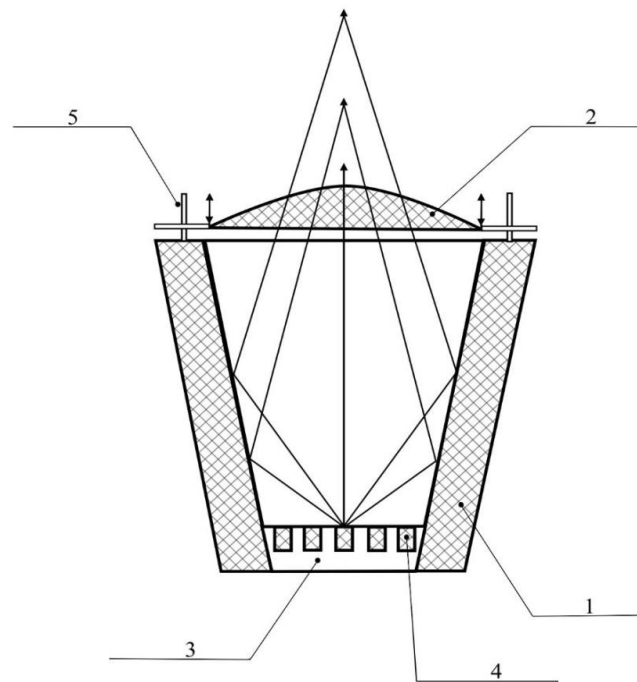


Рис.3.1 схематичне зображення рупорно-лінзової антени

На рис.3.1 можна бачити, що всередині рупору 1 знаходиться блок інтеграції метаматеріальних антен 4, розміщений всередині кристало-підсилюючої мікросхеми 3. На виході антени до стінок рупорного випромінювача 1 за допомогою кріплень лінзи 5 приєднана діелектрична лінза 2.

Рупор 1 виконує функцію первинного випромінювача, зосереджуючи енергію в напрямку лінзи 2 для початкового фокусування променя, мінімізуючи втрати сигналу на початкових етапах. Кристало-підсилююча мікросхема 3 в антені виконує роль основного елемента збудження сигналу завдяки інтегрованому у неї блоку метаматеріальних антен 4. Ця мікросхема 3 забезпечує генерацію та збудження електромагнітних хвиль, які проходять через рупор 1 і фокусуються діелектричною лінзою 2, знижуючи втрати енергії на початковому етапі передачі сигналу.

Рупорно-лінзова антена працює наступним чином.

Кристало-підсилююча мікросхема 3, розташована у вхідному отворі рупору 1, підсилює керуючий сигнал на вході у рупор. Цей сигнал передається до блоку інтеграції метаматеріальних антен 4, який також знаходиться в рупорі 1. Блок інтеграції метаматеріальних антен 4 генерує електромагнітний інформаційний сигнал, який надалі проходить через рупор 1, який концентрує енергію сигналу в напрямку виходу, мінімізуючи втрати і розсіювання. На виході рупора встановлена діелектрична лінза 2, яка фокусує випромінювання, забезпечуючи вузьку діаграму спрямованості сигналу. Кріплення лінзи 5 дозволяє змінювати відстань між рупором і лінзою, що дає можливість регулювати кут спрямованості антени для більш ефективного налаштування.

Антена придатна для промислового використання завдяки поєднанню високої продуктивності, універсальності та компактності, що забезпечують її ефективне функціонування у різних галузях. Основною перевагою є здатність концентрувати більшу частину енергії випромінювання у заданому напрямку, що дозволяє збільшити дальність виявлення об'єктів на 20-30 % у порівнянні зі стандартними рупорними антенами. Це досягається за рахунок інтеграції

діелектричної лінзи, яка не лише забезпечує високий рівень фокусування сигналу, але й зменшує втрати енергії під час передачі.

Коефіцієнт підсилення антени повинен досягати 35 дБі, що перевищує аналогічні показники стандартних антен (30 дБі) і дозволяє підвищити потужність сигналу на 15-20 %. Це забезпечує чіткість передачі даних і зниження рівня перешкод, що є особливо важливим у терагерцовому діапазоні, де навіть незначні втрати енергії можуть впливати на якість сигналу.

Антенa також має можливість адаптивного регулювання параметрів спрямованості за допомогою регулювання відстані між рупорним випромінювачем і діелектричною лінзою. Це дозволяє налаштовувати антену під різні умови експлуатації, зберігаючи оптимальну продуктивність у складних середовищах, таких як міські райони з високою щільністю забудови або промислові зони зі значними перешкодами.

Розміщення блоку інтеграції метаматеріальних антен безпосередньо в кристало-підсилюючу мікросхему дозволяє значно зменшити розміри і вагу антени. Це спрощує монтаж і робить конструкцію зручною для мобільного використання, наприклад, у портативних системах зв'язку або на безпілотних платформах. Використання сучасних технологій, таких як IBM 9HP Silicon-Germanium (SiGe) або високочастотні Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (у перекладі українською «комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник») рішення, підтримує роботу антени в терагерцовому діапазоні, забезпечуючи стабільність і надійність роботи.

Висока універсальність, адаптивність і продуктивність антени роблять її придатною для широкого спектру завдань, зокрема для електронних комунікацій, радіолокаційного моніторингу, сенсорних систем і систем бездротового зв'язку. Її компактність, зменшена вага та високий коефіцієнт підсилення забезпечують ефективну роботу навіть у складних умовах, підтверджуючи її промислову придатність.

3.2 Архітектура приймально-передавального модуля

За прототип плати ТГЧ-трансивера була взята плата Radar board

налагоджувального макету SiRad Easy компанії Silicon Radar(рис.3.2). Для розробки електричних принципових схем приймально-передавального модуля була використана система автоматизованого проєктування (САПР) Altium Designer. Ця САПР дозволяє виконувати весь спектр операцій, який необхідний для виготовлення модуля, а саме: складати електричні принципові схеми, проводити трасування друкованих плат, виконувати 2D- та 3D-візуалізацію плати, готувати файли друкованих плат у відповідних форматах (Gerber) для подальшого виготовлення фотошаблонів плат тощо.

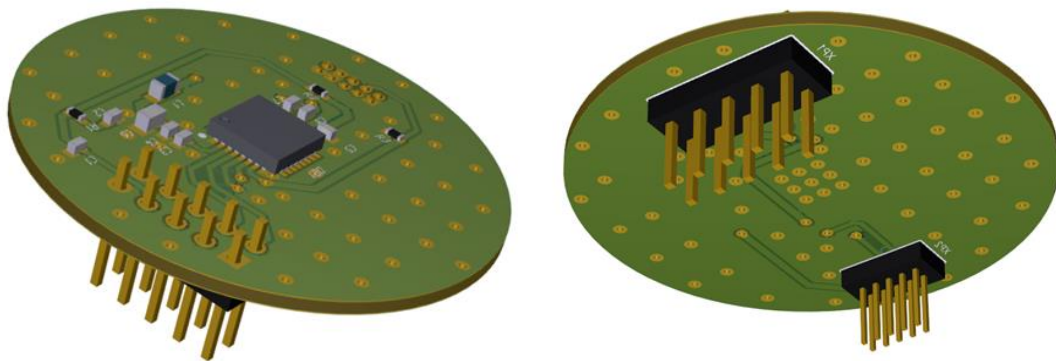


Рис.3.2 3D модель плати ТГЧ-трансивера на базі ІМС TRA_120_002: зліва вид зверху; праворуч вид знизу.

Габаритні розміри приймально-передавального модуля (рис.3.3) не перевищують по діаметру 35 мм, по довжині 10 мм з інтегрованою антеною(додаток1 та додаток 2).

Параметри конфігурації приймально-передавального модуля

1. Наявність опції Увімкнення\Вимкнення випромінювання;
2. Еквівалентна ізотропно випромінювальна потужність (10...30 мВт) – відповідно до технічних характеристик ІМС Silicon Radar TRX120_001/TRA120_002;
3. Мінімальна частота свіпу (117.8...120.8ГГц) – відповідно до технічних характеристик ІМС Silicon Radar TRX120_001/TRA120_002;
4. Максимальна частота свіпу (124.3...127.3ГГц) – відповідно до технічних характеристик ІМС Silicon Radar TRX120_001/TRA120_002;

5. Робочий діапазон частот свіпу від 120.8 ГГц до 124.3 ГГц;
6. Час наростання частоти від мінімальної до максимальної
(10 ± 5 мкс);
7. Час зниження частоти від максимальної до мінімальної
(10 ± 5 мкс);
8. Найменування входів(таблиця 3.1):

Таблиця 3.1

Найменування входів приймально-передавального модуля:

№ п/п	Назва входу	Призначення
1	TX_EN	Увімкнення/вимкнення випромінювання
2	LE	Активація шини SPI синтезатора частоти
3	CLK	Синхросигнал для шини SPI
4	DATA	Дані, що передаються по шині SPI
5	TXDATA	Контроль параметрів світ-сигнала синтезатора частоти
6	MUXOUT	Доступ до сигналів керування синтезатором частоти
7	IFIp	Диференційний вихід I-каналу
8	IFIn	
9	IFQp	Диференційний вихід Q-каналу
10	IFQn	
11	+5 V	Живлення, $5 \pm 0,5$ В, $I_{\max} = 0,5$ А
12	GND	Общ. +5В

Інші параметри задаються за замовчуванням розробником для досягнення найкращої якості сигналу.

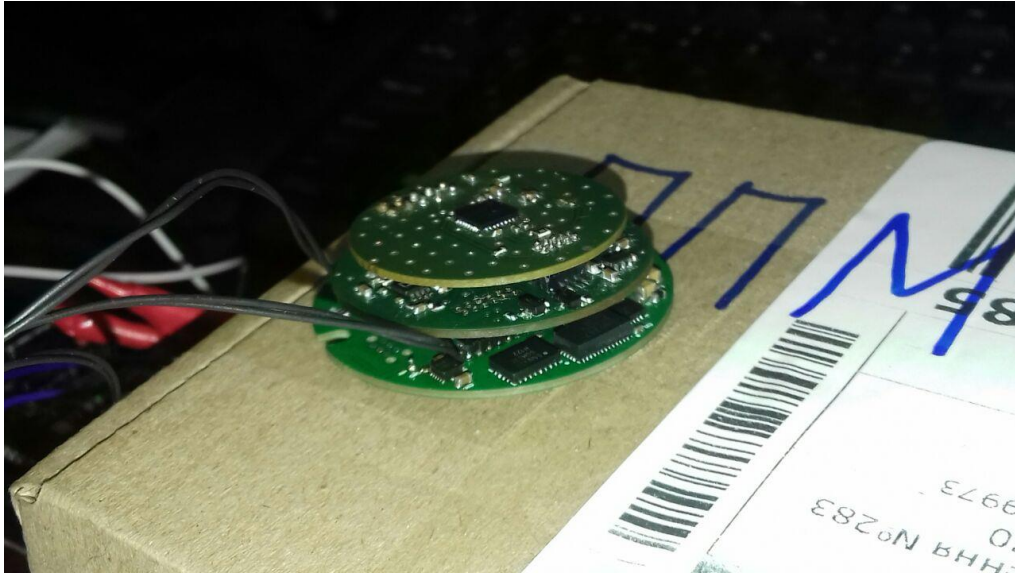


Рис.3.3 Макетний зразок приймально-передавального модуля

3.3 Мініатюрний радіодатчик

Найближчим аналогом є радарний набір від виробника «Silicon Radar» на основі чипа TRA_120_002[1], який є компактним радіодатчиком. Він забезпечує високу роздільну здатність вимірювань і має окремі сигнальні лінії та інтерфейси для передавального та приймального каналів, розміщених на платі трансивера. Основні характеристики такого радіодатчика: частотний діапазон від 119,3 до 125,8 ГГц, режими роботи FMCW (частотно-модульований безперервний сигнал) та CW (безперервна хвиля), живлення від одного джерела напруги у 3,3 В, споживання струму – 112 мА. До складу радарного набору, що включений виробником до радіодатчика, входять: квадратний плоский безвиводний корпус розміром 8×8 мм², у якому мікроконтролер підключений до персонального комп'ютера (ПК), який передає команду про створення сигналу до плати формування та обробки сигналів, яка підключена до плати трансивера, у якій інтегровані приймальні та передавальні антени, що передають та приймають сигнал в сторону об'єктів та назад. Також до плати трансивера на відстані 10-15 мм під'єднано антену, у даному радіодатчику лінзову антену, розташовану на квадратному плоскому безвиводному корпусі для спрямованості сигналів.

Наявність у складі радіодатчика саме лінзової антени обмежує дальність застосування антени до 40 метрів, крім того, у пристрої відсутнє регулювання

кута направленості променя від антени.

Задачею даної корисної моделі є створення мініатюрного радіодатчика із більшим радіусом дії та точнішим передаванням даних за рахунок конструктивних змін у кріпленні кута лінзової антени.

Поставлену задачу вирішують створенням мініатюрного радіодатчика, до складу якого входять плата трансивера, у яку інтегровані приймальні та передавальні антени, плата формування та обробки сигналів, мікроконтролер та антена, в якому новим є те, що в якості антени використана рупорно-лінзова антена, яку під'єднують до плати трансивера.

Заявлена корисна модель представляє мініатюрний радіодатчик (рис.3.4), що містить мікроконтролер, плату формування та обробки сигналів, плату трансивера та рупорно-лінзову антену для підвищення дальності і точності вимірювань. Мікроконтролер поєднують з персональним комп'ютером для керування та виводу результатів. На платі формування та обробки сигналів розміщена плата трансивера, у яку інтегровані передавальні та приймальні антени. До плати трансивера приєднана на відстані 10-15 мм рупорно-лінзова антена для збільшення дальності до 100 метрів.



Рис.3.4 Загальна схема об'єкта корисної моделі мініатюрного радіодатчика

Загальна схема об'єкта корисної моделі представлена на рис. До складу мініатюрного радіодатчика входять мікроконтролер 1, плата формування та обробки сигналів 2, плата трансивера 3 та рупорно-лінзова антена 4.

Мініатюрний радіодатчик працює наступним чином. Персональний комп'ютер поєднаний з мікроконтролером 1 для живлення та команди про початок читання інформації. З мікроконтролера 1 передача про створення сигналу поступає на плату формування та обробки сигналу 2, яка створює сигнал на передавання, який плата трансивера 3 через вмонтовані антени передає до рупорно-лінзової антени 4, що розташована на відстані 10-15 мм. Після цього приймальна антена на платі трансивера 3 передає сигнал до плати формування та обробки сигналів 2, яка приймає сигнал та передає його до мікроконтролера 1, який в свою чергу передає на персональний комп'ютер рівень потужності сигналу у децибелах та часовий зсув. На основі різниці між переданим і прийнятим сигналами розраховують відстань до об'єкта. Мікроконтролер 1 передає результати вимірювань (рівень сигналу та відстань) на персональний комп'ютер для візуалізації або подальшої обробки.

Перевагою мініатюрного радіодатчика є малогабаритність, висока спрямованість та потужність сигналу, а також здатність інтеграції з рупорно-лінзовою антеною для збільшення дальності.

Макетний зразок датчика працює в діапазоні частот 121–127 ГГц з частотно-модульованим безперервним сигналом (FMCW), що дозволяє отримувати високоточні дані про відстань, швидкість і напрямок руху об'єктів. Він має вбудовану антенну систему і здатний працювати в різних умовах експлуатації, включаючи екстремальні температури.

Перевагою корисної моделі, що заявляється, є те, що він має мікроконтролер, який керує синтезатором частот, розраховує відстань до перешкод по сигналам та відображає результати розрахунків у вигляді графіку. А також його малогабаритність завдяки інтегруванню приймальних та передавальних антен у одну плату трансивера.

Датчик може використовуватись для виявлення об'єктів на відстані до 30

метрів, проте застосування додаткової рупорно-лінзової антени дозволяє збільшити відстань до 100 метрів.

Особливістю конструкції є можливість налаштування частотного діапазону та швидкості частотної модуляції, що дозволяє адаптувати пристрій до різних умов експлуатації. Додатково передбачена можливість інтеграції з цифровими інтерфейсами для передачі даних у реальному часі.

Макетний зразок демонструє високу стабільність роботи та широкий температурний діапазон експлуатації, що дозволяє використовувати його в екстремальних умовах. Його перспективи включають інтеграцію в автомобільні системи безпеки, радарні системи для дронів і роботів, а також у портативні системи аналізу навколишнього середовища.

3.4 Дистанційне керування радіодатчика

Схема дистанційного керування(рис.3.5) виглядає наступним чином: радіодатчик Silicon Radar (121–127 ГГц) підключений до ПК через COM port для передачі команд (налаштування: смуга пропускання, FFT, час імпульсу) та отримання даних (відстань, дБ) для відображення графіків. ПК з'єднаний з Інтернетом, що дозволяє через AnyDesk дистанційно керувати датчиком із віддаленого пристрою, змінюючи налаштування та переглядаючи результати в реальному часі.

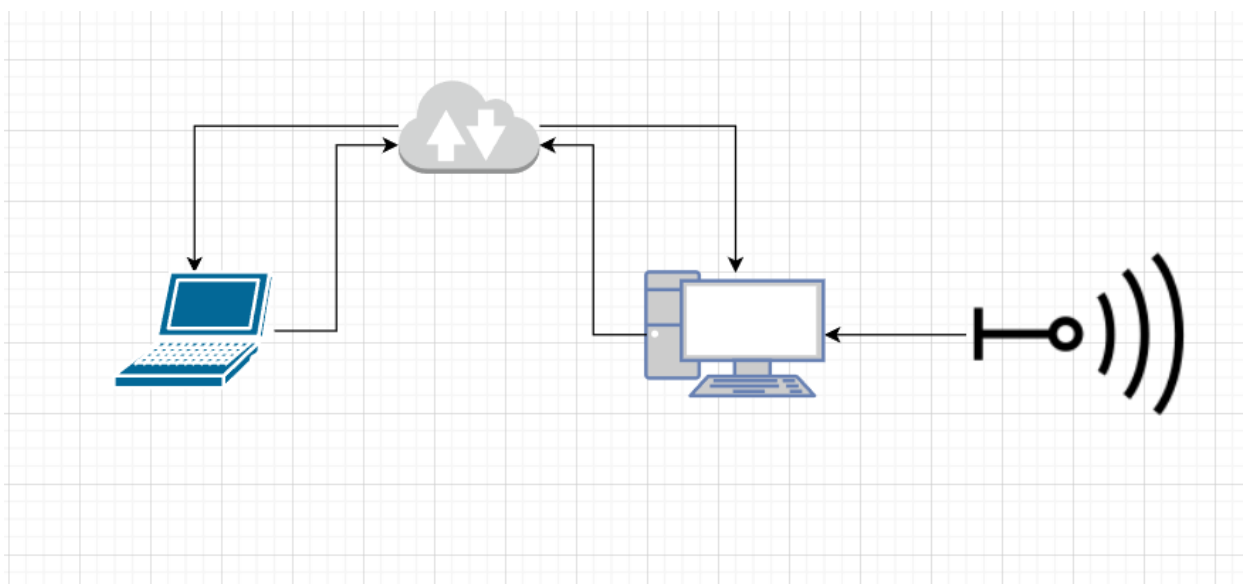


Рис.3.5 Схема дистанційного керування датчиком

Детально робота дистанційного керування за схемою можна описати наступним чином:

Підключення та налаштування через СОМ-порт

ПК надсилає команди для конфігурації радіодатчика. Основні параметри, які можна налаштувати, включають:

- **Смуга пропускання:** Визначає частотний діапазон, у якому працює датчик (121–127 ГГц), що впливає на роздільну здатність відстані. Наприклад, більша смуга пропускання (до 6 ГГц у цьому випадку) дозволяє точніше розрізняти об'єкти, розташовані близько один до одного.
- **FFT (швидке перетворення Фур'є):** Використовується для обробки сигналів у базовому банді, щоб виділити спектральні компоненти, пов'язані з рухомими об'єктами або відстанню до цілей. Налаштування розміру FFT впливає на швидкість і точність аналізу.
- **Час імпульсу:** Регулює тривалість радіосигналу, що впливає на чутливість і максимальну дальність виявлення. Коротші імпульси підвищують роздільну здатність, але зменшують дальність.

Отримання даних:

- **Відстань:** Вимірювання відстані до об'єктів у реальному часі, наприклад, від 7 см (для смуги 6 ГГц) до десятків метрів залежно від цілі та об'єктива.
- **Рівень сигналу в дБ:** Характеризує інтенсивність відбитого сигналу, що корисно для оцінки якості виявлення та наявності перешкод.

Інтернет підключення ПК

- ПК підключений до Інтернету, що розширює можливості системи. Це з'єднання дозволяє інтегрувати датчик у мережеву інфраструктуру, надаючи доступ до віддаленого керування через програмне забезпечення, таке як AnyDesk. AnyDesk забезпечує

безпечне віддалене підключення до ПК, використовуючи шифрування (TLS 1.2, RSA 2048) і низький обсяг даних (близько 1 МБ), що робить його ефективним навіть при повільному Інтернеті.

Дистанційне керування через програмне середовище AnyDesk

Завдяки AnyDesk користувач із віддаленого пристрою (наприклад, ноутбука, смартфона або іншого ПК) може:

- **Змінювати налаштування:** Регулювати смугу пропускання, розмір FFT або час імпульсу в реальному часі через графічний інтерфейс (WebGUI).
- **Переглядати результати:** Оглядати графіки відстані, рівнів сигналу в дБ або спектральних даних, що відображаються на ПК, у режимі реального часу.
- **Контролювати процес:** Моніторити роботу датчика, аналізувати дані та вносити корективи без фізичного доступу до обладнання.

Дистанційне керування радіодатчиком забезпечує гнучкість у доступі з будь-якої точки світу за наявності Інтернету, що дозволяє операторам працювати з будь-якого місця. Воно сприяє економії часу та ресурсів завдяки відсутності потреби в фізичній присутності, що особливо цінно для віддалених локацій. Можливість реального часу аналізу даних дозволяє оперативно налаштовувати параметри для оптимальної роботи системи. Підвищена безпека досягається через моніторинг у небезпечних зонах на відстані, захищаючи персонал від ризиків. Спільна робота кількох фахівців через віддалений доступ полегшує командну взаємодію та вирішення завдань. Зручність для дистанційного навчання та демонстрацій робить систему ідеальною для освітніх цілей чи презентацій. Можливість інтеграції з хмарними системами забезпечує зберігання та обробку даних для подальшого аналізу. Дистанційне оновлення прошивки чи програмного забезпечення підвищує довговічність і актуальність обладнання. Підтримка кросплатформності на Windows, macOS, Android та iOS дозволяє керувати системою з різних пристроїв. Ефективність роботи навіть за повільного

Інтернету завдяки низькому обсягу даних AnyDesk гарантує стабільність з'єднання.

Висновки

Розробка надвисокочастотної рупорно-лінзової антени з метаматеріалами та інтеграція її в мініатюрний радіодатчик має значну практичну користь, особливо в контексті сучасних технологічних потреб. Запропонована антена, завдяки регульованій діелектричній лінзі та блоку метаматеріальних антен, забезпечує підвищений коефіцієнт підсилення і вузьку діаграму спрямованості, що дозволяє збільшити дальність виявлення об'єктів до 100 м порівняно з 40 м у аналогів, таких як набір Silicon Radar. Це дає змогу ефективно використовувати пристрій у задачах, де потрібна висока точність і дальність, наприклад, в автомобільних системах безпеки для уникнення зіткнень, у радарних системах дронів для навігації чи в робототехніці для моніторингу навколишнього середовища. Користь також полягає в адаптивності антени, можливість регулювання кута спрямованості шляхом зміни відстані між рупором і лінзою дозволяє налаштовувати пристрій під різні умови експлуатації, наприклад, у міських зонах із щільною забудовою або промислових середовищах із перешкодами. Інтеграція метаматеріальних антен у кристало-підсилюючу мікросхему зменшує розміри та вагу конструкції, що робить її зручною для портативних систем, таких як безпілотники чи мобільні сенсори. Підвищена потужність сигналу на 15–20% і зниження рівня перешкод у терагерцовому діапазоні забезпечують чіткість передачі даних, що критично для систем зв'язку та радіолокації.

Приймально-передавальний модуль із робочим діапазоном 120.8–124.3 ГГц і підтримкою режимів FMCW та CW дозволяє отримувати високоточні дані про відстань, швидкість і напрямок руху об'єктів, а його компактність сприяє інтеграції в малогабаритні пристрої. Дистанційне керування через AnyDesk додає гнучкості, дозволяючи операторам налаштовувати параметри та аналізувати дані в реальному часі з будь-якої точки світу, що економить ресурси, підвищує безпеку в небезпечних зонах і полегшує командну роботу.

Сенс цієї розробки підтверджується її перевагами над аналогами: більша дальність, адаптивність, компактність і висока продуктивність відкривають широкі перспективи для використання в сучасних технологіях, включаючи автомобільну промисловість, безпілотні системи, системи зв'язку та промислові сенсори. Стабільність роботи в екстремальних умовах і можливість інтеграції з цифровими інтерфейсами роблять пристрій універсальним і перспективним для подальшого розвитку, зокрема в умовах зростання попиту на мініатюрні, але потужні радіолокаційні системи. Таким чином, розробка не лише має практичну цінність, а й відповідає актуальним потребам технологічного прогресу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

Підсумовуючи, ця робота присвячена розробці завадозахищеного приймально-передавального модуля в терагерцовому діапазоні для визначення відстані до об'єктів, що стало відповіддю на зростаючу потребу сучасних технологій у високошвидкісному зв'язку та точному позиціонуванні. Цей проєкт об'єднав інноваційні підходи до створення надвисокочастотних антен, мініатюрних радіодатчиків і систем дистанційного керування, щоб забезпечити надійні рішення для інфокомунікаційних і радіолокаційних систем. Основна мета полягала у створенні компактного, ефективного та адаптивного модуля, здатного працювати в складних умовах із мінімальними перешкодами, що було досягнуто завдяки інтеграції рупорно-лінзових антен із метаматеріалами та використанню сучасних платформ, таких як Silicon Radar.

Розроблена надвисокочастотна рупорно-лінзова антена з інтеграцією метаматеріальних елементів стала ключовим елементом роботи. Її високий коефіцієнт підсилення до 35 дБі та вузька діаграма спрямованості дозволяють значно покращити дальність виявлення об'єктів – на 20–30% порівняно зі стандартними аналогами. Така антена забезпечує якісне фокусування сигналу, що критично важливо для роботи в умовах високої щільності перешкод, наприклад, у міських районах чи промислових зонах. Її адаптивність до різних умов експлуатації, досягнута завдяки регулюванню відстані між рупором і лінзою, робить її універсальним інструментом. Компактність і зменшена вага, отримані завдяки інтеграції метаматеріалів у кристало-підсилюючі мікросхеми, відкривають можливості для використання в портативних пристроях, таких як дрони чи мобільні сенсори.

Мініатюрний радіодатчик, розроблений на базі цього модуля, працює в діапазоні 121–127 ГГц із частотно-модульованим безперервним сигналом (FMCW) і забезпечує точне визначення відстані, швидкості та напрямку руху об'єктів на відстані до 100 метрів. Це рішення спрямоване на вирішення проблеми обмеженої дальності традиційних радіодатчиків, пропонуючи високу точність і надійність у реальних умовах. Використання 3D-друку для виготовлення лінзових антен із матеріалів, таких як HDPE та ABS, довело економічну вигоду

та доступність виробництва, хоча тести виявили, що пористі матеріали, як PETG, потребують подальшої оптимізації. Цей датчик призначений для інтеграції в системи, де критичними є компактність і реальна часова обробка даних, що робить його ідеальним для широкого спектра застосувань.

Впровадження дистанційного керування через AnyDesk стало логічним завершенням роботи, розширивши її функціональність. Ця система дозволяє операторам із будь-якої точки світу налаштовувати параметри модуля, аналізувати дані в реальному часі та візуалізувати результати, що особливо цінно для віддалених чи небезпечних локацій. Підтримка кросплатформності та інтеграція з хмарними сервісами забезпечують гнучкість і безпеку, підкреслюючи відповідність сучасним трендам цифровізації.

Перспективи цієї розробки надзвичайно широкі й охоплюють кілька ключових сфер. У телекомунікаціях модуль може стати основою для мереж 6G, де потрібна надвисока пропускна здатність і стійкість до перешкод. Його здатність передавати дані на великі відстані з мінімальними втратами робить його перспективним для міжсупутникового зв'язку та широкосмугового доступу в сільській місцевості. У сфері безпеки антена та датчик можуть бути інтегровані в системи аеропортів, вокзалів чи прикордонних зон для виявлення прихованих об'єктів чи контролю доступу, використовуючи високу роздільну здатність терагерцового діапазону. Автономний транспорт, включаючи автомобілі та дрони, отримає вигоду від точного визначення відстані та швидкості, що підвищить безпеку на дорогах і в повітряному просторі. У промисловості модуль знайде застосування в автоматизованих системах, наприклад, для моніторингу обладнання чи складів, де потрібна безперервна робота в реальному часі. Медична діагностика також може скористатися цією технологією для безконтактного сканування тканин, а сільське господарство – для аналізу ґрунтів чи врожаю за допомогою портативних сенсорів.

Економічний ефект від впровадження цієї розробки полягає в зниженні витрат на виробництво завдяки 3D-друку та доступним матеріалам, а також у скороченні витрат на технічне обслуговування через дистанційне керування. Для подальшого розвитку проєкту пропонується зосередитися на вдосконаленні

метаматеріалів для зменшення втрат сигналу, оптимізації 3D-друку з використанням композитних матеріалів і інтеграції з системами штучного інтелекту для автоматизації обробки даних. Це дозволить розширити функціональність модуля, адаптувати його до нових умов і підвищити конкурентоспроможність на глобальному ринку. Розробка вже демонструє практичну цінність, закладаючи міцну основу для інновацій у бездротових технологіях, і має всі шанси стати частиною технологічного прориву наступного десятиліття.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Наритник Т. М., Сайко В. Г., Романов Д. О., Комаров В. О., Фомін М. М. Аналіз перспектив використання терагерцевого діапазону частот для безпроводових мереж зв'язку спеціального призначення // Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки. – 2024. – Вип. 5. – С. 138–153. – doi: 10.58254/viti.5.2024.13.138.
2. Convergence of Broadband and Broadcast/Multicast in Maritime Information Networks https://www.sciopen.com/article_pdf/1425373508562079745.pdf
3. 6Genesis Flagship Program: Building the Bridges towards 6G-enabled Wireless Smart Society and Ecosystem <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfi-fe2019081624413.pdf>
4. Y. Yashchyshyn, N.A. Andrushchak, I.D. Karbovnyk, K. Godziszewski M.V. Lobur, A.S. Andrushchak, «New Interference Technique for Determination of Low Loss Material Permittivity in the Extremely High Frequency Range», IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 64, no. 11, pp. 3005–3012, Nov. 2015, doi: 10.1109/TIM.2015.2437631
5. Kawano, Y., Nagatsuma, T. Key Technologies for THz Wireless Link by Silicon CMOS Integrated Circuits. Photonics, 2018, Vol. 5, No. 4. Доступно на: <https://www.mdpi.com/2304-6732/5/4/50>.
6. Terahertz Frequency Range. In: Vorobiyenko P., Ilchenko M., Strelkovska I. (eds). Current Trends in Communication 12. M. Ilchenko, T. Narytnyk, and G. Avdeyenko (2021). Wireless Communication Systems of and Information Technologies. Lecture Notes in Networks and Systems, vol.212. Springer, Cham. p.189-222.
7. Tran H., Kaddoum G. RF Wireless Power Transfer: Regreening Future Networks // IEEE Potentials. — 2018. — т. 37, № 2. — с. 35—41.
8. Сайко В.Г., Наритник Т.М. Безпроводові системи зв'язку терагерцевого діапазону. Німеччина: LAP LAMBERT Academic Publishing RU. – 2019. – 72 с.

9. Saiko, V., Narytnyk, T., Brailovskyi, M., Nakonechnyi, V. Radiating telecommunication system of the sub-THz-band to protect objects from unauthorized access // 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference: Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2019 - Proceedings, 2019, pp. 698–702.
10. Narytnyk, T., Saiko, V., Bilous, O., Fisun, A. Energy calculation of the terahertz radio link Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika), 2019, 78(6), стр. 537–557.
11. Сайко, В., & Наритник, Т. (2023). Модель побудови бездротової терагерцової мережі з підвищеною надійністю зв'язку. International Science Journal of Engineering & Agriculture, 2(2), 166.
12. Saiko Volodymyr, Narytnyk Teodor. 5G Wireless method with increased reliability and energy efficiency using terahertz frequency range. Scientific foundations in research in Engineering: collective monograph / Kornylo I., Gnyp O. – etc. – International Science Group. – Boston : Primedia eLaunch, 2022. 609-625 pp. Available at : DOI – 10.46299/ISG.2022.MONO.TECH.2. URL: <https://isg-konf.com/scientific-foundations-in-research-in-engineering/>. 6–181. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230202.16://doi.org/10.20535/2411-2976.22022.4-14>
13. Naoya Kukutsu and Yuichi Kado: Overview of millimeter and terahertz wave application Research. - 11. Naoya Kukutsu and Yuichi Kado: Overview of millimeter and terahertz wave application Research. - NTT Technical Review, March 2009. - Vol. 7, No.3. NT10.
14. Наритник, Т. М. Телекомунікаційні системи терагерцового діапазону [Текст] : монографія / Т. М. Наритник, С. О. Кравчук. -Житомир : ФОП «Євенок О.О.», 2015. -394 с.
15. Terahertz Radiation System Market Share 2023 In-depth Analysis, Growth Opportunities, Upcoming Challenges, Future Trends and Forecast to 2029. [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.theexpresswire.com/pressrelease/Terahertz-Radiation-System->

Market-Share-2023-In-depth-Analysis-Growth-Opportunities-Upcoming-Challenges-Future-Trends-and-Forecast-to-2029_18201986

16. Мережі мобільного зв'язку нового покоління 4G/5G/6G // Сайко В.Г., Одарченко Р.С., Абакумова А.О., Наритник Т.М., Наконечний В.С., Домрачев В.М., Толюпа С.В., Заблоцький В.Ю., Баховський П.Ф.: монографія. – К.: ТОВ «Про формат», 2021. – 200 с., pp.207-212.
17. Наритник Т.М., Сайко В.Г. Беспроводові системи зв'язку терагерцового діапазону Книга.-International Book Market Service Ltd –LAP LAMBERT Academic Publishing .-2019.-68р. T Technical Review, March 2009. - Vol. 7, No.3
18. Цифрові радіорелейні та тропосферні лінії зв'язку (основи розрахунку) : навч. посіб. / Наритник Т. М., Почерняєв В. М., Повхліб В. С. ; Одес. нац. акад. зв'язку ім. О. С. Попова. - Одеса : ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2019. - 163 с.
19. Документація на TRX_120_001. [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://siliconradar.com/products/single-product/120-ghz-radar-transceiver/>
20. Документація на TRA_120_002. [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: https://siliconradar.com/products/single-product/120-ghz-transceiver-tra_120_002/
21. Collimator Lens for SiRad® Evaluation Kits – Accessory for Radar Evaluation Boards. [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: https://siliconradar.com/datasheets/Datasheet_Collimator_Lens_V1.1.pdf
22. SiRad Easy 300 GHz Front End Board. [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: https://siliconradar.com/wiki/SiRad_Easy_300_GHz_Front_End_Board
23. SiRad Easy® r4, SiRad Easy® & SiRad Simple®. User Guide. [Електронний ресурс]
24. Авдєєнко Г.Л., Наритник Т.М., Бичок А.В., **Буглак А.О.** Приймально-передавальний модуль в терагерцовому діапазоні частот. Матеріали десятої Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційно-

комунікаційні технології та кібербезпека» (ІКТК-2024). Харків, ХНУРЕ, 2024, С. 46-53.

25. Авдєєнко Г.Л. , Бичок А.В., Карушкін Н.Ф., Наритник Т.М., Крючкова Л.П., **Буглак А.О.** Транзисторні джерела генерації міліметрових хвиль. Матеріали десятої Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційно-комунікаційні технології та кібербезпека» (ІКТК-2024). Харків, ХНУРЕ, 2024, С. 54-66.
26. Патент на корисну модель № 159277. Мініатюрний радіодатчик / Авдєєнко Г. Л., Наритник Т. М., Буглак А. О., Лутчак О. В.; заявник і власник: Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського". — № u 2024 06120;. 23.12.2024; опубл. 07.05.2025, Бюл. № 19.
27. Заява про видачу патенту на винахід (КМ) Надвисокочастотна рупорно-лінзова антена, Номер заявки u 2024 05939, з 27.12 перебуває на формальній експертизі



Додаток 2

Сторінка №

Підп. у дата

Взам. шиф. №

Ид. № подл.

A1*

Пристрій формування та обробки сигналів (Контролер К-РДЦ 3530.050.00.100.0)

X1

Цель	← X1 **
TX_EN	Увімкнення\Вимкнення випромінювання (0..3.3V)
LE	SPI Freq = 1 MHz (0..3.3V)
CLK	Параметри конфігурації наведено в додатку 1
DATA	
TXDATA	
MUXOUT	Sync (0..3.3V)
IFIP 1	Differential input -1V ... +1V, Rin = 6k, VO = GND
IFIN 3	
IFOP 2	Differential input -1V ... +1V, Rin = 6k, VO = GND
IFON 4	
+5V 5	5.0 +- 0.5V Imax = 0.5A
GND 7	

GRP8062VWQS-RC SULLINS

A2*

Приймально-передавальний пристрій

* A1 та A2 зі складу радіолокатора-підривача РП-ГГЦ

** Не вказані контакти з'єднувача X1 можуть бути задані довільно

Изм	Лист	№ докум	Подп	Дата	Пристрій формування та обробки сигналів (Контролер К-РДЦ) Схема електрична підключень	Лист	Масштаб
Разраб							
Проф							
Т.контр						Лист	Листов 1
Нач. Сект							
Н.контр							
Утв							

Копіювати Формат А3