

УДК 621.396.43

АНАЛІЗ ТЕРАГЕРЦОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ІННОВАЦІЙНИХ РОЗРОБОК



[Т.М. НАРИТНИК](#)

СП «Інститут електроніки та зв'язку Української академії наук»



[А.В. ЄРМАКОВ](#), [С.О. БОНДАРЧУК](#), [Д.С. ВАЛЬЧУК](#)

Національний технічний університет України
«КПІ імені Ігоря Сікорського»

Abstract – Terahertz frequency band (THz) lies between millimeter and infrared wavelengths bands. According to the ITU recommendations THz band has a range of 300 GHz to 3 THz (range of wavelengths from 1 to 0.1 mm). However, in the scientific interpretation, this range occupies an area of frequency from 100 GHz to 3 THz and has significant advantages in comparison with other bands. First, it is worth highlighting the possibility of telecommunication systems capacity increasing. Secondly, it is a narrow antenna beam pattern, which allows for the placement of a large number of stations without the interference between them. However, there are certain problems in the research of this range, namely: the generation, reception and processing techniques of these signals have some differences from the usual methods when working with traditional frequency ranges such as VHF, UHF. In addition, an essential problem is the lack of theoretical basis compared to microwave systems. Therefore, the development of the terahertz band relies on the ability to generate process and detect the signal by radio electronic devices in this band. This article describes already existed terahertz range telecommunication systems, advantages and opportunities that the terahertz technology brings for telecommunication systems have been shown. The experimental results of Ukrainian scientists in this field have been reviewed. The main developments of the terahertz range electronic devices and their list of products have been analyzed and reviewed.

Анотація – В даній статті розглянуті телекомунікаційні системи терагерцового діапазону, показані переваги та можливості, яких можна досягнути із використанням терагерцової технології. Також розглянуті експериментальні результати українських науковців у даній галузі, основних виробників радіоелектронних пристроїв та список їх продукції, що працює у терагерцовому діапазоні.

Аннотация – В данной статье рассмотрены телекоммуникационные системы терагерцового диапазона, показаны преимущества и возможности, которых можно достичь с использованием терагерцовой технологии. Также рассмотрены экспериментальными результаты украинских ученых в данной области, основных производителей радиоэлектронных устройств и список их продукции, функционирующей в терагерцовом диапазоне.

Вступ

Терагерцовий діапазон частот (ТГЧ-діапазон) лежить в межах від міліметрових довжин хвиль до інфрачервоного діапазону. Згідно з рекомендаціями міжнародного союзу електрозв'язку ТГЧ-діапазон має межі від 300 ГГц до 3 ТГц (діапазон довжин хвиль від 1 до 0,1 мм). Проте в найбільш широкій інтерпретації цей діапазон займає

область частот від 100 ГГц до 3 ТГц. Терагерцовий діапазон має свої значні переваги, що і привертає увагу багатьох науковців. Перш за все, варто виділити можливість значного збільшення пропускної здатності телекомунікаційних систем, які працюють в цьому діапазоні. Також терагерцове випромінювання в ході проведення досліджень показало компенсацію значних недоліків при прийомі інформації як в інфрачервоному, так і мікрохвильовому діапазоні. Перш за все, це вузько спрямованість променя, що дозволяє розміщати велику кількість станцій без взаємної інтерференції між ними [1]. Проте виникають певні проблеми при дослідженні даного діапазону, а саме: техніка генерації, прийому та обробки даних сигналів мають деякі відмінності від звичних методів при роботі з освоєними діапазонами частот. Суттєвою проблемою є відсутність великої теоретичної бази в порівнянні з мікрохвильовим чи інфрачервоним випромінюванням. Тому розвиток і освоєння ТГЧ-діапазону спирається на можливості радіоелектронних пристроїв для генерації, обробки та детектування сигналу.

I. Аналіз застосування терагерцових технологій для створення інноваційних розробок

Терагерцовий діапазон частот завдяки своїм особливостям, може використовуватись в різних областях: фізики, хімії, біології, медицини, безпеки.

Сфери використання терагерцових хвиль:

1) телекомунікаційні системи

- в транспортних мережах мобільного зв'язку наступних поколінь;
- в телерадіомовленні;
- в міжсупутниковому зв'язку;
- в радарях та в радіолокації ближньої дії;
- в радіорелейних системах прямої видимості;
- в комунікаціях однієї будівлі, зокрема, в безпроводовій версії USB 3.0.

2) системи виявлення та розпізнавання об'єктів

3) системи контролю якості харчових продуктів

4) системи діагностики в медицині

5) системи для сканування об'єктів

6) системи як інструмент для наукових досліджень (радіоастрономічні спостереження з супутників холодних космічних об'єктів, високоточний хімічний аналіз атмосфери, вивчення надпровідності, створення нових напівпровідникових матеріалів, біомолекулярні дослідження).

Як відомо, вчені приступили до розробки 5G. Про плюси впровадження мереж п'ятого покоління ще рано говорити, але можна виділити такі вимоги та цілі при впровадженні даних мереж зв'язку:

- стабільний зв'язок, з великою зоною покриття;
- підтримка попередніх поколінь;
- зменшення енергоспоживання;

- пропускна здатність мережі понад 10 Гбіт/сек;
- підтримка одночасного підключення до 100 млн. пристроїв/км²;
- затримка передачі даних на радіоінтерфейсі не більше 1 мс.

Одним із ймовірних рішень для дотримання сформульованих вище вимог, насамперед збільшення пропускної здатності, може бути застосування терагерцового діапазону. Дане рішення дозволить також вирішити проблему дефіциту частотного спектру.

Іншим прикладом доцільного використання терагерцової технології може бути її використання у стратосферних системах зв'язку. Дана концепція використання стратосферних систем зв'язку останнім часом привертає все більше й більше уваги. Принцип роботи стратосферних систем зв'язку полягає в тому, щоб розмістити приймально-передавальне обладнання (по суті – базові станції) на безпілотних стратосферних платформах. В якості таких платформ можуть використовуватися повітряні кулі, дрони, дирижаблі і та ін., які повинні летіти на висоті 18-25 км, що не заважає цивільній авіації (рис. 1) [2]. На таких висотах швидкість вітру є досить низькою, а густина повітря є в рази нижчою, ніж в приземному шарі. Використання стратосферних систем зв'язку дає свої значні переваги, основною з яких є підвищений кут огляду, що забезпечується стратосферною платформою порівняно із наземним відповідником.

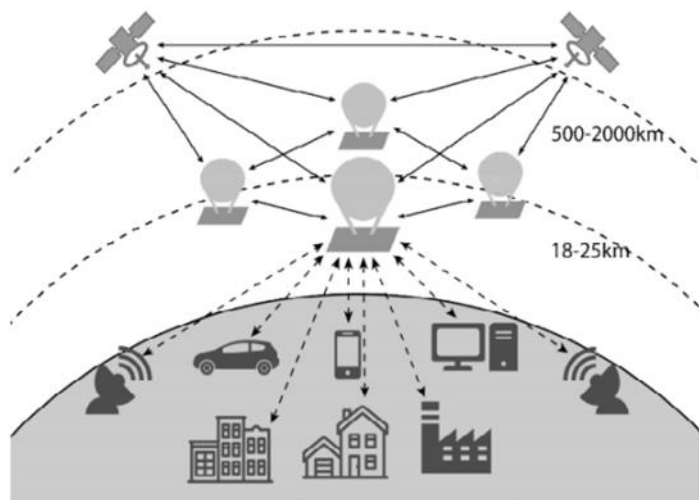


Рис. 1. Схема стратосферної телекомунікаційної системи

Для забезпечення зв'язку із стратосферною станцією доцільно використовувати системи терагерцового діапазону, оскільки це дає ряд значних переваг, а саме [3]:

- слабка завантаженість даного діапазону;
- можливість виділення широких смуг частот (до 5 ГГц і більше);
- спрощена процедура виділення частот у багатьох країнах світу;
- істотне зниження габаритів антенних систем, які забезпечують при цьому формування вузької діаграми спрямованості.

Широке впровадження стратосферних телекомунікаційних систем зв'язку дає дуже великі можливості у застосуванні: для забезпечення зв'язку в мережах загального користування, для оперативного зв'язку у військових цілях, для забезпечення зв'язку у зонах, що постраждали від стихійного лиха.

Для ефективної роботи систем зв'язку необхідні прилади орієнтовані на роботу в терагерцовому діапазоні. В Україні застосування терагерцової технології в телекомунікаційних системах привертає з кожним роком більше й більше уваги. Уже зараз проводяться дослідження та створення реальних прототипів робочих телекомунікаційних систем терагерцового діапазону. Особливий пріоритет має питання використання терагерцового діапазону у системах передачі даних та доступу до інформаційних ресурсів, зокрема, доступу до Інтернету в мобільних мережах зв'язку. Державним університетом телекомунікацій та Інститутом електроніки та зв'язку Української академії наук проводяться найбільш активні дослідження зі створення різноманітних пристроїв та повноцінних систем орієнтованих на роботу в терагерцовому діапазоні. В Інституті електроніки та зв'язку розробляються концепції створення радіорелейних та Wi-Fi систем терагерцового діапазону. Наприклад, уже спроектований передавальний та приймальний тракт радіорелейних систем терагерцового діапазону. Також проведено дослідження лабораторного зразка цифрової симплексної радіорелейної системи терагерцового діапазону і цифрового модему з пропускною каналною здатністю до 1200 Мбіт/с на дальність зв'язку в нормальних умовах в межах 1 км при ймовірних бітових помилки BER не більше 10^{-6} [4]. Українськими науковими дослідниками представлено аналітичний огляд теоретичних і експериментальних досліджень і розробок телекомунікаційних систем в суб- і терагерцовому діапазоні з використанням елементів, пристроїв, ідей та технологій оптики (фотоніки) і мікрохвильових технологій (електроніки). Також розглянуто перспективні дослідження в напрямку розвитку транспортних розподільних систем і створення безпроводових ліній зв'язку з шумовим носієм в субтерагерцовому діапазоні частот [5-7]. Реалізовано концепцію створення програмно-визначених радіосистем на основі технології Wi-Fi, продемонстрована на створеній гігабітній системі передачі в терагерцовому діапазоні 130-134 ГГц, яку протестовано в лабораторних умовах з досягненням швидкості до 1,2 Гбіт/с [8]. Це лише перші кроки у напрямку розвитку телекомунікаційних систем ТГЧ-діапазону, проте згодом саме ця основа дозволить розробити та впровадити пристрої та системи для широкого застосування.

II. Аналіз розробок радіоелектронних пристроїв телекомунікаційних систем терагерцового діапазону

Розглянемо структурну схему радіотракту радіорелейної лінії зв'язку, що працює у терагерцовому діапазоні (рис. 2). До складу даної лінії входять: генератор імпульсного надширокополосного радіосигналу (IR-UWB), передавач терагерцового діапазону, радіоканал, приймач терагерцового діапазону та приймач IR-UWB сигналу. Одним із

базових елементів і передавача, і приймача терагерцового діапазону є підсилювач потужності.

Розглянемо приклади наявних підсилювачів потужності, що працюють в терагерцовому діапазоні (рис.3). Підсилювачі потужності MGA2101 від організації Northrop Grumman та високопродуктивний підсилювач 955 серії від Millimeter WaveProducts забезпечують підсилення близько 20 дБ в діапазоні 300-340 ГГц та 15 дБ в діапазоні 90-140 ГГц відповідно [9, 10].

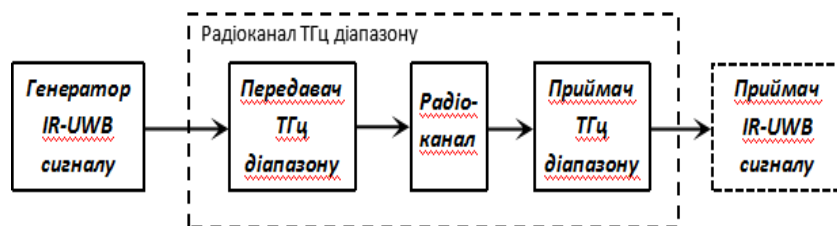


Рис. 2. Структурна схема радіотракту радіорелейної лінії зв'язку терагерцового діапазону

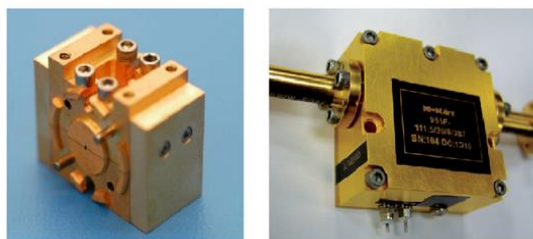


Рис. 3. Фото підсилювачів потужності терагерцового діапазону

Розглянемо приклади малощумних підсилювачів (рис. 4). Малощумний підсилювач від Northrop Grumman MLA1101 забезпечую підсилення 16 дБ в діапазоні 130-140 ГГц [9]. Організацією Millitech виготовлено цілу серію малощумних підсилювачів, які орієнтовані на роботу в діапазонах від 19 до 130 ГГц [11].

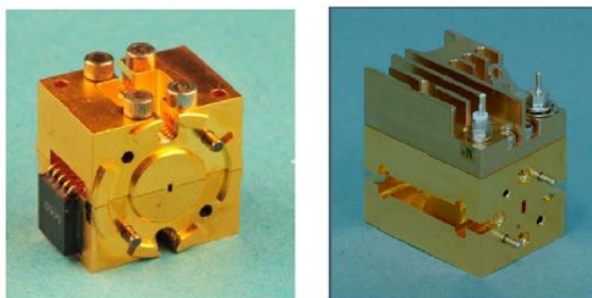


Рис. 4. Фото малощумних підсилювачів ТГц діапазону

Розглянемо приклади антен, балансних змішувачів, фільтрів та генераторів, які пристосовані до роботи в телекомунікаційних системах терагерцового діапазону та виготовлені Millitech [11].

У продаж уже поступила ціла серія оптичних лінзових антен із діаметром від 7 до 15 сантиметрів, кутром випромінювання до 10 градусів та коефіцієнтом підсилення до 50 дБ. Також існує серія балансних змішувачів, орієнтовані на роботу в діапазонах 75-110 ГГц та 90-140 ГГц. Дані змішувачі можуть працювати із відносно низькопотужними гетеродинами, в загальному 13-15 дБм за рахунок використання GaAs діодів із бар'єром Шоттки. Генератори, виготовлені даною організацією, дозволяють добитись потужності близько 15 дБм в діапазоні до 100 ГГц. Millitech та виготовляють високоселективні фільтри нижніх частот, полосопропускні та фільтри високих частот, орієнтовані на терагерцовий діапазон частот. Для прикладу розглянемо полосопропускний фільтр FIB-05 із смугою пропускання 140-220 ГГц та затуханням близько 50 дБ на верхній та нижній межах загородження частот.

Отже, уже зараз ведеться інтенсивна робота зі створення різноманітних радіоелектронних пристроїв телекомунікаційних систем терагерцового діапазону і, можливо, зовсім скоро терагерцова технологія стане основою для більшості транспортних розподільчих телекомунікаційних мереж.

Висновки

Телекомунікаційні системи терагерцового діапазону мають величезний потенціал. З кожним роком теоретична та практична база з цього питання все збільшується і збільшується, а це в свою чергу відкриває нові можливості у генерації, обробці та прийомі сигналів в ТГЧ-діапазоні. Переваги застосування терагерцового діапазону перевершують недоліки і відкривають великі можливості у застосуванні в області телекомунікацій. Одним із перспективних варіантів впровадження терагерцових технологій є можливе використання їх на стратосферних платформах. Можливо саме дана система зв'язку стане основою при проектуванні та впровадженні мобільних систем зв'язку п'ятого покоління (5G).

В подальшому для ефективного освоєння терагерцових частот необхідна обґрунтована база. Проте на даний момент ця суттєва проблема залишається невирішеною. Крім цього процес створення систем терагерцового діапазону, залишається досить затратним за рахунок складності розробки та особливостей їх функціонування.

Список літератури:

1. Ильченко М.Е., Нарытник Т.Н., Шелковников Б.Н., Христенко В.И. Радиотелекоммуникационные системы терагерцового диапазона // Электроника и связь. – 2011. – №3. – С.205-210.
2. Дружинін В.А., Кременецька Я.А., Жукова О.Р. Можливості розширення зони обслуговування та радіочастотного ресурсу в стратосферних системах зв'язку // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2016. – №2. – С. 23-26.

3. Наритник Т. М., Казіміренко В.Я., Коритова О.А., Набока Б.Ю., Сайко В.Г. Дослідження використання терагерцового діапазону для створення мережі безпроводового ширококутового доступу // Матеріали п'ятнадцятої Міжнародної науково-технічної конференції "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах" (ВООТТП-2015), 10-14 вересня 2015р. – Одеса: ОНАЗ. – С. 16-18.
4. Ильченко М.Е., Нарытник Т.Н., Радзиховский В.Н., Кузьмин С.Е., Лутчак А.В. Проектирование передающего и приемного радиотрактов радиорелейных систем терагерцового диапазона // Электросвязь. – 2016. – №2. – С. 42-49.
5. Ильченко М.Ю., Кравчук С.О., Наритник Т.М. Беспроводові системи зв'язку субтерагерцового та терагерцового діапазонів // Цифрові технології. – 2014. – Вип. 16. – С.40-59.
6. Исаев В.М., Кабанов И.Н., Комаров В.В., Мецанов В.П. Современные радиоэлектронные системы терагерцового диапазона // Доклады ТУСУРа. – 2014. – №4 (34). – С. 5-21.
7. Майборода І.М., Стороженко І.П., Бабенко В.П., Кайдаш М.В. Огляд досягнень в терагерцових комунікаційних системах // Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. – 2016. – № 1 (27). – С. 45-48.
8. Narytnyk T.M., Lutchak O.V., Osypchuk S.O., Uryvskyi L.O. Criteria and Algorithms for Shaping of the Signal-Code Sequences on the Basis of Wi-Fi Technology at Deployment of the Terahertz Band Telecommunication System // Telecommunications and Radio Engineering. – 2015. – № 74 (20). – P. 1823-1839.
9. Northrop Grumman Microelectronics Products & Services [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://www.northropgrumman.com/BusinessVentures/Microelectronics/Pages/default.aspx>
10. Millimeter Wave Products Amplifiers [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://www.miww.com/millimeter-wave-products/amplifiers/>.
11. Series LNA by Millitech [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://www.millitech.com>.