

УДК 621.391.6; 535.14

## СИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА

В. Л. Вакс<sup>1,2</sup>, В. В. Бирюков<sup>1</sup>, К. И. Кисиленко<sup>1</sup>, А. Н. Панин<sup>1,2</sup>, С. И. Приползин<sup>1,2</sup>,  
А. С. Раевский<sup>1</sup>, В. В. Щербаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет  
им Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24

<sup>2</sup> Институт физики микроструктур РАН, 603950, Нижний Новгород, ГСП-105

Статья поступила в редакцию 26 ноября 2018 г.

**Аннотация.** Терагерцовый диапазон частот перспективен для создания высокоскоростных беспроводных сетей связи. Несмотря на сложности в обеспечении работы сетей связи из-за быстрого ослабления сигнала при распространении в атмосфере, в терагерцовом диапазоне возможно получение полосы пропускания шириной в несколько десятков ГГц, а следовательно, достижение высокой пропускной способности. Для обеспечения дальности прямой наземной связи на расстояние до нескольких километров перспективны фиксированные узконаправленные антенны (антенны Кассегрена) с большим коэффициентом усиления. В работе представлен макет приемопередатчика (200–220 ГГц) на основе современной элементной базы полупроводниковой электроники. Представлены результаты теоретических расчетов, согласно которым мощности на выходе передатчика в несколько сотен микроватт достаточно для передачи данных на расстояние до 1,5 км при коэффициенте усиления антенны не менее 50 дБ. Представлены результаты эксперимента, показавшие возможность передачи цифровых сигналов со скоростью до 1 ГГб/с на расстояние 1 км.

**Ключевые слова:** терагерцовый диапазон частот, высокоскоростные беспроводные сети связи, приемопередатчик, цифровой сигнал.

**Abstract.** Terahertz frequency range is very promising for development of high speed wireless communications systems. In spite of complicated operation of communication systems due to fast signal attenuation at its propagation in

atmosphere one can achieve the bandwidth about some tens of GHz, which provides the high channel capacity in terahertz frequency range. Use of fixed narrow-beam antennas (Kassegren antennas) with high antenna power gain allows us to provide the direct surface communications distance to some kilometers. The model of transmitter-receiver system of 200-220 GHz range based on modern semiconductor devices is presented. The transmitter outpower of some hundreds microwatts is shown to be sufficient for data transmission for the distance of 1.5 km with antenna power gain of no less than 50 dB according theoretical calculations. The possibility of digital signal transmitting with the speed up to 1 Gb/s for the distance of 1 km is shown experimentally.

**Key words:** terahertz frequency range, high speed wireless communications systems, transmitter-receiver system, digital signal.

## 1. Введение

Терагерцовый (ТГц) диапазон частот является перспективным для построения высокоскоростных беспроводных сетей связи. Работа в ТГц частотном диапазоне позволяет использовать полосу пропускания шириной в несколько десятков гигагерц, обеспечивая высокую пропускную способность сети связи. Однако использование ТГц диапазонов частот вносит определенные сложности в работу сетей связи, в частности, связанные с необходимостью учитывать быстрое ослабление сигнала при распространении в атмосфере.

При распространении волн ТГц частотного диапазона возникает сильное ослабление сигнала, за счет поглощения в атмосферных газах и гидрометеорах, а также деполяризация излучения, амплитудные и фазовые изменения. С повышением частоты ослабление сигнала в атмосфере возрастает и зависит от погодных условий. В атмосфере имеются и постоянные полосы интенсивного поглощения радиоволн, обусловленные наличием молекулярного кислорода и водяного пара: 22,2 ГГц ( $H_2O$ ), 60 ГГц ( $O_2$ ), 118,8 ГГц ( $O_2$ ) и 180 ГГц ( $H_2O$ ) и т.д.[1] Практический интерес для связи представляют «окна прозрачности», в которых наблюдается минимальное затухание по сравнению с соседними

участками ТГц частотного диапазона. Окна относительной прозрачности лежат в диапазонах: 70–100 ГГц, где атмосферное затухание составляет около 1,5 дБ/км, что близко к затуханию в традиционных СВЧ-диапазонах; в начале ТГц диапазона в интервале 200–300 ГГц, где атмосферное затухание составляет около 5-10 дБ/км. Из-за сравнительно большого поглощения в атмосфере волны субТГц и ТГц частотного диапазонов относятся к волнам ближнего действия. Ограничение на дальность связи может быть частично снято с помощью понижения частоты до нижней части ТГц спектра - в область около 0,2 ТГц, а также уменьшения ширины полосы пропускания канала с десятков до единиц гигагерц. Кроме того, для прямой наземной связи способом скомпенсировать большие потери является использование фиксированных узконаправленных антенн; при передаче на расстояние более 100 метров.

В настоящее время наибольшая скорость передачи данных составляет 24 – 25 Гбит/с на расстоянии не более 10 м. Эти результаты представлены в работах [2,3]. Наибольшая дальность связи составляет 5,8 км при скорости передачи данных 10 Гбит/с на частоте 120 ГГц [4]. Наиболее эффективная система связи представлена в [5]. Она обеспечивает скорость передачи данных до 10 Гбит/с при ширине канала связи 3,6 ГГц и частоте несущей 140 ГГц на дальности до 1,5 км. В данной работе применена 16-QAM модуляция.

ТГц частотный диапазон может в будущем стать основой беспроводных коммуникационных систем, обеспечивающих в сотни раз большую скорость передачи данных, нежели нынешние сети мобильной связи. Развитие и внедрение систем различного назначения этих диапазонов находятся в прямой зависимости от появления и усовершенствования приборов современной электроники.

## **2. Широкополосное приемопередающее устройство ТГц частотного диапазона**

Группой исследователей из НГТУ им. Р.Е. Алексеева и ИФМ РАН был разработан подход к созданию широкополосного приемопередающего устройства и реализован лабораторный макет приемопередающего тракта на

частоте 200 – 220 ГГц с применением современных полупроводниковых приборов. На рисунках 1 и 2 представлены схемы передатчика и приемника этого тракта.

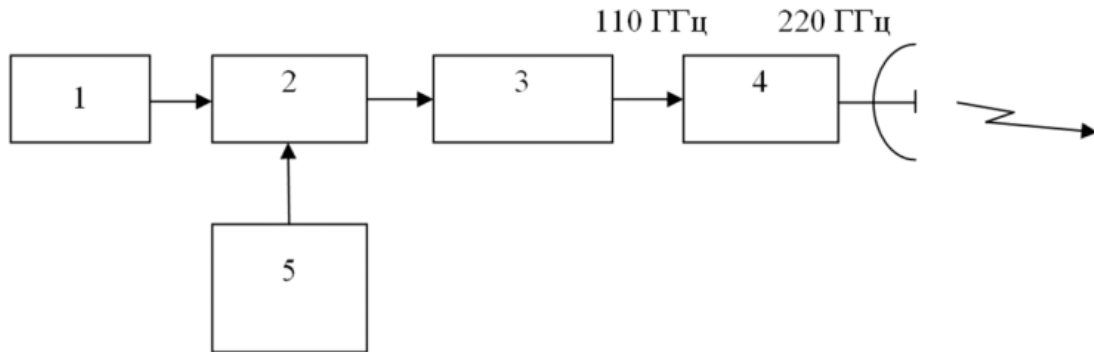


Рис. 1. Схема передатчика: 1- генератор на диэлектрическом резонаторе (ГДР) (7,333 ГГц), 2- модулятор (амплитудная манипуляция) (АМн), 3-умножитель частоты на 15, 4 - удвоитель частоты, 5 – цифровой интерфейс до 1 ГГц/с

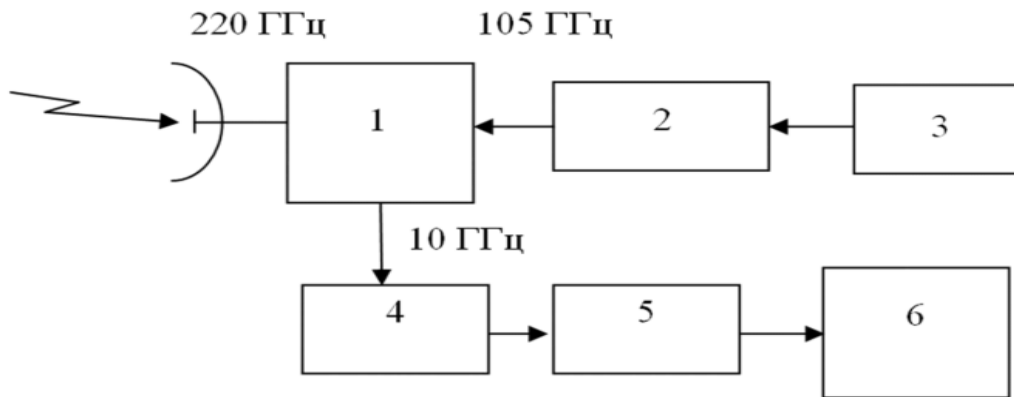


Рис. 2. Схема приемника: 1 - субгармонический смеситель, 2 -умножитель частоты на 15, 3- генератор на диэлектрическом резонаторе (7 ГГц), 4- усилитель промежуточной частоты (УПЧ), 5 - демодулятор (амплитудная манипуляция), 6 - цифровой интерфейс до 1 ГГц/с

В качестве задающих генераторов как передатчика, так и гетеродина приемника применены генераторы на диэлектрических резонаторах (ГДР). Они обладают достаточно высокой стабильностью частоты и очень высокой спектральной чистотой сигнала. Далее сигналы от ГДР проходят через умножители частоты на 15. В передатчике этот сигнал предварительно модулируется по амплитуде. Выбрана амплитудная манипуляция (АМн), как наиболее простой способ и при данном построении схемы единственно возможный. Другие виды модуляции неизбежно были бы искажены при умножении частоты. Сигнал с частотой 110

ГГц в передатчике затем удваивается по частоте до 220 ГГц и поступает на антенну, имеющую высокий (порядка 50 дБ) коэффициент усиления.

Осциллограмма амплитудно-манипулированного сигнала, прошедшего умножитель частоты, фильтры и демодулятор, показана на рисунке 3. Результаты данного эксперимента подтверждают возможность использования амплитудной манипуляции для построения систем ТГц связи.

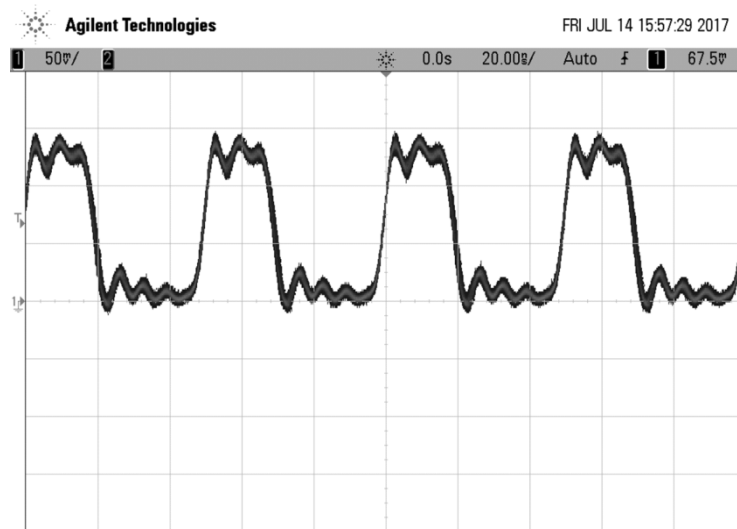


Рис. 3. Осциллограммы демодулированных сигналов: частота повторения импульсов 20 МГц – по оси абсцисс – время, цена деления – 20 нс, по оси ординат напряжение на выходе демодулятора, цена деления – 50 мВ

Приемная антенна принимает сигнал с несущей частотой 220 ГГц и передает его на входной субгармонический смеситель, на другой вход которого поступает сигнал от гетеродина 105 ГГц. С выхода смесителя сигнал ПЧ 10 ГГц усиливается и проходит демодуляцию. Расчеты показывают, что мощности на выходе передатчика в несколько сотен микроватт достаточно для передачи цифровых данных на расстояние до 1,5 км при коэффициенте усиления антенны не менее 50 дБ.

Одним из видов антенн, обеспечивающих такой высокий коэффициент усиления, является зеркальная антенна Кассегрена. Она состоит из рупорного облучателя, вспомогательного зеркала - субрефлектора в виде гиперboloида вращения, и основного зеркала в виде параболоида вращения. Преимуществом антенны является небольшой размер, простота в изготовлении, при этом

достигаются высокие значения коэффициента усиления и малые уровни боковых лепестков. Конструкция антенны представлена на рисунке 4.

Лучевой подход [6] позволяет в первом приближении найти основные параметры антенны:

- диаметр основного зеркала:

$$D_6 = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{G_m}{v_{рез}}}, \quad (1)$$

где  $v_{рез}$  – коэффициент использования поверхности (рекомендуемый 0,5...0,7),

$\lambda$ - длина волны,  $G_m$  - коэффициент усиления;

-фокусное расстояние:

$$f_6 = (0,35 \dots 0,5) D_6; \quad (2)$$

- половина угла раскрыва:

$$\psi_0 = 2 \arctg \left( \frac{D_6}{4f_6} \right); \quad (3)$$

-диаметр вспомогательного зеркала:

$$D_M = \sqrt{2\alpha\lambda f_6}, \quad (4)$$

где  $\alpha$ - коэффициент, учитывающий амплитудное распределение поля в раскрыве облучателя;

- эксцентриситет:

$$e_k = \frac{(4f_6 + D_M)}{(4f_6 - D_M)}; \quad (5)$$

- половина угла раскрыва вспомогательного зеркала

$$\phi_0 = 2 \arctg \left[ \left( \frac{e_k - 1}{e_k + 1} \right) \operatorname{tg} \left( \frac{\psi_0}{2} \right) \right]; \quad (6)$$

- расстояние между действительным и мнимым фокусами гиперболы

$$4C = \frac{D_M \sin(\psi_0 + \phi_0)}{\sin \psi_0 \sin \phi_0}. \quad (7)$$

Рассчитанных параметров достаточно для построения модели антенны в системе автоматизированного проектирования (САПР) для точного расчета и анализа полученных характеристик.

Расчет электрических параметров и характеристик антенны Кассегрена проводился при помощи САПР с использованием метода интегральных уравнений, позволяющего выполнить расчет крупных (в длинах волн) структур.

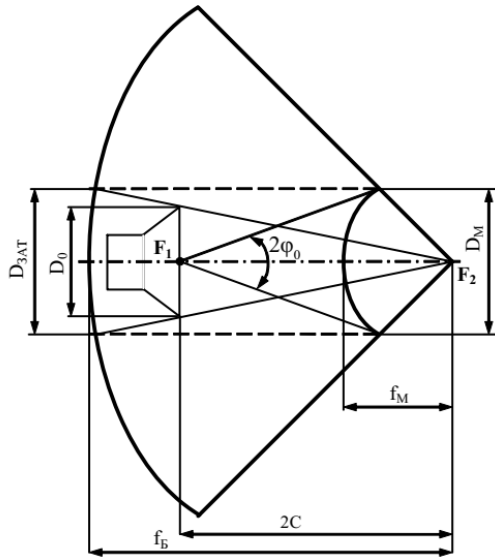


Рис.4. Основные геометрические параметры антенны Кассегрена

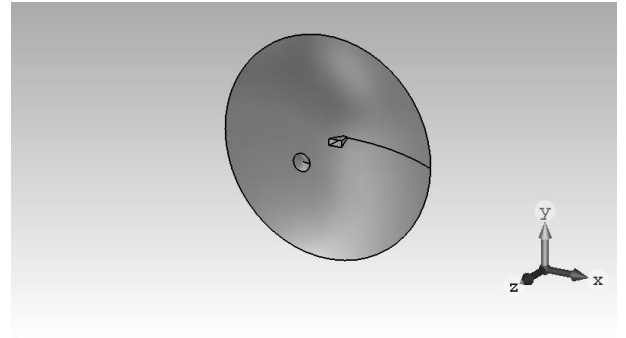


Рис. 5 – Модель антенны Кассегрена в САПР

На рисунке 6 приведены результаты расчета диаграммы направленности (ДН) антенны Кассегрена.

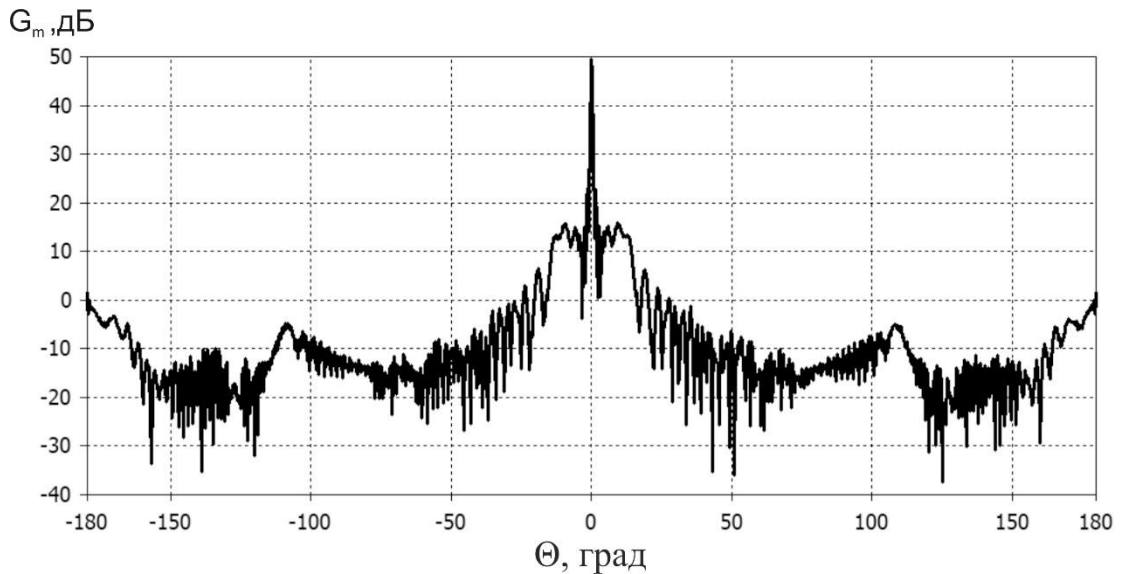


Рис. 6 - Диаграмма направленности антенны Кассегрена в E-плоскости

Диаграмма направленности имеет игловидную форму и полностью соответствует предъявляемым требованиям, при этом достигается хорошее

согласование в полосе частот 219-221 ГГц. Коэффициент стоячей волны по напряжению не превышает 1,06 в указанной полосе.

Дальнейшее развитие предложенной схемы предполагает применение усилителей в передатчике и приемнике для увеличения выходной мощности и уменьшения коэффициента шума приемника.

### 3. Заключение

В работе представлен современный подход к созданию высокоскоростных беспроводных систем связи ТГц частотного диапазона на основе полупроводниковых приборов и фиксированных узконаправленных антенн. Представлен разработанный лабораторный макет широкополосного приемопередатчика диапазона 200-220 ГГц. Приведены результаты предварительного тестирования лабораторного макета широкополосного приемопередающего устройства, показавшие возможность передачи цифровых сигналов со скоростью до 1 ГГб/с.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №17-19-01628).

### Литература

1. Fitch M.J., Osiander R.. Terahertz Waves for Communications and Sensing. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 2004, Vol. 25, No. 4, pp. 348-355.
2. Kallfass I., Antes J., Schneider T. et al. All active MMIC-based wireless communication at 220 GHz. *IEEE Trans. Terahertz Sci.Technol.*, 2011, Vol. 1, No. 2, pp. 477–487.
3. Song H. J., Ajito K., Muramoto Y., et al. 24 Gbit/s data transmission in 300 GHz band for future terahertz communications. *Electron. Lett.*, 2012, Vol. 48, pp. 953–954.
4. Hirata A., Kosugi T., Takahashi H., et al. 5.8-km 10-Gbps data transmission over a 120-GHz-band wireless link. *2010 IEEE Int. Wireless Inform. Technol. Syst. Conf.*, 2010, pp. 1–4



5. Wang C., Lin C., Chen Q., et al. A 10-Gbit/s Wireless Communication Link Using 16-QAM Modulation in 140-GHz Band. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, Vol. 61, No. 7, pp. 2737-2746.
6. И.П. Заикин, А.В. Тоцкий, С.К. Абрамов. Проектирование антенных устройств радиорелейных линий связи. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. 90 с.

**Для цитирования:**

В. Л. Вакс, В. В. Бирюков, К. И. Кисиленко, А. Н. Панин, С. И. Приползин, А. С. Раевский, В. В. Щербаков. Системы беспроводной связи терагерцового частотного диапазона. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec18/4/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2018.12.4