

ПРИЙМАЛЬНО-ПЕРЕДАВАЛЬНИЙ МОДУЛЬ В ТЕРАГЕРЦОВОМУ ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ

Авдеєнко Г.Л., Наритник Т.М., Бичок А.В.* , Буглак А.О.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», Київ, Україна.

*Державне підприємство науково дослідний інститут «Оріон», Київський національний університет
ім. Т. Шевченка, Київ, Україна.

E-mail: django2006@ukr.net,
t.natytnyk@ukr.net,
andrey.bychok@gmail.com,
buhlak.andrii@iit.kpi.ua

Abstract

The problem of creating short-range radar radioelectronic devices in the terahertz frequency range for promising applications in the field of guidance and control is considered. For high-precision guidance and control systems, a new hardware and circuit solution of a terahertz range transceiver module has been developed, which is based on the use of modern integrated circuits of terahertz transceivers in the 119-126 GHz range and a signal generation and processing board (frequency synthesizer board), which are integrated with each other by appropriate interfaces and are compatible with the Sirad Easy debugging kit used by Silicon Radar. Mathematical modeling and simulation modeling of electrical circuits of the terahertz range transceiver module nodes were carried out using the NI Multisim CAD software, and 2D and 3D board models were designed using the Altium Designer CAD software, on the basis of which electronic components were manufactured and mounted on the terahertz transceiver printed circuit board and the terahertz range signal generation and processing printed circuit board. For the first time, a prototype of a terahertz range (119-126 GHz) transceiver module for high-precision guidance and control systems has been developed, in which the main ultrahigh-frequency components (frequency mixer, local oscillator, amplifier, etc.) are implemented using SiGe silicon-germanium technology entirely within one small-sized integrated circuit with an integrated antenna (overall dimensions do not exceed 35 mm in diameter and 10 mm in length), which, at an output power of 3 mW, provides the required (within 100-300 m) range of the module as part of a short-range radar at optimal values of the radio line energy resource with the practical absence of the possibility of detection and unauthorized access to information transmitted in the terahertz frequency range.

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 радіоелектронних 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 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 (СЕПТ), в якому Україна приймає активну участь [1,2] здійснюється підготовка до 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 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 ІЧ 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 6 G (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.

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].

Формулювання мети дослідження й обґрунтування його актуальності.

Велика смуга пропускання, доступна на терагерцових частотах, може розвантажити низькочастотні діапазони та забезпечити надвисоку пропускну здатність програми для майбутніх безпроводових систем, включаючи масивні багатоядерні бездротові мережі на кристалі, бездротові персональні мережі зі швидкістю терабіт в секунду, широкосмугове транзитне з'єднання для доступу до Інтернету у сільській місцевості та високошвидкісні міжсупутникові з'єднання.

Необхідність забезпечення вищої швидкості безпроводової передачі даних для постійно зростаючої кількості пристроїв, підключених до безпроводової мережі, стимулює пошук спектру радіочастотних ресурсів, що не використовуються. У зв'язку із зростанням кількості телекомунікаційних систем, які використовують електромагнітне випромінювання різних частотних діапазонів, виникає потреба у створенні нових безпроводових телекомунікаційних технологій і систем, які дозволили б збільшити обсяг інформації, що передається, і зробити це при екологічно безпечному рівні радіовипромінювання. Таким вимогам можуть задовольняти терагерцеві безпроводові телекомунікаційні технології та створені на їх основі системи широкосмугового радіодоступу з гігабітною смугою пропускання для реалізації надшвидкісних (кілька Гбіт/с і вище) локальних комп'ютерних мереж та безпроводової передачі телевізійних програм високої (HDTV) і надвисокої (UHD) чіткості, які потребують цифрових каналів зі швидкістю передачі до 6 Гбіт/с [4].

Виклад поставленого завдання.

Для безпроводових мереж зв'язку наступного покоління і екосистеми 6G в науковій літературі закордонними та вітчизняними вченими [5-11] розглядається необхідність застосування субтерагерцового та терагерцового діапазонів частот від 100 ГГц до 10 ТГц для забезпечення багатокілометрового та багатогігабітно-секундного субтерагерцового зв'язку [12-17].

Проведено математичне моделювання роботи FMCW-радару для випадку руху як радару так і цілі, за результатами якого визначено головні параметри зонduючого сигналу, при яких забезпечуватиметься необхідна дальність дії приймально-передавального модуля в складі системи наведення і керування. За прототип приймально-передавального модуля терагерцового діапазону було взято налагоджувальний набір SiRad Easy® Evaluation Kit [18-22]. Набір SiRad Easy® Evaluation Kit має модульну концепцію побудови (зовнішня лінзова антена, плата трансивера радару (Radar Frontend), плата для формування ЛЧМ-сигналів та оброблення прийнятих сигналів (Baseband board), плата мікроконтроллера). У лабораторних умовах було проведено тестування працездатності налагоджувального набору при його розташуванні на відстані 2 м від металевого рефлектора розміром 30x40 см² (Рис.1). Для визначення за допомогою набору SiRad Easy відстані до рефлектора було встановлено ширину випромінювання ЛЧМ-сигналу, яка рівна 5 ГГц.



Рис.1. Фотографія лабораторної установки для тестування працездатності налагоджувального набору SiRad Easy.

Структурна схема приймально-передавального модуля терагерцового діапазону, який включає в себе синтезатор частоти показана на рис.2.

Згідно з рис.2 приймально-передавальний модуль складається з трьох основних вузлів: 1) Плата ТГЧ-трансивера на базі IMC TRX_120_001 або TRA_120_002; 2) Плата формування та обробки сигналів; 3) Зовнішня лінзова антена (за необхідності).

Синтезатор частоти входить до складу плати формування та обробки сигналів і призначений для формування сигналу свіпу відповідної тривалості, часової форми та стабілізації частоти ГУН IMC TRX_120_001 або TRA_120_002 на базі кільця фазового автопідстроювання частоти за сигналами, що формуються пристроєм керування.

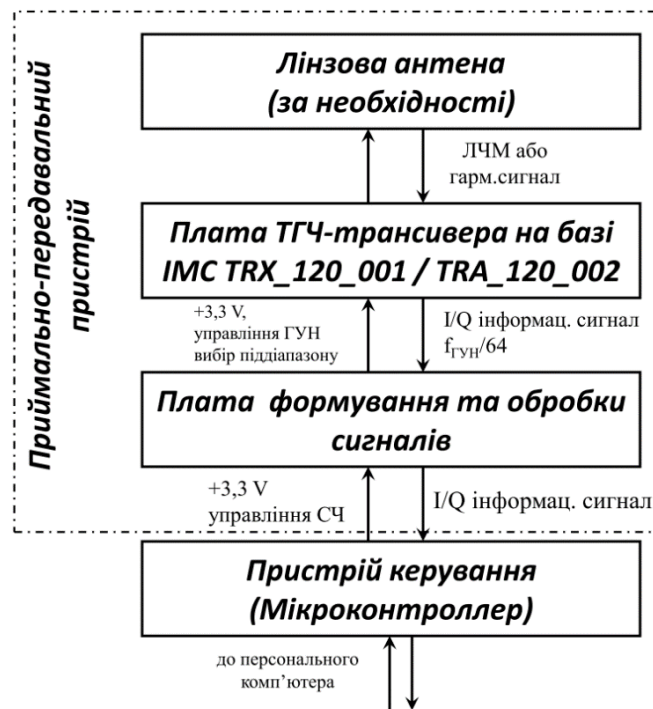


Рис.2. Узагальнена структурна схема приймально-передавального модуля терагерцового діапазона з синтезатором частоти.

Плата ТГЧ-трансивера призначена для:

формування за допомогою ГУН та подвоювача частоти стабільного за несучою частотою ЛЧМ-сигналу з відповідною шириною смуги радіочастот; підсилення ЛЧМ-сигналу та його випромінювання у вигляді ЕМХ в напрямку цілі;

- прийому відбитого від цілі слабкого ЛЧМ сигналу, його підсилення по частоті;
- формування I/Q сигналів, які несуть інформацію про частоту биття й фазу для подальшого визначення дальності до цілі.

У свою чергу, плата формування та обробки сигналів (плата синтезатора частоти та обробки I/Q-сигналів) призначена для:

- формування свіп-сигналу для керування роботою ГУН IMC TRX_120_001 або TRA_120_002;
- підсилення I/Q-сигналів та узгодження їх електричних параметрів з інтерфейсом мікроконтроллера.

За прототип плати ТГЧ-трансивера була взята плата Radar board налагоджувального макету SiRad Easy компанії Silicon Radar. Для розробки електричних принципових схем приймально-передавального модуля була використана система автоматизованого проектування (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 фотшаблонів плат тощо.

На рис.3 представлено 3D-модель плати ТГЧ-трансивера на базі IMC TRA_120_002.

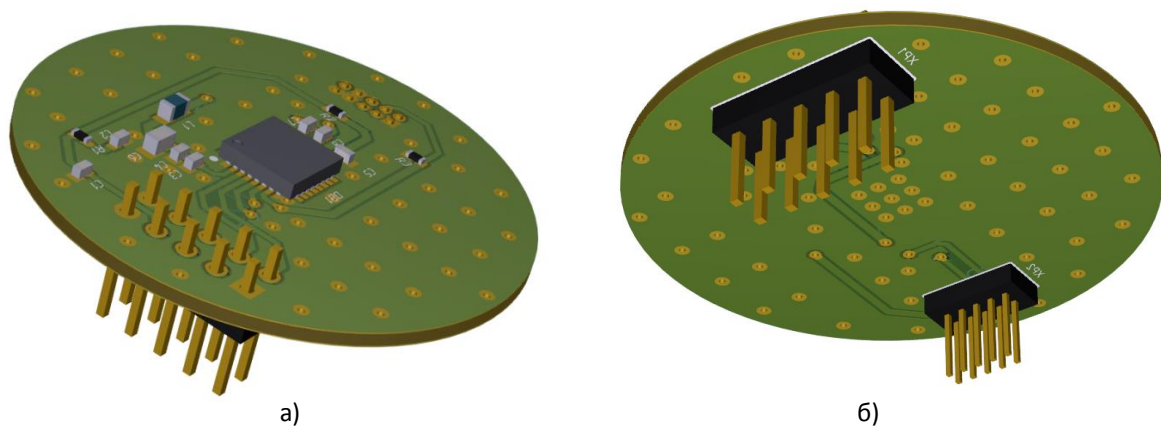


Рис.3. 3D модель плати ТГЧ-трансивера на базі ІМС TRA_120_002: а) вид зверху; б) вид знизу.

Як видно з рис.3, на якому показана фотографія з результатами попереднього випробування плати ТГЧ-трансивера з відображенням профілю розподілу відбивачів в координатах «рівень сигналу - відстань», дальність до цілі, у якості якої в даному випадку виступає стеля лабораторного приміщення, однозначно визначається по положенню максимуму піка відбитого сигналу на екрані персонального комп'ютера.

На рис. 4 наведено фотографія плати ТГЧ-трансивера, що підключений до налагоджувального набору Sirad Easy (а) та результати його попереднього випробування (б).

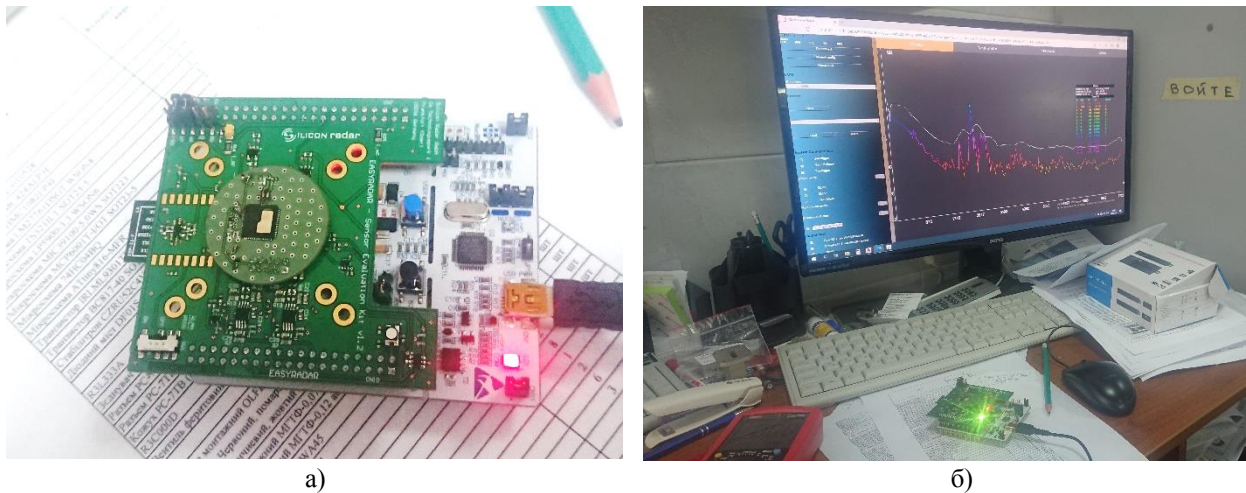


Рис.4. Фотографія плати ТГЧ-трансивера, що підключений до налагоджувального набору Sirad Easy (а) та результати його попереднього випробування (б).

На рис.5 показано підключений до мікроконтролера STM-32 Nucleo приймально-передавальний модуль із використанням зовнішньої лінзової антени (тип №1) а) та результати вимірювання відстані до цілі (стелі лабораторного приміщення) б).

Головним результатом виконаних досліджень є розробка макетного зразка приймально-передавального модуля терагерцового діапазону (119-126 ГГц) для систем наведення і керування різними об'єктами, габаритні розміри якого не перевищують по діаметру 35 мм, по довжині 10 мм з інтегрованою антеною, який при вихідній потужності 3 мВт може забезпечувати дальність дії в межах до 100-300 м. Обґрунтовано та

запропоновано технічні рішення щодо збільшення дальності дії приймально-передавального модуля терагерцового діапазону за рахунок використання зовнішньої лінзової антени.

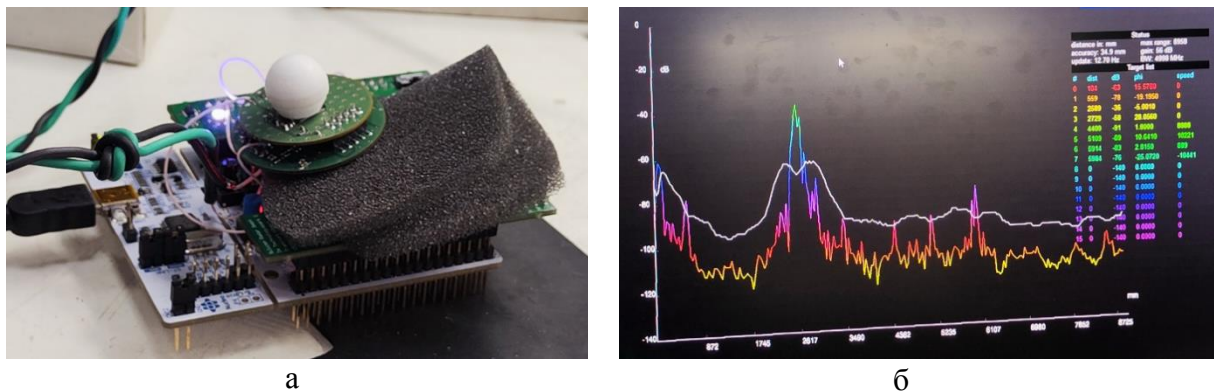


Рис.5 Підключений до мікроконтролера STM-32 Nucleo приймально-передавальний модуль із використанням зовнішньої лінзової антени (тип №1) а) та результати вимірювання відстані до цілі б).

Використані терагерцові технології створюють передумови для подальшого розвитку висококонкурентних технологічних напрямів, використання яких сприяє розв'язанню найважливіших технологічних проблем та реалізації пріоритетних напрямів розвитку техніки різного призначення.

Висновки

Застосування радіосигналів терагерцового діапазону частот підвищує чутливість приймачів і зменшує вплив замирань при багатопроменевому поширенні хвиль та відповідно приймачів і зменшує вплив замирань 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.

Створена для перспективних застосувань у сфері наведення та керування нова продукція на основі запроєктованих функціональних вузлів передавально-приймального тракту каналу радіозв'язку терагерцового діапазону з використанням програмного забезпечення і вперше отримано макетний зразок приймально-передавального модуля терагерцового діапазону (119-126 ГГц) за кремній-германієвою технологією для систем радіолокації ближньої дії при наведенні і керуванні різними об'єктами, габаритні розміри якого не перевищують по діаметру 35 мм, по довжині 10 мм з інтегрованою антеною, який при вихідній потужності 3 мВт може забезпечувати дальність дії в межах до 100-300 м.

Розробки не мають прямих аналогів на даний час, що може забезпечити суттєвий прорив у розвитку галузі телекомунікацій та сприятиме розвитку суміжних галузей, зокрема: радіоастрономії, міжсупутникового зв'язку, медицини, безпеки.

Література

1. Наритник Т. М., Сайко В. Г., Романов Д. О., Комаров В. О., Фомін М. М. Аналіз перспектив використання терагерцового 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. 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.
6. Tran H., Kaddoum G. RF Wireless Power Transfer: Regreening Future Networks // IEEE Potentials. — 2018. — т. 37, № 2. — с. 35—41.
7. Сайко В.Г., Наритник Т.М. Беспроводові системи зв'язку терагерцового діапазону. Німеччина: LAP LAMBERT Academic Publishing RU. – 2019. – 72 с.
8. 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.
9. 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.
10. Сайко, В., & Наритник, Т. (2023). Модель побудови бездротової терагерцової мережі з підвищеною надійністю зв'язку. International Science Journal of Engineering & Agriculture, 2(2), 166.
11. 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 / Korniylo 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>
12. 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.
13. Наритник, Т. М. Телекомунікаційні системи терагерцового діапазону [Текст] : монографія / Т. М. Наритник, С. О. Кравчук. -Житомир : ФОП «Євенок О.О.», 2015. -394 с.
14. 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
15. 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.
16. Наритник Т.М., Сайко В.Г. Беспроводові системи зв'язку терагерцового діапазону Книга.-International Book Market Service Ltd –LAP LAMBERT Academic Publishing .-2019.-68p. T Technical Review, March 2009. - Vol. 7, No.3
17. 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.
18. Документація на TRX_120_001. [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://siliconradar.com/products/single-product/120-ghz-radar-transceiver/>
19. Документація на TRA_120_002. [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: https://siliconradar.com/products/single-product/120-ghz-transceiver-tra_120_002/
20. 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
21. SiRad Easy 300 GHz Front End Board. [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: https://siliconradar.com/wiki/SiRad_Easy_300_GHz_Front_End_Board
- SiRad Easy® r4, SiRad Easy® & SiRad Simple®. User Guide.