

## ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 621.396.43

### ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РАДИОСИСТЕМ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

Д.В. Лучин

Филиал ФГУП НИИР — СОНИИР, г. Самара

**Ключевые слова:** телекоммуникационные системы, субтерагерцовый диапазон.

Развитие техники и технологий, связанных с использованием электромагнитных волн, так или иначе, сталкивается с проблемой потерь этих волн в атмосфере Земли, в волноведущих трактах, антеннах, средах и материалах. Поглощение электромагнитных волн в коротковолновой части миллиметрового и длинноволновой части субмиллиметрового диапазонов, объединяемых в последнее время в субтерагерцовый диапазон частот, в последние два десятилетия стало одной из актуальных задач радиофизики. Исследования поглощающих свойств атмосферы необходимы для нужд радиоастрономии, телекоммуникаций, моделирования теплового баланса планеты и других практических приложений. Радиоволновая аппаратура и связанные с ней технологии развиваются по пути постепенного увеличения частот, и продвижение в направлении терагерцового диапазона является одним из ключевых приоритетов развития мировой и российской науки, зафиксированным Распоряжением Правительства РФ от 31 декабря 2020 г. № 3684-р 1. Это направление продиктовано разными факторами, среди которых необходимость развития высокопроизводительных коммуникаций, радиоастрономии этого диапазона, систем безопасности и прочих приложений. Среди этих факторов есть и фундаментальные физические задачи: к примеру, потребности микроволновой спектроскопии, обнаружившей в терагерцовом и субтерагерцовом диапазонах большое количество спектральных линий различных молекул. Исследования спектральных характеристик атмосферных газов лежат в основе различных моделей поглощения, необходимых для расчёта теплового баланса Земли, а создание и модернизация аппаратуры для этих исследований является актуальным предметом научно-технических исследований.

В субтерагерцовом диапазоне частот наблюдаются весьма интересные астрофизические явления, поэтому, в свете развития наземной радиоастрономии этого диапазона, весьма актуальна задача исследования

условий распространения волн в атмосфере в полевых условиях с целью разведки новых мест для постройки наземных телескопов. Особенно актуальна задача создания и модернизации аппаратуры для экспедиционных исследований прозрачности атмосферы в субтерагерцовом диапазоне частот.

В настоящее время радиоизлучение во многом используется для передачи информации на расстоянии, и направление к увеличению рабочих частот продиктовано потребностями в увеличении скорости передачи информации, которая, в свою очередь определяется теоремой Шеннона [1]. Согласно ей, пропускная способность радиоканала ограничивается шириной полосы, а, следовательно, и несущей частотой, а также шумами в канале передачи данных. Тем временем потребность в расширении передающих возможностей радиоканалов нарастает. Передача данных в диапазоне является одним из перспективных направлений по возможному расширению пропускной способности радиоканала. Диссипация волн в атмосфере относится к шумам радиоканала и снижает его пропускную способность.

Применительно к созданию высокоскоростных радиосистем благодаря стандартизации сетей 5G коммерческая связь в субтерагерцовом диапазоне или на миллиметровых волнах (ММВ) стала реальностью, несмотря на все опасения по поводу неблагоприятных характеристик распространения волн этих частот. Хотя системы 5G все еще пребывают на стадии развития, утверждается, что их скорости порядка гигабит в секунду все еще не могут обеспечить потребности многих новых приложений, таких, например, как 3D-игры и расширенная реальность. Для них требуется скорость передачи от нескольких сотен гигабит в секунду до нескольких терабит в секунду. При этом передача должна осуществляться с низкой задержкой и обладать высокой надежностью, что и ожидается от следующего поколения 6G систем связи. Учитывая потенциал терагерцовой системы связи (ТГц) в обеспечении таких скоростей передачи данных на малые расстояния, они широко рассматриваются в качестве следующего рубежа для исследования беспроводной связи.

Таким образом, становится возможным внедрение совершенно новой технологии сотовой связи за счет использования более высокочастотного спектра, который содержит гораздо большую выделенную полосу пропускания сигнала.

Продолжающееся распространение малых базовых станций (т.е. микро-и пикосот), осуществляемое операторами сотовой связи, становится чрезвычайно полезным для уменьшения относительно высоких потерь в свободном пространстве, вызванных атмосферными условиями и проникновением на КВЧ. Технология использования узкого основного лепестка диаграммы направленности ДН, также называемого в литературе лучом [2], формируемого фазированной антенной решеткой (ФАР), состоящей из нескольких антенных элементов, расположенных на

оптимальном расстоянии друг от друга, в последние годы широко используется для обхода препятствий и «мертвых зон» (пропусков в зоне обслуживания) для передачи данных в миллиметровом диапазоне волн в наружных приложениях и потоковой передачи мультимедиа в помещениях (IEEE 802.11.ad).

Многочисленные измерения трасс распространения ММВ, описанные в работах [1,3,4] демонстрируют их эффективность и в условиях наличия на трассах препятствий, также известных как условия отсутствия прямой видимости. Результаты моделирования и измерений, представленные в [2], в совокупности подтверждают целесообразность рассмотрения возможности использования ММВ для организации каналов доступа к сетям сотовой связи.

В настоящее время можно с большой долей уверенности говорить о том, что многие из текущих технических проблем, связанных с получением необходимых радиочастотных интегральных микросхем (RFIC) и архитектурных решений НЧ-трактов, в конечном итоге будут разумно решены на основе постоянного развития кремниевых технологий и получения составных полупроводников из основных групп III и V, о чем свидетельствует появление для диапазона ММВ стандартов IEEE 802.11.ad и IEEE 801.15.3c [5 – 7].

Анализ зарубежного и отечественного опыта применения субтерагерцового диапазона частот в различных областях науки и техники, показывает наибольшее ее распространение в следующих областях:

- эффективная беспроводная передача больших объемов данных,
- системы обнаружения опасных материалов на расстоянии;
- системы наблюдения через непрозрачные препятствия;
- радиовидение;
- применение в медицине;
- радионавигация;
- радиоастрономия;
- радиоразведка и т.д.

В части разработки эффективных интеллектуальных систем актуальны работы по построению коммерческих субтерагерцовых сетей и поддержки следующих телекоммуникационных приложений:

- «информационный душ»;
- мобильный доступ;
- высокозащищенные сети связи;
- связь с микро- и нано-устройствами;
- «оптические» беспроводные сети.

#### Список использованных источников

1 Y. Azar et al., “28 GHz Propagation Measurements for Outdoor Cellular Communications Using Steerable Beam Antennas in New York City,” 2013 IEEE ICC, 2013, pp. 5143–47.

2 W. Roh et al., “Millimeter-Wave Beamforming as an Enabling Technology for 5G Cellular Communications: Theoretical Feasibility and Prototype Results,” IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 2, 2014, pp. 106–13.

3 T. S. Rappaport et al., “38 GHz and 60 GHz Angle-Dependent Propagation for Cellular and Peer-to Peer Wireless Communications,” 2012 IEEE ICC, 2012, pp. 4568–73.

4 J. N. Murdock et al., “A 38 GHz Cellular Outage Study for an Urban Outdoor Campus Environment,” 2012 IEEE Wireless Commun. and Networking Conf., 2012, pp. 3085–90.

5 T. Tsukizawa et al., “A Fully Integrated 60 GHz CMOS Transceiver Chipset Based on WiGig/IEEE802. 11ad with Built-In Self Calibration for Mobile Applications,” 2013 IEEE Int’l. Solid- State Circuits Conf. Dig. Tech. Papers, 2013, pp. 230–231.

6 E. Cohen et al., “A Thirty-Two-Element Phased-Array Transceiver at 60 GHz with RF-IF Conversion Block in 90 nm Flip chip CMOS Process,” 2010 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symp., IEEE, 2010, pp. 457–60.

7 A. Valdes-Garcia et al., “Single-Element and Phased-Array Transceiver Chipsets for 60-GHz Gb/s Communications,” IEEE Commun. Mag., vol. 49, no. 4, 2011, pp. 120–31. [9] Y. P. Zhang and D. Liu, “Antenna-on-Chip and Antennain- Package Solutions to Highly Integrated Millimeter-Wave Devices for Wireless Communications,” IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 57, no. 10, 2009, pp. 2830–41.

УДК 537.86 + 621.396.67

## **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАМАТЕРИАЛОВ В БЕСПРОВОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ РАДИОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА**

Г.И. Леонович<sup>1</sup>, Д.С. Клюев<sup>2</sup>, К.Е. Воронов<sup>3</sup>, А.М. Телегин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Секция прикладных проблем при Президиуме РАН, г. Москва;

<sup>2</sup>Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара;

<sup>3</sup>«Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара

**Ключевые слова:** метаматериалы, беспроводные технологии, радиочастотный диапазон, направления научных исследований.

В настоящее время наблюдается непрерывное совершенствование беспроводных технологий, применяемых в классической радиосвязи, в стационарных и мобильных телекоммуникационных и сенсорных сетях, в радиолокации, радиотелеметрии, радиофотонике и др. Благодаря последним достижениям в области материаловедения, связанным с метаматериалами, сформировался ряд новых научных направлений в различных сферах человеческой деятельности. Метаматериалы (ММ) — композиты, получаемые искусственной модификацией внедряемых в базовую структуру элементов, что дает возможность менять размеры,