

УДК 621.396; 654.026

І. М. Майборода, І. П. Стороженко, В. П. Бабенко, М. В. Кайдаш

## ОГЛЯД ДОСЯГНЕНЬ В ТЕРАГЕРЦОВИХ КОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

*Представлено огляд досягнень та проблем в області терагерцових комунікацій, орієнтованих на швидкість передавання даних близько 100 Гбіт/с. Показано, що проблема збільшення швидкості бездротового передавання даних є пріоритетною для багатьох дослідницьких центрів. Доведено, що частота близько 300 ГГц є найбільш підходящою для збільшення швидкості передавання даних. Подано короткий огляд напівпровідникових приладів з граничною частотою, що знаходиться в терагерцовому діапазоні.*

*К л ю ч о в і с л о в а: терагерцовий зв'язок, характеристика каналу, терагерцова електроніка, швидкість передавання даних, гігабітний бездротовий канал.*

**Постановка проблеми.** Сучасні тенденції розвитку системи управління військовими місіями та протидії тероризму передбачають обмін великими обсягами даних. При цьому більша частина даних повинна долати значні відстані між командними центрами по мережах зв'язку високої ємності. Послуги оптоволоконних мереж забезпечують мультигігабітний обсяг обміну даних в багатьох частинах світу. Але сучасні експедиційні сили потребують аналогічної можливості у тих місцях, де оптоволоконного доступу не існує. Супутниковий зв'язок може забезпечити комунікації у віддалених районах, але не може повністю забезпечити потужність, необхідну для підтримання обсягу даних.

**Метою статті** є короткий огляд результатів, досягнутих до цього часу в теоретичних та експериментальних дослідженнях бездротового зв'язку терагерцового (ТГц) діапазону.

**Виклад основного матеріалу.** Прогнози сучасних тенденцій підвищення швидкості бездротового передавання даних показують, що до 2020 року швидкість повинна бути не менше десятків гігабіт за секунду [1]. Ця проблема ставить питання про доступність частотного діапазону, спроможного відповідати таким вимогам. Основною можливістю є збільшення доступної смуги пропускання до декількох десятків гігагерців [2]. Зробити це на частотах нижче 100 ГГц та вище 500 ГГц повною мірою не уявляється можливим.

У статті [3] була теоретично досліджена ємність каналу зв'язку з безпілотним літальним апаратом, що знаходився на висоті 5 км, на різних частотах. У розрахунках враховувалися фоновий шум і атмосферні затухання, спричинені дощем. Ємність каналу визначалася з використанням теореми Шенона–Хартлі. Було встановлено, що на частотах вище 500 ГГц ємність каналу різко зменшується, і для передавання сигналів по каналах ємністю понад 10 Гбіт/с на відстані до декількох кілометрів найбільш підходить частотний діапазон 100...300 ГГц. Серйозною проблемою передавання інформації в інфрачервоному діапазоні є спотворення фазового фронту хвилі внаслідок локальних варіацій коефіцієнта заломлення поблизу променя. Детектування такого сигналу створює труднощі. Теоретичні прогнози та експериментальні спостереження [3] показують, що в ТГц діапазоні ці проблеми не виникають. У мікрохвильовому діапазоні проблема, з одного боку, пов'язана з недостатністю ширини каналу для високої швидкості передавання даних, з іншого боку, з розсіянням електромагнітних хвиль при віддаленні від випромінювача внаслідок дифракції. У праці [4] були проведені оціночні розрахунки для двох комунікаційних систем з робочими частотами 60 і 400 ГГц. Незважаючи на те, що більш високочастотні джерела поступалися за потужністю мікрохвильовим, при передаванні сигналу на відстань до 2 км цей недолік був компенсований більш високою спрямованістю.

Отже, спектр сигналів на межі 300 ГГц, який ще не виділений будь-якій службі радіозв'язку, є найкращим для того, щоб забезпечити достатню кількість спектрів. У останні роки декілька дослідницьких груп у всьому світі почали досліджувати системи бездротового зв'язку на частоті понад 300 ГГц та вище. Прикладом є програми Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) зі створення технологій і приладів ТГц зв'язку. Так, за програмою 100G DARPA очікується реалізація потужності 100 Гбіт/с на дальності 200 км повітря–повітря і на 100 км повітря–земля.

Аналізу проблем реалізації ТГц систем передавання інформації присвячено багато публікацій [3–9]. У працях [10–14] наведені експериментальні результати досліджень пропускну здатності та інші комунікаційні характеристики таких систем, отримані на частотах від 100 до 300 ГГц. Більшість з них мають пропускну здатність 10...20 Гбіт/с. Проте у статті [8] дано обґрунтування можливості збільшення даного параметра до 100 Гбіт/с.

Перша відеопередача за допомогою аналогового телевізійного сигналу на частоті 300 ГГц була продемонстрована у 2008 р. [13]. Передавач і приймач сконструйовано на діоді Шотткі, що працював на другій гармоніці. В цьому експерименті при застосуванні антен з підсиленням 40 дБ на обох кінцях лінії зв'язку дальність зв'язку складала 10 м. Підсилення антени було досягнуто шляхом використання комбінації рупорної антени (26 дБ) з поліетиленою лінзою (14 дБ). Такий самий принцип був застосований для демонстрації бездротового передавання сигналу стандарту DVB-S2 на частоті 300 ГГц на відстань 52 м зі швидкістю передавання даних 96 Мбіт/с [15]. Під час досліджень [7, 16] успішно продемонстровано безпомилкове передавання даних зі швидкістю 12,5 Гбіт/с на частоті 300 ГГц на відстань 0,5 м. У цьому випадку використано передавач, сконструйований на Uni-Travelling-Carrier фотодіоді, і приймач на діоді Шотткі. У 2011 році реалізовано 2,5 Гбіт/с безпомилкове передавання даних на частоті 625 ГГц на малій відстані [17]. У передавачі використовувався ланцюг помножувачів частоти. Приймач був виконаний на діоді Шотткі. Перше інтегроване рішення стосовно використання приймально-передавальних периферійних пристроїв багатофункціональних інтегральних НВЧ схем представлено у статті [12]. За допомогою цієї системи продемонстровано канал зв'язку бездротового передавання даних на несучій частоті 220 ГГц зі швидкістю до 25 Гбіт/с.

Таким чином, основні переваги і сценарії розвитку застосування ТГц діапазону частот для зв'язку є зрозумілими. Переведення апаратури на новий діапазон частот дозволяє різко підвищити пропускну здатність систем зв'язку державного, військового і спеціального призначення. Але для цього необхідно мати ефективні засоби генерації, реєстрації, оброблення і випромінювання сигналів у ТГц діапазоні частот. І тут особливе місце належить програмам DARPA – SWIFT (Sub-millimeter Wave Imaging Focal Plane Technology), TFAST (Technology for Frequency Agile Digitally Synthesized Transmitters), Terahertz Electronics зі створення високошвидкісних малошумливих транзисторів (НВТ, НЕМТ, ДНВТ) на основі GaAs і InP гетероструктур, а також програмі NEXТ зі створення транзисторів на основі напівпровідникових нітридів. Чіткого правила визначення максимальної частоти генерації транзистора, необхідної для забезпечення частоти розробленої на його основі схеми, не існує. Тому практично її значення вибирають у півтора-два рази вище робочої частоти схеми. Програма Terahertz Electronics передбачає розроблення і демонстрацію матеріалів та технології виробництва транзисторів і мікросхем до частот 1,03 ТГц [18]. При цьому вихід придатних до використання приладів повинен бути 50–60 %.

Викликає зацікавлення НЕМТ зі значенням максимальної робочої частоти 279 ГГц [19]. Особливістю розробки є виготовлення транзистора за допомогою процесу хімічного осадження з парової фази (MOCVD), придатного для масового виробництва. Зараз mHEMT (метаморфний транзистор з високою рухомістю електронів) ТГц діапазону, головним чином, виготовляють за допомогою молекулярно-пучкової епітаксії, мало придатної для великомасштабного виробництва.

В Європі з метою розроблення перспективних кремнієвих біполярних транзисторів з робочою частотою 0,5 ТГц і вище був утворений консорціум промислових фірм і наукових організацій. Декілька проектів [20] розраховано на встановлення лідерства європейських виробників в області SiGe НВТ-технології і створення транзисторів для систем міліметрового діапазону. На конференції IEDM у 2010 році компанія INP повідомила про створення SiGe НВТ з граничною частотою генерації 500 ГГц, на основі якого був виконаний кільцевий генератор з рекордним часом затримки сигналу – всього лише 2 пс. Останнє досягнення програми Dotfive – чіпсет (передавач і приймач) для систем відтворення зображення з частотою 0,82 ТГц.

Зусилля розробників терагерцової напівпровідникової технології сьогодні спрямовані не на розроблення одиничних приладів з рекордними параметрами, а на створення пристроїв, придатних для масового виробництва. Результати їх роботи вже знаходять застосування. Найближчим часом будуть реалізовані не тільки пристрої для терагерцового зв'язку, а й створені умови для вдосконалення систем ще нижчих частот. Розробки напівпровідникових технологій демонструють потенціал для досягнення швидкості передавання даних декількох десятків Гбіт/с. Проте однією із проблем терагерцового радіозв'язку залишається удосконалення інтелектуальних антен для подолання значних втрат потужності сигналу на трасі в поєднанні з динамічними подіями затінення [9].

## **Висновки**

1. Найбільш перспективним діапазоном частот для бездротового зв'язку з погляду на збільшення ємності каналу зв'язку є діапазон від 100 до 300 ГГц.

2. Сучасні розробки напівпровідникових технологій дозволили створити всі елементи бездротового зв'язку до частот понад 1 ТГц.

3. Переведення апаратури на новий діапазон частот дозволяє різко підвищити пропускну здатність систем зв'язку державного, військового і спеціального призначення. І хоча сьогодні терагерцова технологія використовується, в основному, в перспективному військово-космічному обладнанні, в майбутньому вона може бути доступною для будь-якої області застосування.

4. США та ЄС мають потужні програми, спрямовані на створення технологій виготовлення серійних напівпровідникових приладів для електроніки і зв'язку ТГц діапазону. Для військового та спеціального зв'язку поставлена задача в найближчі роки досягти потужності 100 Гбіт/с на дальності 200 км повітря–повітря і в 100 км повітря–земля.

5. У сучасних експериментах досягнута потужність декілька десятків Гбіт/с у лабораторних умовах на частоті понад 300 ГГц.

#### **Список використаних джерел**

1. Кравчук, С. О. Телекомунікаційні системи терагерцового діапазону [Текст] : монографія / С. О. Кравчук, Т. М. Наритник. – Житомир : ФОП “Євенок О. О.”, 2014. – 394 с.

2. Narytnik, T. N. Possibilities of Using THz-Band Radio Communication Channels for Super High-Rate Backhaul / T. N. Narytnik // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2014. – V. 73, № 15. – P. 1361–1371.

3. Federici, J. Review of terahertz and subterahertz wireless communications / J. Federici, L. Moeller // *Journal of Applied Physics*. – 2010. – V. 107, № 11. – Article ID 111101. – P. 22.

4. Mann, C. M. Towards terahertz communication systems / C. M. Mann // *Terahertz sources and systems*. Ed. by R. Miles et al. – Amsterdam : Kluwer Academic, 2001. – P. 261–267.

5. Song, H.-J. Present and future of terahertz communications / H.-J. Song, T. Nagatsuma // *IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology*. – 2011. – V. 1, № 1. – P. 256–263.

6. Armstrong, C. M. The truth about terahertz / C. M. Armstrong // *IEEE Spectrum*. – 2012. – № 9. – P. 36–41.

7. Kleine-Ostermann, T. A review on terahertz communication research / T. Kleine-Ostermann, T. Nagatsuma // *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*. – 2011. – V. 32, № 2. – P. 143–171.

8. Terahertz wireless communications based on photonics technologies / T. Nagatsuma, S. Horiguchi, Y. Minamikata et al. // *Optics Express*. – 2013. – V. 21, № 21. – P. 23736–23747.

9. Thomas Kürner. Towards Future THz Communications Systems // *Terahertz Science and Technology*. – 2012. – V. 5, № 1. – P. 11–16.

10. 10-Gbit/s bi-directional and 20-Gbit/s uni-directional data transmission over a 120-GHz-band wireless link using a finline ortho-mode transducer / J. Takeuchi, A. Hirata, H. Takahashi, N. Kukutsu // *Proceedings of the Asia-Pacific Microwave Conference*. – Yokohama, Japan, 2010. – P. 195 – 198.

11. Optically power supplied Gbit/s wireless hotspot using 1.55  $\mu\text{m}$  THz photomixer and heterodyne detection at 200 GHz / G. Ducournau, P. Szriftgiser, D. Bacquet et al. // *Electronics Letters*. – 2010. – V. 46, № 19. – P. 1349–1351.

12. All active MMIC-based wireless communication at 220 GHz / I. Kallfass, J. Antes, T. Schneider et al. // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011. – V. 1, № 2. – P. 477–487.

13. 300 GHz transmission system / C. Jastrow, K. Münter, R. Piesiewicz et al. // *Electronics Letters*. – 2008. – V. 44, № 3. – P. 213–214.

14. A survey of terahertz applications in cultural heritage conservation science / J. B. Jackson, J. Bowen, G. Walker et al. // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011. – V. 1, № 1. – P. 220–231.

15. Wireless Digital Data Transmission at 300 GHz / C. Jastrow, S. Priebe, B. Spitschan et al. // *IET Electronics Letters*. – 2010. – V. 46, № 9. – P. 661–663.

16. Giga-Bit Wireless Link Using 300-400 GHz Bands / T. Nagatsuma, H. Song, Y. Fujimoto et al. // *Proc. International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)*. 5 electronic. Valencia. – 2009.

17. Moeller, L. THz Wireless Communications: 2,5 Gb/s Error-Free Transmission at 625 GHz Using a Narrow-Bandwidth 1 mW THz Source / L. Moeller, J. Federici, K. Su // *30th URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS)*. 4 electronic. – Istanbul. – 2011.

18. Майская, В. Освоение терагерцовой щели. Полупроводниковые приборы вторгаются в субмиллиметровый диапазон [Текст] / В. Майская // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. – 2011. – № 8. – С. 74–87.

19. Fabrication of 150-nm T-Gate Metamorphic AlInAs/GaInAs HEMTs on GaAs Substrates by MOCVD / Haiou Li, Zhihong Feng et al. // IEEE Electron Device Letters. – 2011. – V. 32, № 9. – P. 1224–1226.

20. Cluster for Application and Technology Research in Europe on NanoElectronics [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [http://www.catrene.org/web/projects/local\\_index.php](http://www.catrene.org/web/projects/local_index.php). – Назва з екрана.

*Стаття надійшла до редакції 01.06.2016 р.*

**УДК 621.396; 654.026**

**І. Н. Майборода, І. П. Стороженко, В. П. Бабенко, М. В. Кайдаш**

### **ОБЗОР ДОСТИЖЕНИЙ В ТЕРАГЕРЦОВЫХ КОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

*Представлен обзор достижений и проблем в области терагерцовых коммуникаций, ориентированных на скорость передачи данных около 100 Гбит/с. Показано, что проблема увеличения скорости беспроводной передачи данных приоритетна для многих исследовательских центров. Доказано, что частота около 300 ГГц является наиболее подходящей для увеличения скорости передачи данных. Дан краткий обзор полупроводниковых приборов с граничной частотой, находящейся в терагерцовом диапазоне.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а: терагерцовая связь, характеристики канала, терагерцовая электроника, скорость передачи данных, гигабитный беспроводной канал.*

**UDC 621.396; 654.026**

**I. M. Mayboroda, I. P. Storozhenko, V. P. Babenko, M. V. Kaydash**

### **REVIEW OF THE ACHIEVEMENTS IN THE TERAHERTZ COMMUNICATION SYSTEMS**

*This review paper gives an overview progress and problems of communications at a data rate of about 100 Gbit/s. The problem of increasing wireless data rate is priority for many research centers. It is proved that the frequency of about 300 GHz is most suitable to increase the data rate. In the last part of the paper, an overview of the state-of-the-art in technology development and successful demonstrations of data transmission and semiconductor devices with TGz-range cutoff frequency will be given.*

*К е у w o r d s: THz communications, channel characterization, THz electronics, transmission data rate, multi-gigabit wireless data rates.*

**Майборода Ігор Миколайович** – кандидат військових наук, доцент, завідувач кафедри управління діями підрозділів із засобами військового зв'язку Національної академії Національної гвардії України.

**Стороженко Ігорь Петрович** – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри фізики Національного фармацевтичного університету, провідний науковий співробітник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

**Бабенко Валерій Павлович** – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри управління діями підрозділів із засобами військового зв'язку Національної академії Національної гвардії України.

**Кайдаш Марина Валеріївна** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри фізики Національного фармацевтичного університету