



ТЕРАГЕРЦЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

*В.Семенова, В.Беспалов,
varvara.semenova@niuitmo.ru,
НИУ ИТМО, Санкт-Петербург*

Повсеместное распространение мобильных устройств и точек беспроводного доступа, появление форматов видеоданных со сверхвысоким разрешением, а также общая тенденция к увеличению объемов передаваемой информации ведут к необходимости создания высокоскоростных беспроводных сетей с повышенной пропускной способностью. Наиболее перспективным подходом для решения этой задачи являются беспроводные терагерцевые системы связи на основе технологий фотоники. Обзор посвящен достижениям в области разработки и применения терагерцевых линий связи, а также перспективам развития представленных технологий и компонентной базы.

ВВЕДЕНИЕ

Высокая скорость передачи данных в волоконно-оптических сетях, достигающая уровня петабит в секунду [1], ведет за собой возрастающие требования к объему и скорости передачи данных в системах беспроводного доступа. Согласно закону Эдхольма о росте скорости передачи данных в беспроводных линиях связи [2], уже к 2020 году потребуются скорости в десятки и сотни Гбит/с – не менее 24 Гбит/с для трансляции телевизионных данных с ультравысоким разрешением (UHDTV); и 100 Гбит/с для поддержки 100G Ethernet [3, 4]. Технологии обмена данными на малых расстояниях [5] также требуют увеличения скорости передачи данных между компонентами различных устройств и оборудования (рис.1) [6].

Использование ИК-диапазона частот для высокоскоростной передачи данных не представляется возможным: скорость передачи в данном диапазоне ограничена сотнями мегабит в секунду [7], это связано с малой чувствительностью приемников излучения, диффузными потерями на отражение, наличием сильного светового шума в окружающей среде, а также ограничением по мощности излучения из-за опасности повреждения органов зрения [8]. Таким

TERAHERTZ TECHNOLOGIES FOR TELECOMMUNICATIONS

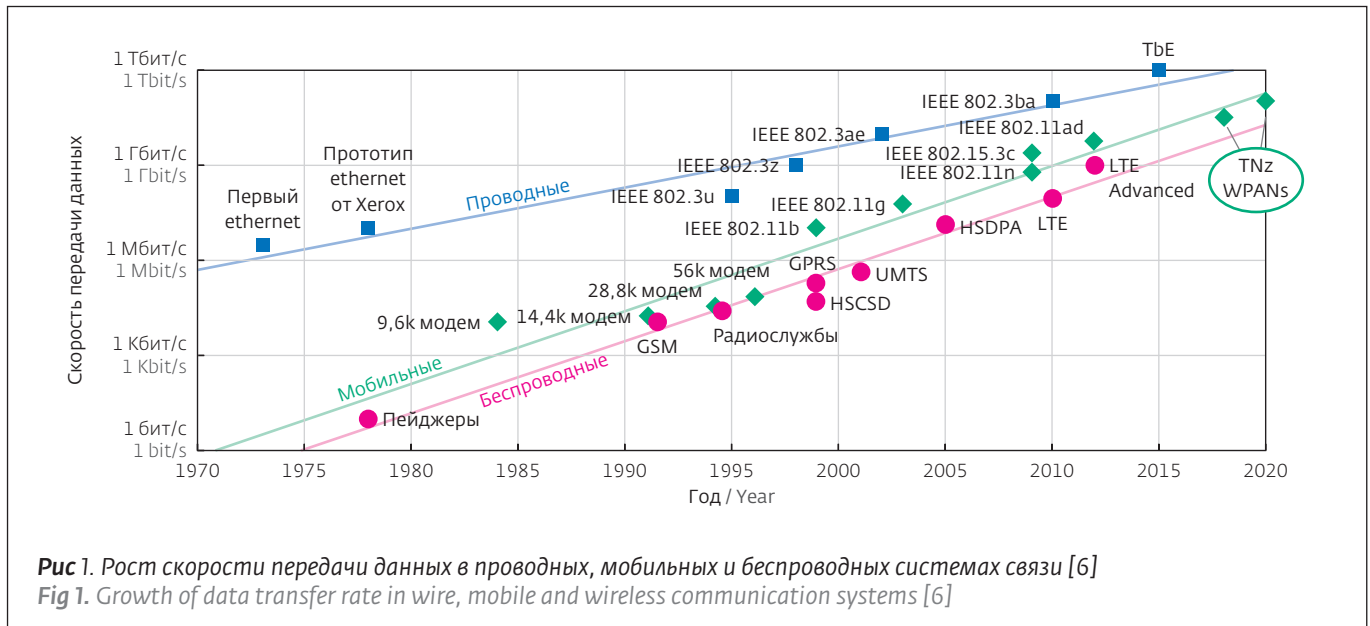
*V.Semenova, V.Bespalov,
varvara.semenova@niuitmo.ru,
ITMO, Saint Petersburg*

The increasing majority of mobile devices, hotspots, the emergence of video formats with ultra-resolution and growing amount of stored and transmitted data led to the demand of higher throughput and data rate wireless communications. Thus, several approaches have been developed to achieve high data rates in wireless networks. It is shown that the most reasonable approach is to use the THz frequency range for wireless communications. This paper is devoted to the recent progress in implementation and application of the photonic-based terahertz (THz) communication systems. Prospects in the development of technology and component base is also discussed.

INTRODUCTION

High speed of transmission in fiber optic networks reaching Pbit/s [1] leads to increased requirements for volume and data transfer rate in wireless access systems. According to Edholm's law of increased data transfer rates in wireless links [2], data transfer rates of dozens and hundreds Gbits – not less than 24 Gbit/s will be required for broadcasting UHDTV television data by 2020; and for 100G Ethernet support 100 Gbit/s will be needed [3, 4]. Short-range data exchange technologies [5] also require increasing data transfer rates between the components of different devices and equipment (Fig.1) [6].

Use of infrared band for high speed data transfer does not seem possible either: data transfer rate in this band is limited by hundreds of Mbit/s [7] due to low sensitivity of radiation receivers, diffuse reflection losses, existence of light noise in the environment, as well as radiation power limitation due to the risk of visual impairment [8]. In such a way, there are to possible approaches to achieve data transfer rates of 10–100 Gbit/s in wireless networks; first of them implies increase of communication line spectral efficiency up to dozens of bit/s/Hz; the second approach consists in the increase of frequency band to few dozens of GHz. The last



образом, для достижения скоростей 10–100 Гбит/с в беспроводных сетях возможно использовать два пути: первый подразумевает увеличение спектральной эффективности каналов связи до десятков бит/с/Гц; второй заключается в увеличении полосы частот до нескольких десятков гигагерц. Последний подход представляется наиболее целесообразным и предполагает использование терагерцевого диапазона частот (0,1–10 ТГц), поскольку именно в данном диапазоне располагается необходимый по величине участок незарезервированного спектра.

Существуют и другие преимущества применения субмиллиметровых волн в линиях беспроводной связи по сравнению с ближним ИК-диапазоном спектра. Во-первых, ТГц-сигналы испытывают меньшее по сравнению с ИК-сигналами ослабление при тех же погодных условиях – например, при тумане [9, 10]. Во-вторых, амплитудно-фазовые флуктуации, вызванные локальными изменениями показателя преломления атмосферы, также практически не влияют на распространение ТГц-излучения, но ограничивают применение систем на основе ИК-излучения [9–11]. Описанные преимущества характерны для частот, попадающих в окна прозрачности атмосферы, а именно в диапазонах 75–100; 110–150; 200–300 и 600–700 ГГц [12]. При столь широких доступных полосах частот даже при применении простейшей амплитудной модуляции могут быть достигнуты скорости передачи данных в десятки гигабит в секунду [13, 14]. Еще одно преимущество ТГц-линий связи заключается

approach seems to be the most feasible and implies using terahertz frequency band (0.1–10 THz), as this very band includes required section of unreserved spectrum.

There are some other advantages of using submillimeter waves in wireless links compared to near infrared spectrum region. First of all, THz signals are less lost, compared to infrared signals, under the same weather conditions – for example, in case of fog [9, 10]. Second, fain-phase fluctuations caused by local changes of atmospheric refractive index almost don't influence the transmission of THz radiation, but they limit application of infrared radiation based systems [9–11]. Described

Сокращения

- КАМ –квадратурная амплитудная модуляция
- КМОП – комплементарная структура металл-оксид-полупроводник
- EDFA- легированный эрбием волоконный усилитель
- SOA – полупроводниковый оптический усилитель
- ФД – фотодиод
- ФП – фотопроводник
- ЭОМ – электрооптический модулятор
- ЭПМ – электро-поглощающий модулятор
- EDFA – эрбиевый волоконный усилитель
- SOA – полупроводниковый оптический усилитель
- ДБШ – диод на основе барьера Шоттки

в возможности осуществления на их основе систем защищенных коммуникаций [15].

Поскольку ТГц-излучение сильно ослабляется при распространении в атмосфере, как это показано на рис. 2, то область применения ТГц-связи в основном ограничена локальными сетями беспроводного доступа. При необходимости переноса ТГц-сигналов на дальние дистанции применяют технологию модуляции на ТГц-частотах оптических сигналов, передаваемых по волокну [14, 16]. Характеристики поглощения и рассеяния канала распространения ТГц-излучения внутри помещений исследуются теоретически и экспериментально с учетом диффузного рассеяния волн на неровностях поверхностей, отражения от многослойных структур и дифракции [11, 17].

ПОДХОДЫ К РЕАЛИЗАЦИИ ТГц-БЕСПРОВОДНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

ТГц-системы беспроводной связи подразделяются на оптические, электронные и гибридные, в зависимости от используемых компонентов. Наибольшее распространение к данному моменту получили именно гибридные (смешанные) системы, поскольку на данном этапе развития фотоники и электроники именно сочетание электронных и оптических устройств позволяет достичь рекордных скоростей передачи данных.

Гибридная беспроводная линия ТГц-связи может быть реализована на основе двух подходов, в зависимости от метода генерации ТГц-сигнала. При одном подходе генерация ТГц-сигнала осуществляется технологиями фотоники, при другом – технологиями электроники. Было показано, что подход к генерации ТГц-сигнала на основе технологий фотоники наиболее целесообразен с точки зрения ширины используемой полосы частот, возможностей перестройки и стабильности, и может применяться для достижения скоростей передачи данных до 10 Гбит/с и более, поскольку доступны телекоммуникационные

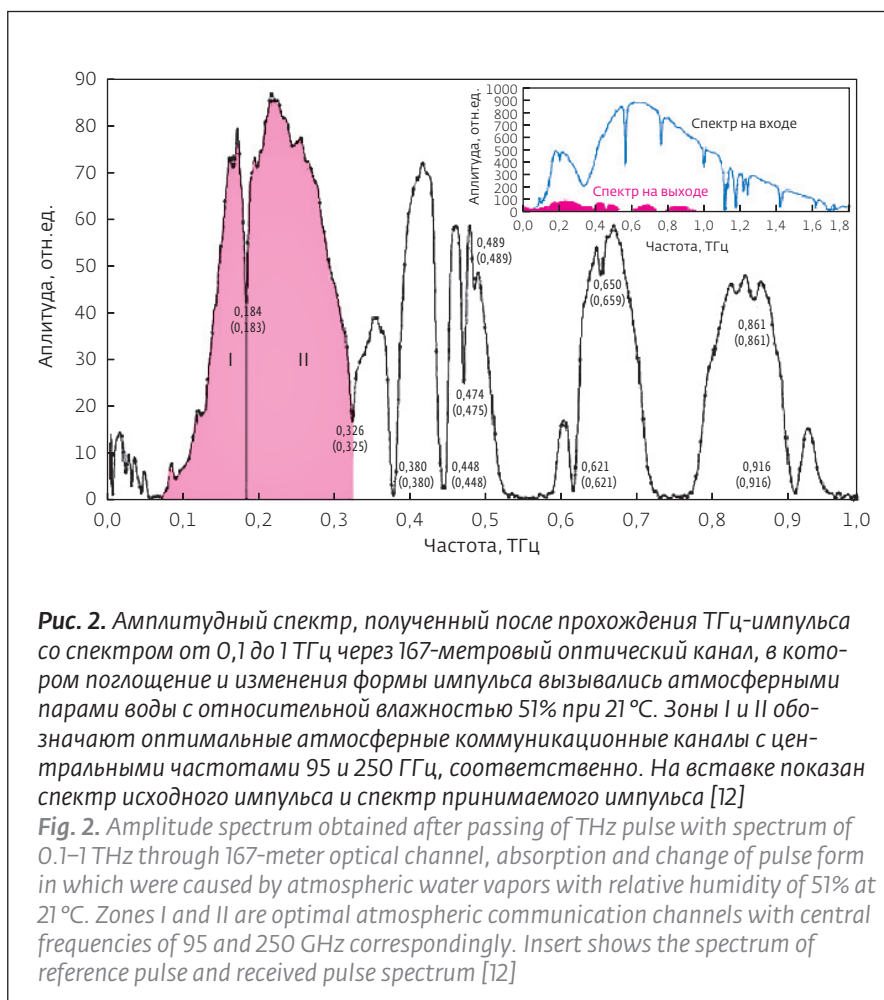


Рис. 2. Амплитудный спектр, полученный после прохождения ТГц-импульса со спектром от 0,1 до 1 ТГц через 167-метровый оптический канал, в котором поглощение и изменения формы импульса вызывались атмосферными парами воды с относительной влажностью 51% при 21 °С. Зоны I и II обозначают оптимальные атмосферные коммуникационные каналы с центральными частотами 95 и 250 ГГц, соответственно. На вставке показан спектр исходного импульса и спектр принимаемого импульса [12]

Fig. 2. Amplitude spectrum obtained after passing of THz pulse with spectrum of 0.1–1 THz through 167-meter optical channel, absorption and change of pulse form in which were caused by atmospheric water vapors with relative humidity of 51% at 21 °C. Zones I and II are optimal atmospheric communication channels with central frequencies of 95 and 250 GHz correspondingly. Insert shows the spectrum of reference pulse and received pulse spectrum [12]

advantages apply to frequencies falling within atmospheric transparency windows, namely in bands 75–100 GHz, 110–150 GHz, 200–300 GHz, 600–700 GHz [12]. In case of such wide available frequency bands, even during use of the simplest amplitude modulation data transfer rates in dozens of Gbit/s may be obtained [13, 14]. One more advantage of THz communication lines is the possibility of protected communication systems based on them [15].

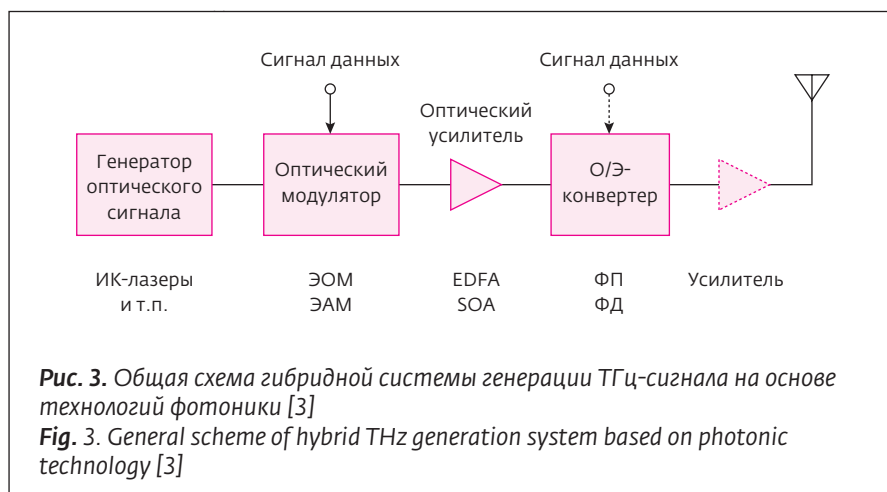
As THz radiation is significantly lost during dissemination in the atmosphere, as it is shown in the fig. 2, field of THz communication application is mainly limited by local wireless access networks. In case, if it is necessary to transfer THz signal to long distances, THz optical signal modulation technology is used for signals transferred by fiber [14, 16]. Characteristics of absorption and spreading of THz radiation transfer channel indoors are theoretically and experimentally studied, wave diffuse scattering on surface irregularities, multilayer structure return and diffraction are taken into consideration [11, 17].

компоненты, такие как лазеры, модуляторы и фотодиоды, работающие на таких скоростях. Применение оптоволоконных кабелей позволяет передавать высокочастотные радиосигналы на длинные дистанции [16, 34]. Кроме того, безусловным преимуществом подхода на основе фотоники, является тот факт, что оптоволоконные и беспроводные коммуникационные сети могут органично соединяться с точки зрения скорости передачи данных и формата модуляции [15, 18, 19].

Данная работа посвящена последним достижениям в области реализации гибридных и полностью оптических беспроводных систем ТГц-связи на несущих частотах более 100 ГГц с применением технологий фотоники для генерации сигналов.

КОМПОНЕНТЫ И КОНФИГУРАЦИИ СХЕМ ГЕНЕРАЦИИ СИГНАЛА

Методы генерации оптических сигналов на основе технологий фотоники, наиболее эффективно применяемые в беспроводных системах ТГц-связи, включают генерацию ТГц-сигналов сверхбыстрыми импульсными лазерами [20] и гетеродинирование оптических биений (фотосмещение) непрерывного излучения [3, 19, 21–23]. Общая схема генерации оптического сигнала методами фотоники изображена на рис.3. Оптический сигнал, интенсивность которого модулируется на ТГц-частотах, сначала генерируется оптическим источником (с импульсным или непрерывным излучением), а затем кодируется электрооптическим модулятором на основе интерферометра Маха-Цандера. Наконец, огибающая оптического сигнала конвертируется в ТГц-сигнал фотодиодом или фотопроводником, после чего он испускается в открытое пространство антенной. В некоторых случаях за фотодиодом помещают усилитель мощности и/или частотный множитель, если только данные электронные устройства доступны на нужных частотах. В качестве генератора оптического сигнала чаще всего применяются ИК-полупроводниковые лазеры, поэтому неотъемлемой частью таких схем являются надежные и экономически выгодные телекоммуникационные компоненты: оптическое волокно, эрбиевые волоконные усилители и полупроводниковые лазерные усилители.



APPROACHES TO REALIZATION OF THz WIRELESS LINKS

THz wireless communication networks are divided into optical, electronic and hybrid networks depending on used components. Nowadays, hybrid (mixed) systems are the most widely used, as at this stage of development of photonics and electronics this very combination of electronic and optical devices allows obtaining records data transfer rates.

Hybrid THz wireless communication link may be realized on the basis of two approaches, depending on the method of THz signal generation. One approach includes THz signal generation by means of photonics technologies, the other one – electronics technologies. It was demonstrated that photonics based approach to THz signal generation was the most feasible regarding used frequency band, possibilities of reconstruction and stability; it may be applied to obtain data transfer rates up to 10 Gbit/s and more due to availability of

Abbreviations

QAM – Quadrature amplitude modulation
 CMOS – Complementary metal-oxide-semiconductor structure
 EDFA – Erbium doped fiber amplifier
 SOA – Semiconducting optical amplifier
 PD – Photodiode
 PC – Photoconductor
 EOM – Electro-optical modulator
 EAM – Electro-absorption modulator
 EDFA – Erbium doped fiber amplifier
 SOA – Semiconducting optical amplifier
 SD – Schottky diode



Для модуляции ТГц-сигналом эффективно применяется управление напряжением смещения конвертора [19].

В случае генерации сигналов методами фотоники оптоэлектронный преобразователь (фотодиод или фотопроводник), работающий на длинах волн 1,3–1,55 мкм, является ключевым компонентом: в дополнение к оптическим источникам сигнала он, в конечном счете, определяет производительность передачи в отношении пропускной способности и мощности [22]. Наиболее распространенными и коммерчески доступными являются фотопроводники на основе выращенных при низкой температуре структур GaAs (LT-GaAs) для длин волн лазерного излучения 700–900 нм, и на основе структур LT-InGaAs для длин волн 1300–1600 нм [23, 24]. На практике фотопроводящие материалы чаще всего исполняют роль переключателей, заключенных в структуру металлических (к примеру, золотых) антенн, образуя фотопроводящие антенны. При освещении такой структуры импульсами фемтосекундной длительности фотопроводящий переключатель переходит из изолирующего в проводящее состояние. В результате перехода возникает короткий импульс тока, который и является источником ТГц-излучения.

Фотопроводники и фотопроводящие антенны применяются как с импульсными, так и с непрерывными источниками оптического сигнала, тогда как фотодиоды с точки зрения выходной мощности более эффективны в сочетании с непрерывными источниками. Для генерации и регистрации непрерывного ТГц-излучения применяют метод фотосмещения [3, 19, 21–23]. При данном подходе генерация ТГц-излучения происходит в результате гетеродинного смешения и введения в фотопроводящую структуру или фотодиод двух световых волн разной частоты. На рис.4а схематично изображена реализация данного метода с помощью двух лазерных источников с перестраиваемыми длинами волн. Данная техника генерации обладает рядом преимуществ для применения в ТГц-беспроводных системах связи: она обеспечивает наибольший диапазон перестройки частоты излучения – от ГГц- до ТГц-региона. Помимо этого, при данном подходе не возникает необходимости в дорогостоящих электронных устройствах, работающих на частотах миллиметрового и/или ТГц-диапазона. Нужно, однако, отметить, что для эффективного фотосмещения поляризация, частоты и фазы вводимых оптических пучков должны быть постоянны, поэтому

such telecommunication components as lasers, modulators and photodiodes working at such data transfer rates. Use of fiber optic cables allows transferring high-frequency radio signals at long distances [16, 34]. Besides that, absolute advantage of photonic approach is the fact that fiber optic and wireless communication networks may be smoothly combined regarding data transfer rate and modulation format [15, 19].

This work is devoted to the newest achievements in realizing hybrid and fully optical THz communication wireless systems at carrier frequencies exceeding 100 GHz using photonic technologies for signal generation.

COMPONENTS AND CONFIGURATION OF SIGNAL GENERATION SCHEMES

Methods of optical signal generation based on photonic technologies that are the most efficiently used in wireless THz communication systems include generation of THz signals by means of ultrafast pulsed lasers [20] and heterodyning of optic beats (photomixing) of continuous radiation [3, 19, 21–22, 23]. General scheme of optical signal generation by means of photonic methods is shown in the fig. 3. Optical signal whose intensity is modulated on THz frequencies is at first generated by optical source (with pulsed or continuous radiation), and then it is coded by electro-optical modulator based on Mach-Zehnder interferometer. Finally, optical signal envelope is converted to THz signal by means of photodiode or photoconductor; then it is emitted to open space by antenna. In some case power amplifier and/or frequency multiplier is placed after the photodiode, if these electronic devices are available at required frequencies. Infrared semiconductor lasers are frequently used as optical signal generators, that's why reliable and feasible telecommunication components – optical fiber, erbium doped fiber amplifiers and semiconductor laser amplifiers – are essential parts of such schemes. Control of converter electrical bias is effectively used for THz signal modulation [19].

In case of signal generation by means of photonic methods, optoelectronic converter (photodiode or photoconductor) working at wavelengths of 1.3–1.55 μm is the key component additional to optical signal sources; eventually, it determines transmission capacity regarding capacity and power [22]. The most widespread and commercially available are photoconductors based on structures grown at low temperatures – GaAs (LT-GaAs) for 700–900 nm laser wavelengths and LT-InGaAs for 1300–1600 nm



необходимо вводить в схему системы фазовой синхронизации. Таким образом, применение оптических смесителей для ТГц-генерации имеет ряд преимуществ – они недорогие, компактные, работают при комнатной температуре и допускают перестройку частоты излучения. Однако, довольно узкая полоса пропускания, вызванная присоединяемыми к ним для большей эффективности излучения антеннами, ограничивает применение смесителей в ТГц-беспроводных системах коммуникации, поскольку для дальнейшего увеличения скорости передачи данных необходимы большие полосы частот. Выходом может являться разработка смесительных антенн с высокой спектральной полосой пропускания и эффективностью, а также большим усилением (для компенсации потерь мощности излучения при распространении сигнала в воздухе). Например, в [25] сообщалось о создании антенны на основе фотонно-кристаллической структуры, полностью покрывающей диапазон от 275 до 320 ГГц. Ранее были разработаны фотосмесители со встроенной антенной, и на их основе продемонстрирована генерация излучения с перестраиваемой частотой в диапазоне 30–300 ГГц [26].

На рис. 4б показана другая гетеродинная техника генерации ТГц-излучения, которая позволяет получать сигналы с низким фазовым шумом [27–29]. Ключевыми компонентами являются генератор оптической частотной гребенки и оптический фильтр, выделяющий две частоты оптической гребенки. Оптическую частотную гребенку получают либо с помощью лазерной системы с синхронизацией мод, либо модуляцией непрерывного пучка лазерного излучения. Таким образом, генерируются многочастотные оптические сигналы, интервалы между которыми равны межмодовой частоте f_0 для лазеров с синхронизацией мод, причем все моды синхронизированы по фазе. Выделение и комбинация двух мод осуществляется между модами с интервалом Nf_0 . Основная частота f_0 обычно находится в диапазоне от 10 до 30 ГГц, для которого оптические модуляторы и управляющие электронные устройства коммерчески доступны, и фактор умножения N может достигать значений более 50. Поскольку возможна точная перестройка f_0 с помощью синтезированного генератора сигнала, то частота сигнала на выходе может непрерывно меняться от f_0 до Nf_0 .

Как отмечалось выше, во всех гибридных схемах при генерации ТГц-сигнала методами фотоники оптоэлектронный преобразователь является

wavelengths [23–24]. In practice, photoconductive materials the most often are used as switches surrounded by the structure of metal (for example, golden) antennas, forming photoconductive antennas. During lighting of such structure with femtosecond pulses, photoconductive switch changes its state from isolating to conducting; in the result of such change short current pulse which is the source of THz radiation is formed.

Photoconductors and photoconductive antennas are used with pulsed as well as continuous optical signal sources; photodiodes are more effective in combination with continuous sources from the point of view of output power. Photomixing method is used for generation and registering of continuous THz radiation [3, 19, 21–23]. With such approach, THz radiation generation results from heterodyning and application of two light waves of different frequencies into photoconductive structure. Fig. 4a contains schematic demonstration of such method realization by means of two laser sources with adjustable wavelengths. This generation technique has a number of advantages for use in THz wireless communication system: it provides the largest range of radiation frequency change – from GHz to THz region; besides that, with such approach expensive electronic devices working at frequencies of millimeter and/or THz range are not needed. However, one needs to understand that for efficient photomixing polarization, frequencies and phases of inserted optical beams must be continuous, that's why it is necessary to add phase synchronization systems to system scheme. In such a way, use of optical mixers for THz generation has a number of advantages – they are cheap, compact, they work at room temperature and allow changing radiation frequency. However, rather narrow bandpass caused by antennas attached to them in order increase radiation efficiency limits application of mixers in wireless communication systems, as for further increase of data transfer rate larger frequency bands are required. The solution may consist in development of mixing antennas with high spectral bandpass and efficiency, as well as significant amplification (for compensation of radiation power losses during signal dissemination with air). For example, in [25] it was said that antenna based on photonic-crystal structure was developed; such antenna fully covers the range of 275 to 320 GHz. Photomixers with built-in antenna were developed earlier; generation of radiation with changeable frequency at 30–300 GHz range was demonstrated on their basis [26].

ключевым компонентом. Для высокоскоростной передачи данных в беспроводных ТГц-системах связи с несущими частотами более 100 ГГц необходимы мощные оптоэлектронные преобразователи, работающие на высоких частотах.

Среди фотодиодов для диапазона 1550 нм наибольшей мощностью на выходе обладают сверхбыстродействующие фотодиоды бегущей волны, с отдельными областями поглощения излучения и разделения фотоносителей с расширенным динамическим диапазоном (Uni-Travelling-Carrier или UTC-PD) для аналоговых волоконно-оптических линий связи, и их модификации: получена мощность более 20 мВт на частоте 100 ГГц, более 500 мкВт на частоте 350 ГГц, более 100 мкВт в диапазоне 350–450 ГГц и более 10 мкВт на частоте 1 ТГц- [23,24,26,28]. Часто для увеличения эффективности фотодиода его интегрируют с плоской антенной.

Для практического применения UTC-фотодиодов в системах беспроводной ТГц-связи необходимо увеличить выходную мощность на частотах выше 500 ГГц более чем на порядок. Работы над увеличением мощности фотодиодов ведутся по трем основным направлениям: устранение проблемы нагрева в UTC-фотодиодах; разработка эффективного соединения между фотодиодом и антенной и создание массивов фотодиодов и антенн. Кроме того, поскольку усилители мощности, оперирующие на данных полосах частот, пока коммерчески не доступны, одним из наиболее эффективных подходов является использование частотного умножителя. К примеру, Моэлер и др. [30] получили с помощью такого подхода выходную мощность в более чем 1 мВт на частоте 625 ГГц, начав с основной частоты 13 ГГц.

Для эффективного соединения фотодиодов и антенн разрабатывают ТГц-волноводы. К примеру, были разработаны фотодиодные модули с полыми прямоугольными волноводами для W-полосы частот (75–110 ГГц), F-полосы (90–140 ГГц), D-полосы (110–170 ГГц) и J-полосы (220–325 ГГц) [26]. Ведутся работы по созданию волноводов для более высоких частот – например, разработан полый стеклянно-металлический волновод с наименьшим затуханием 0,95 дБ/м для частоты 2,5 ТГц [31].

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ

Для детектирования ТГц-сигналов применяют два основных подхода – прямое детектирование

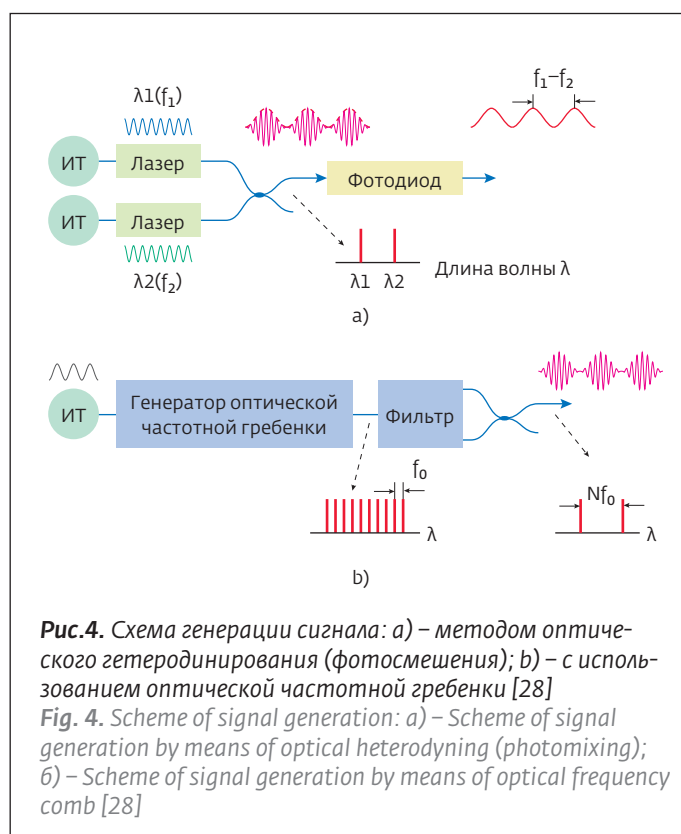
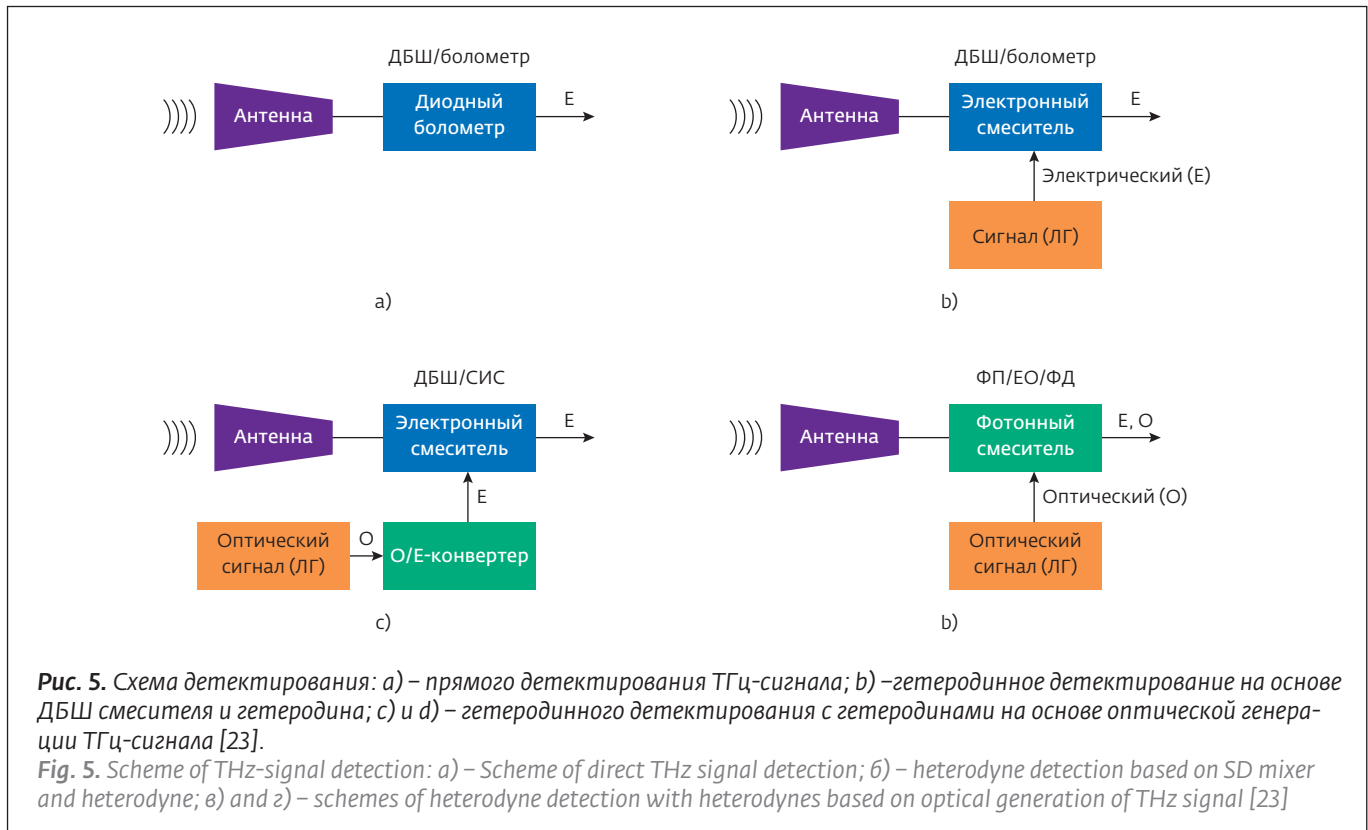


Рис.4. Схема генерации сигнала: а) – методом оптического гетеродинамирования (фотосмешения); б) – с использованием оптической частотной гребенки [28]
Fig. 4. Scheme of signal generation: а) – Scheme of signal generation by means of optical heterodyning (photomixing); б) – Scheme of signal generation by means of optical frequency comb [28]

Another heterodyne technique of THz radiation generation is shown in the fig. 4b; such technique allows obtaining signals with low phase noise [27–29]. Key components are: generator of optical frequency comb and optical filter separating two frequencies of optical comb. Optical frequency comb is obtained either by means of laser system with mode synchronization or by means of modulation of continuous laser beam. In such a way, multifrequency optical signals with intervals between them equal to intermodal frequency f_0 for lasers with mode synchronization are obtained; at this, all modes are synchronized by phase. Separation and combination of two modes is carried out between modes at the interval of Nf_0 . Basic frequency f_0 for lasers with mode synchronization is within the range of 10–30 GHz; optical modulators and controlling electronic devices are not commercially available for such range, and multiplication index N may reach values exceeding 50. Due to possibility of exact change of f_0 by means of synthesized signal generator, output signal frequency may be continuously changed from f_0 to Nf_0 .

As it was mentioned before, optoelectronic converter is the key component of all hybrid systems during generation of THz signal by



и гетеродинное (рис.5). В качестве приемника чаще всего используют диоды с барьером Шоттки (ДБШ) и болометры. Прямое детектирование (рис.5а) является наиболее распространенной методикой для измерения амплитуды или мощности ТГц-излучения, предельная частота детектирования ДБШ может достигать 10 ТГц при применении материалов на основе GaAs и 1,5 ТГц при применении 130-нм кремниевой технологии КМОП. Гетеродинное детектирование на основе ДБШ смесителя и местного генератора колебаний (гетеродина) (рис. 5б) предоставляет большую чувствительность и фазовую информацию о ТГц-сигнале. На рисунке 5в и 5г показаны схемы гетеродинного детектирования с гетеродинами, в которых генерация ТГц- сигнала осуществляется методами фотоники. Преимущество схемы на рис. 5в состоит в том, что сигнал ТГц-гетеродина можно подвести с помощью оптического волокна, а полоса пропускания приемника увеличивается за счет возможностей более широкой перестройки частоты при генерации сигнала ИК полупроводниковыми лазерами [23]. В сочетании с фотосмесителями гетеродинная схема на рис. 5г предоставляет наибольшую полосу пропускания. В качестве фотосмесителей обычно применяют фотопроводники, фотопроводящие антенны и фотодиоды.

means of photonics. For high rate data transfer in wireless THz communication systems with carrier frequencies exceeding 100 GHz powerful optoelectronic converters working at high frequencies are needed.

Among photodiodes for 1550 nm range, ultra-rapid travelling wave diodes with separate zones of radiation absorption and separation of photocarriers with extended dynamic range (Uni-Travelling-Carrier or UTC-PD) for analog fiber optic communication lines and their modifications are characterized with the highest output power: power of more than 20mW at the frequency of 100 GHz, over 500 μW – at the frequency of 350 GHz and over 100μW at the frequency range of 350–450 GHz and over 10μW at the frequency of 1 THz was obtained [23–24, 26, 28]. Photodiode is often integrated with flat antenna to increase its efficiency.

For practical use of UTC photodiodes in wireless THz communication systems it is necessary to increase output power at frequencies over 500 GHz more than in sequence. There are three major directions of works on photodiode power: elimination of UTC diode heating; development of efficient connection between photodiode and antenna and creation of photodiode massifs and antennas. Besides that, as power amplifiers



ДЕМОНСТРАЦИИ СИСТЕМ БЕСПРОВОДНОЙ ТГц-СВЯЗИ

Впервые ТГц-беспроводная система связи с несущей частотой более 100 ГГц была представлена в 2000 году компанией NTT [32]. Система представляла собой беспроводную линию с несущей частотой 120 ГГц, в которой генерация и модуляция сигналов осуществлялась средствами фотоники. Достижение беспрецедентной скорости передачи в 10 Гбит/с [14] подтолкнуло развитие электронных компонентов для беспроводных систем связи, и впоследствии была разработана уже полностью электронная беспроводная система на основе КМОП, с помощью которой в 2008 году была проведена трансляция в режиме реального времени Олимпийских игр в Бейджинге [33]. После этого разработка систем ТГц-беспроводной связи продолжилась быстрыми темпами: в течение следующих лет были опубликованы результаты экспериментов по передаче данных на несущих частотах 75–110 ГГц [16, 34, 35], 140 ГГц [36], 200–240 ГГц [37, 38], 250–400 ГГц [7, 29, 39, 40, 42], 625 ГГц [29, 30].

Разработкой беспроводных коммуникационных систем на основе подходов фотоники в полосе частот 75–110 ГГц (W-диапазон) занимается ряд научных коллективов. Было продемонстрировано несколько таких систем: например, в работе [16] описана 100-Гбит/с гибридная беспроводная линия связи на основе оптической гетеродинной ап-конверсии 12,5 Гбит оптического 16-КАМ сигнала основной полосы с поляризационным уплотнением на расстояниях до 120 см. Впоследствии, этим же коллективом предложена система передачи данных в W-диапазоне на основе генератора оптической гребенки, с помощью которого производилась одновременная генерация ТГц-сигналов шириной полосы в 15 ГГц по трем каналам с ортогональным частотно-пространственным уплотнением со скоростью 8,3 Гбит/с в каждом из каналов [34]. Генерация основной полосы частот и прием осуществлялись по методике, описанной в работе [16], а расстояние передачи достигало двух метров.

Еще один научный коллектив представил систему передачи данных в W-диапазоне, в которой передатчик и приемник выполнены на основе архитектуры импульсного радио [35]. Данная система позволила достичь скорости в 10 Гбит/с как в воздухе, так и по волокну.

В работе [36] описана беспроводная система передачи данных на несущей частоте 140 ГГц с максимальной скоростью передачи в 10 Гбит/с на расстояние в 1,5 км не в реальном времени.

operating at these frequency bands are currently commercially unavailable, one of the most effective approach is the use of frequency multiplier. For example, Moeler et al. [30] obtained output power over 1 MW at the frequency of 625 GHz, having started from 13 GHz, by means of such approach.

For effective connection of photodiodes and antennas THz waveguides are being developed. For example, photodiode modules with hollow rectangular waveguides for W-frequency band (75–110 GHz), F-band (90–140 GHz), D-band (110–170 GHz) and J-band (220–325 GHz) were developed [26]. Works on creation of waveguides for higher frequencies are being carried out. For example, hollow metal-glass waveguide with the lowest attenuation of 0.95 dB/m for the frequency of 2.5 THz was developed [31].

BASIC REGISTRATION METHODS

Two basic approaches are used for detection of THz signals – direct detection and heterodyne detection (fig. 5). Schottky diodes (SD) and bolometers are the most frequently used as receiver. Direct detection (fig. 5a) is the most widespread method for measurement of amplitude or power of THz radiation, limit detection frequency of SD may reach 10 THz in case of using GaAs based materials and 1.5 THz in case of using 130 nm silicon CMOS technology. Heterodyne detection based on SD mixer and local oscillator (heterodyne) (fig. 5b) provides higher sensitivity and phase information on THz signal. Heterodyne detection schemes with heterodynes with THz signal generation by photonic methods are shown on fig. 5c and 5d. Advantage of the scheme in the fig. 5b is that THz heterodyne signal may be led by means of optical fiber, and receiver bandpass is increased due to possibilities of more diverse frequency change during signal generation by infrared semiconductor lasers [23]. In combination with photomixers heterodyne scheme (fig. 5r) provides the largest bandpass. Photoconductors, photoconductive antennas and photodiodes are the most frequently used as photomixers.

DEMONSTRATION OF WIRELESS THz COMMUNICATION SYSTEMS

For the first time wireless communication system with carrier frequency over 100 GHz was presented by NTT Company in 2000 [32]. This system presented a wireless line with carrier frequency of 120 GHz with generation and modulation of signals by means of photonics. Obtaining of unprecedented data transfer rate of 10 Gbit/s [14] led to development of



Смеситель субгармоник и умножитель на основе барьерных диодов Шоттки, Н-образный полосовой фильтр, антенна Кассегрейна и другие компоненты системы были разработаны для обеспечения высокоэффективной передачи и приема. Для достижения спектральной эффективности в 2.86 бит/с/Гц применялась 16-квадратурная амплитудная модуляция.

Активно ведутся разработки систем беспроводных коммуникаций в диапазоне частот 200–240 ГГц. В работе [37] сообщается о достижении скорости передачи в 100 Гбит/с на несущей частоте 237,5 ГГц, генерируемой при смешении двух поднесущих лазеров с синхронизацией мод с помощью UTC-фотодиода. Исследованы различные режимы модуляции: осуществлена передача со скоростью 50 Гбит/с при квадратурной фазовой модуляции; 75 Гбит/с при 8-фазовой модуляции; 50 Гбит/с при квадратурной амплитудной модуляции; 100 Гбит/с при 16-квадратурной фазовой модуляции. Дистанция передачи во всех случаях была равна 20 метрам. Прием осуществляется при помощи электронного одночипового преобразователя с понижением частоты на основе активной миллиметровой монолитной интегральной схемы. Тот же коллектив авторов впоследствии представил

electronic components for wireless communication systems and, consequently, fully electrical wireless CMOS-based system was developed, by means of which real time broadcasting of the Olympic Games in Beijing was carried out in 2008 [33]. After this, development of wireless THz communication systems was carried out quite fast: during next years, the results of experiments on data transfer at carrier frequencies of 75–110 GHz [16, 34, 35], 140 GHz [36], 200–240 GHz [37–38], 250–400 GHz [7, 29, 39–40, 42], 625 GHz [29–30] were published.

A number of scientific groups are engaged in development of wireless communication systems on the basis of photonics at frequency range of 75–110 GHz (W-range). Several such systems were demonstrated: for example, in publication [16] 100 Gbit/s hybrid wireless communication line based on optical heterodyne up-conversion 12.5 Gbit optical 16-CAM signal of basic band with polarization multiplexing at distances up to 120 cm. Further, this team offered data transfer system for W-range based on optical comb generator, by means of which simultaneous THz signal generation with bandwidth of 15 GHz on three channels with orthogonal frequency and special multiplex and data transfer rate of 8.3 Gbit at every channel [34].



систему передачи данных с применением от одной до трех несущих на частотах около 237 ГГц для однополяризационной передачи на расстояние от 20 до 40 метров со скоростями от 75 до 100 Гбит/с [38]. Узкополосные сигналы ТГц-несущей генерировались фотосмещением в UTC-фотодиоде двух высокостабильных линий лазера с синхронизацией мод. Электрический сигнал на выходе фотодиода излучался при помощи рупорной антенны, оснащенной линзами. Кроме принимающей рупорной антенны с линзой приемный модуль содержал монолитные интегрированные схемы со смесителями и усилителями. Ожидается, что такое синергетическое использование ТГц-фотоники и электроники, получившее название "тератоника", должно привести к беспроводной передаче в несколько терабит в секунду на расстояния более одного километра.

Диапазон 300–400 ГГц на данный момент представляется наиболее перспективным с точки зрения скоростей передачи данных. Авторами [39] описана работающая на расстоянии 0,5 м беспроводная система передачи со скоростью 14 Гбит/с на несущей частоте 300 ГГц. ТГц-сигнал генерируется гетеродинированием света от двух источников с перестраиваемой длиной волны излучения, а затем модулируется оптическим модулятором интенсивности на основе генератора импульсных кодов, после чего оптический сигнал конвертируется в электрический с помощью UTC-фотодиода и генерируется в открытое пространство рупорной антенной. В качестве приемника применяется барьерный диод Шоттки.

В статье [29] группа японских ученых сообщает о безошибочной передаче данных на несущей частоте 300 ГГц в режиме реального времени с максимальной скоростью передачи до 40 Гбит/с для одного канала и до 48 Гбит/с для канала с поляризационным уплотнением. Показано, что при повышении пропускной способности основной полосы частот схемы детектора возможно получить скорости 50 и 100 Гбит/с для данных каналов, соответственно. Также описана 600-ГГц система, показывающая, что несущая частота может быть удвоена для обеспечения более высокой скорости передачи данных. Наконец, для применения многоуровневых схем модуляции для передачи в режиме реального времени со скоростями выше 100 Гбит/с предложен фазостабилизированный передатчик на основе оптической частотной гребенки. Работа такой схемы проверена экспериментально на несущей частоте 100 ГГц.

В работе [40] продемонстрирована передача данных на несущей частоте 300 ГГц со скоростью 12,5

Generation of basic frequency band and receiving was carried out according to the method described in publication [16], and transmission distance reached 2 meters.

Another scientific team presented W-range data transfer system in which transducer and receiver are manufactured on the basis of pulsed radio architecture [35]. This system allowed reaching 10 Gbit/s data transfer rate in air, as well as in fiber.

In publication [36] wireless data transfer system at carrier frequency of 140 GHz with maximum data transfer rate of 10 Gbit/s at the distance of 1.5 km in non-real time mode was described. Subharmonic mixer and Schottky diode multiplier, H-type band filter, Cassergain antenna and other system components were developed in order to ensure highly efficient transmission and receiving. 16-quadrature amplitude modulation was used for obtaining spectral efficiency of 2.86 bit/s/Hz.

Developments of wireless communication systems for frequency range of 200–240 GHz are actively carried out. In publication [37] it is said about obtaining transfer rate of 100 Gbit/s with carrier frequency of 235.7 GHz, generated during mixing of two laser subcarriers with mode synchronization by means of UTC photodiode. Different modulation modes are studied; transfer with data transfer rate of 50 Gbit/s was made at quadrature phase modulation; 75 Gbit/s at 8-phase modulation; 50 Gbit/s at quadrature amplitude modulation; 100 Gbit/s at 16-quadrature phase modulation. Transfer distance in all cases was 20 meters. Receiving was carried out by means of electronic single chip converter with frequency lowering based on active millimeter monolithic integrated circuit. The same team of authors further presented data transfer system with the use of 1–3 carriers at frequencies of around 237 GHz for single polarization transfer for the distance of 20 to 40 meters at rates of 75 to 100 Gbit/s [38]. Narrow band signals of THz carrier were generated by photomixing in UTC photodiode of two highly stable laser lines with mod synchronization. Electrical signal at the photodiode output was emitted by means of cone antenna with lens, receiving module contained monolithic integrated circuits with mixers and amplifiers. It is anticipated that such synergistic use of THz photonics and electronics named teratronics should lead to wireless transfer of several Tbit/s at the distance over 1 km.

300–400 GHz range at this time is the most perspective regarding data transfer rate. In publication [39] wireless data transfer system



Гбит/с с помощью передатчика на основе технологий фотоники и приемного модуля на основе усовершенствованного барьерного диода Шоттки. Отмечается, что возможности данной системы не ограничиваются достигнутой скоростью передачи, дальнейшие усовершенствования позволят передавать данные со скоростью до 20 и более гигабит в секунду.

Среди новейших разработок в данном диапазоне частот можно отметить работу [41], авторы которой предложили систему передачи данных на частотах выше 250 ГГц с применением амплитудной модуляции на основе оснащенного волноводом UTC-фотодиода и барьерным диодом Шоттки с интегрированной антенной в качестве приемника. Была продемонстрирована безошибочная передача со скоростью 24 Гбит/с на несущей частоте 300 ГГц на расстояние около 50 см. Кроме того, данным коллективом разработан приемник на основе монолитной интегральной схемы микроволнового диапазона с применением современной InP технологии биполярного транзистора на гетеропереходе. Для компактности устройства антенна, радиочастотный усилитель, амплитудный детектор и усилитель были полностью интегрированы на один чип. Помимо этого для дальнейшего увеличения

working at the rate of 14 Gbit/s at carried frequency of 300 GHz at the distance of 0.5 m is described. THz signal is generated by heterodyning of light from two sources with changeable wavelength, and then modulated with optical intensity modulator based on pulsed code generator; after that optical signal is converted to electrical one by means of UTC photodiode and generated to open space by cone antenna. Schottka diode is used as receiver.

In the article [29] a team of Japanese scientists informed of accurate transfer at carrier frequency of 300 GHz in real time mode with maximum data transfer rate up to 40 Gbit/s for one channel and up to 48 Gbit/s for channel with polarization multiplexing. It is shown that during increase of capacity of basic frequency of detector scheme it is possible to obtain data transfer rates of 50 Gbit/s and 100 Gbit/s for these channels correspondingly. Also 600 GHz system showing that carrying frequency may be doubled for providing higher data transfer rate was described. Finally, for the use of multilevel modulation schemes for transfer in real time mode at rates over 100 Gbit/s phase stabilized transducer based on optical frequency comb was presented. Operation of such scheme was tested experimentally at carrier frequency of 100 GHz.



скорости передачи данных коллектив разрабатывает ТГц-трансивер, оперирующий на частоте 300 ГГц, на основе монолитной интегральной схемы микроволнового диапазона с многоуровневой модуляцией.

В недавней работе [42] описывается линия связи со скоростью передачи 3 Гбит/с на основе квадратурной амплитудной модуляции высокого порядка (16-QAM) и с несущей частотой 0,34 ТГц для будущих локальных беспроводных сетей. В данной системе используются гетеродинные трансиверы и техника параллельной цифровой обработки данных. При помощи двух специально разработанных антенн Кассегрейна была достигнута дистанция передачи в 50 метров. Кроме того, представлен прототип локальной беспроводной сети на частоте 0,34 ТГц на основе протокола IEEE 802.11 со скоростью передачи данных в 6,536 Мбит/с на расстоянии в 1,15 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Терагерцевые коммуникации являются наиболее перспективной технологией для осуществления беспроводных локальных сетей связи в свете растущих требований к скорости передачи информации. Во многих странах ведутся работы по стандартизации и регуляции терагерцевой полосы частот [6], в то время как в Японии в 2014 году уже официально выделили полосу частот на 120 ГГц для беспроводной линии связи [43].

Будущее терагерцевых систем связи, несомненно, напрямую связано с развитием фотоники. Перспективной является интеграция фотонных и электронных устройств с использованием современных технологий изготовления, таких как кремниевая фотоника, для создания компактных и экономически эффективных ТГц-трансиверов. Уже начата разработка ТГц-усилителей мощности и предусилителей для передатчиков и приемников на основе кремниевой технологии. К примеру, недавно был разработан первый миниатюрный усилитель, работающий на частотах 1 ТГц и 1,3 ТГц с усилением в 10 и 9 Дб, соответственно [44].

За счет величины доступной полосы частот в ТГц-диапазоне даже на основе простейших методов модуляции получена скорость передачи данных в несколько десятков гигабит в секунду. В ближайшем будущем рост скорости передачи данных в беспроводных линиях связан с применением сложных многоуровневых систем модуляции и различных методов уплотнения. На сегодняшний день уже существуют прототипы беспроводных терагерцевых систем коммуникации, рекордная

In publication [40] data transfer at carrying frequency of 300 GHz with rate of 12.5 Gbit/s by means of transducer based on photonics and receiver module based on enhanced Schottky diode was demonstrated. It is noted that possibilities of such system are not limited to obtained data transfer rate, further enhancements will allow transferring data at the rate up to 20 and more Gbit/s.

Among the newest developments in this frequency range one may name publication [41], where authors offered data transfer system for frequencies over 250 GHz with the use of amplitude modulation based on UTC-photodiode equipped with waveguide and Schottky diode with integrated antenna as a receiver. Error-free transmission at the rate of 24 Gbit/s at carrier frequency of 300 GHz at the distance of around 50 cm was demonstrated. Besides that, this team developed receiver on the basis of monolithic integral circuit of microwave range with state-of-the-art InP technology of bipolar transistor at heterojunction. For compactness of the device antenna, radiofrequency amplifier, amplitude detector and amplifier were integrated in one chip. Besides that, for further increase of data transfer rate this team is working on THz transceiver operating at 300 GHz frequency based on monolithic integral circuit of microwave range with multilevel modulation.

In recent publication [42] communication line with data transfer rate of 3 Gbit/s based on high level quadrature amplitude modulation (16-QAM) with carrier frequency of 0.34 THz for future local wireless networks is described. In this system heterodyne transceivers and parallel digital data process system is used. By means of two specially developed antennas it was possible to obtain transfer distance of 50 meters. Besides that, prototype of local wireless network at 0.34 THz frequency based on IEEE 802.11 protocol with data transfer rate of 6.536 Mbit/s at the distance of 1.15 m was presented.

CONCLUSION

Terahertz communications are the most perspective technology for realization of wireless local communication networks taking into consideration growing requirements for data transfer rate. In many countries works on standardization and regulation of terahertz frequency band are carried out [6]; meanwhile, in Japan, in 2014 frequency range of 120 GHz



скорость передачи данных в которых достигает 100 Гбит/с.

Дальнейший рост скорости передаваемой в беспроводных сетях информации связан с применением импульсной ТГц-оптики. К примеру, разработан прототип установки для передачи данных с применением импульсного ТГц-источника со спектром импульса от 0,1 до 1 ТГц [45]. Кодирование информации в спектре каждого широкополосного ТГц-импульса так же, как и в последовательности импульсов, производилось по оригинальной методике, описанной в работе [46]. Кроме того, имеется возможность увеличения спектра передаваемого импульса до значения 0,1-10 ТГц, что позволит увеличить скорость передачи данных до 100 Тбит/с в локальных беспроводных сетях и системах спутниковой связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.ntt.co.jp/news2012/1209e/120920a.html#a1> – World Record One Petabit per Second Fiber Transmission over 50-km: Equivalent to Sending 5,000 HDTV Videos per Second over a Single Fiber.
2. **Cherry, S.** Edholm's law of bandwidth. – IEEE Spectr., 2004, v.41, p.50.
3. **Kleine-Ostmann T., Nagatsuma T.** A review on terahertz communications research. – J.Infrared Millim. Terahertz Waves, 2011, v. 32, p. 143-171.
4. **Kürner T.** Towards future THz communications systems. – Terahertz Science and Technology, 2012, v.5, № .1, p. 11-17.
5. **Curran K., Millar A., Conor Mc Garvey.** Near Field Communication. – International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 2012, № .3 (2), p. 371-382.
6. **Kürner Th., Priebe S.** Towards THz Communications – Status in Research, Standardization and Regulation. – Journal Infrared MilliTerahz Waves, 2013.
7. **O'Brien D. C., Faulkner G.E., Zyambo E.B. et al.**

was already officially assigned for wireless communication line [43].

The future of terahertz communication systems is without any doubt directly connected with development of photonics. Integration of photonic and electronic devices with the use of modern manufacturing technologies such as silicone photonics for creation of compact and economically efficient THz transceivers is perspective. Recently, development of THz power amplifiers and preliminary amplifiers for transducers and receivers based on silicone technology has started. For example, recently, the first mini-amplifier operating at 1 THz and 1.3 THz frequencies with amplification in 10 and 9 dB correspondingly was developed [44].

Due to the size of available frequency band in THz range, even on the basis of the simplest modulation methods, data transfer rate of several dozens of Gbit/s was obtained. In the nearest future increase of data transfer rate in wireless networks is connected with the use of complex multilevel modulation systems and different methods of multiplexing. Nowadays, prototypes of wireless terahertz communication systems already exist; record data transfer rate of such systems is 100 Gbit/s.

Further increase of data transfer rate in wireless networks is connected with the use of pulsed THz optics. For example, prototype of installation for data transfer with the use of pulsed THz source with pulse spectrum of 0.1 to 1 THz was developed [45]. Information coding in the spectrum of every wideband THz pulse, as well as pulse sequence was carried out by means of original method described in publication [46]. Besides that, it is possible to increase transmitted pulse spectrum up to 0.1-10 THz which will allow increasing data transfer rate up to 100 Tbit/s in local wireless networks and satellite communication systems.



- High-speed integrated transceivers for optical wireless. – IEEE Communications Magazine, 2003, v. 41, p. 58–62.
8. **Wolf M. and Kress D.** Short-Range Wireless Infrared Transmission: The Link budget compared to RF. – IEEE Wireless Communications, 2003, v. 10, p. 8–14.
 9. **Moeller L., Su Ke, Barat R.B., Federici J.F.** THz and IR Signaling through Fog Scintillations. – European Wireless 2012, April 18–20, 2012, Poznan, Poland.
 10. **Ke Su, Moeller L., Barat R.B., and Federici J.F.** Experimental comparison of performance degradation from terahertz and infrared wireless links in fog. – J.Opt. Soc. Am. A, 2012, v. 29, № 2, p. 179–184.
 11. **Piesiewicz R., Jansen C., Mittleman D. et al.** Scattering Analysis for the Modeling of THz Communication Systems. – IEEE Transactions On Antennas And Propagation, 2007, v. 55, № 11, p. 3002–3009.
 12. **Mandehgar M., Yang Y., and Grischkowsky D.** Atmosphere characterization for simulation of the two optimal wireless terahertz digital communication links. – Optics Letters, 2013, v. 38, № 17, p. 3437–3440.
 13. **Tonouchi M.** Cutting-edge terahertz technology. – Nature Photon. 2007, v. 1, p. 97–105.
 14. **Hirata A., Takahashi H., Yamaguchi R. et al.** Transmission Characteristics of 120-GHz-Band Wireless Link Using Radio-on-Fiber Technologies. – Journal of Lightwave Technology, 2008, v. 26, № 15, p. 2338–44.
 15. **Federici J. and Moeller L.** Review of terahertz and subterahertz wireless communications. – Journal of Applied Physics, 2010, v. 107, № 11, p. 111101.
 16. **Pang X., Caballero A., Dogadaev A., et al.** 100 Gbit/s hybrid optical fiber-wireless link in the W-band (75–110 GHz) – Optics Express, 2011, v. 19, №. 25, p. 24944–49.
 17. **Jacob M., Priebe S., Dickhoff R. et al.** Diffraction in mm and Sub-mm Wave Indoor Propagation Channels. – IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, 2012, v. 60, № 3, p. 833–844.
 18. **Deng L., Beltrán M., Pang X. et al.** Fiber Wireless Transmission of 8.3 Gb/s/ch QPSK-OFDM Signals in 75–110 GHz Band. – IEEE Photonics Technology Letters, 2012, v. 24, № 5.
 19. **Nagatsuma T., Horiguchi Sh., Minamikata Y. et al.** Terahertz wireless communications based on photonics technologies. – OSA Optics Express, 2013, v. 21, №. 20, p. 23736–47.
 20. **Bespalov V.G.** Superbroad-band pulsed radiation in the terahertz region of the spectrum: production and application. – Journal of Optical Technology, 2006, v. 73, № 11, p. 764–771.
 21. **Shams H., Fice M.J., Balakier K. et al.** Photonic generation for multichannel THz wireless communication. – OSA, 2014, v. 22, №. 19.
 22. **Nagatsuma T.** Photonic Generation of Extreme Broadband RF Signals for Communications and Sensing. – IEEE, 2013.
 23. **Nagatsuma T.** Terahertz technologies: present and future. – IEICE Electronics Express, 2011, v. 8, № 14, p. 1127–42.
 24. **Ishibashi T., Shimizu N., Kodama S. et al.** Uni-traveling-carrier photodiodes. – Ultrafast Electronics and Optoelectronics, Tech. Digest, Lake Tahoe, USA (1997), p. 83–87.
 25. **Nguyen T.K., Kim S., Rotermund F. and Park I.** Design of a wideband continuous-wave photomixer antenna for terahertz wireless communication systems. – Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2014, v. 28, № 8, 976–988.
 26. **Stöhr A., Babielski S., Cannard P.J. et al.** Millimeter-Wave Photonic Components for Broadband Wireless Systems. – 2010, IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, v. 58, № 11, p. 3071–82
 27. **Preußler S., Wenzel N., Braun R. – P., Owschimikow N. et al.** Generation of ultra-narrow, stable and tunable millimeter- and terahertz- waves with very low phase noise. – OSA, 2013, v. 21, № 20, p. 23950–62.
 28. **Nagatsuma T., Ito H., Ishibashi T.** High-power RF photodiodes and their applications. – Laser Photonics Rev., 2009, v. 3, № 1–2, p. 123–137.
 29. **Tadao Nagatsuma.** 300-GHz-band Wireless Communications with High-power Photonic Sources. – IEEE, 2014.
 30. **L. Moeller, J.Federici, Ke Su.** THz Wireless Communications: 2.5 Gb/s Error-free Transmission at 625 GHz using a Narrow-bandwidth 1 mW THz Source. – IEEE, 2011.
 31. **Bowden B., Harrington J.A., Mitrofanov O.** Fabrication of terahertz hollow-glass metallic waveguides with inner dielectric coatings. – J. of Applied Physics, 2008, v. 104, p. 093110.
 32. **Nagatsuma T., Hirata A., Royter Y. et al.** BA 120-GHz integrated photonic transmitter. – Proc. Int. Top. Meet. MWP, Sep. 2000, p. 225–228.
 33. **Hirata A., Kosugi T., Takahashi H. et al.** 120-GHz-band wireless link technologies for outdoor 10-Gbit/s data transmission. – IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2012, v. 60, no. 3, p. 881–895.
 34. **Deng L., Beltrán M., Pang X. et al.** Fiber Wireless Transmission of 8.3 Gb/s/ch QPSK-OFDM Signals in



- 75–110 GHz Band. – IEEE Photonics Technology Letters, 2012, v. 24, № 5.
35. **Y. Nakasha, M. Sato, T. Tajima et al.** W-band Transmitter and Receiver for 10-Gb/s Impulse Radio With an Optical-Fiber Interface. – IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009, v. 57, № 12, p. 3171–3180.
 36. **Wang Ch., Lin Ch., Chen Qi. 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, v. 61, № 7, p. 2737–46.
 37. **Koenig S., Boes F., Lopez-Diaz D. et al.** 100 Gbit/s Wireless Link with mm-Wave Photonics. OFC/NFOEC Postdeadline Papers, 2013.
 38. **Freude W., Koenig S., Lopez-Diaz D. et al.** Wireless Communications on THz Carriers Takes Shape. – IEEE ICTON, 2014.
 39. **Nagatsuma T., Takada T., Song H.-J. et al.** Millimeter- and THz-wave photonics toward 100 Gbps wireless transmission. – 23rd Photonics Society Annual Meeting, Denver, CO, USA, 2010.
 40. **Ho-Jin Song, Ajito K., Wakatsuki A. et al.** Terahertz Wireless Communication Link at 300 GHz. – IEEE, 2010.
 41. **Ho-Jin Song, Tajima T., Yaita M., Kagami O.** Recent Progress on Terahertz Communications at 300 GHz for Practical Short-Range Applications. – IEEE General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS), 2014, p. 1–3.
 42. **Wang Ch., Lu B., Lin Ch. et al.** 0.34 – THz Wireless Link Based on High – Order Modulation for Future Wireless Local Area Network Applications. – IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2014, v. 4, № 1, p. 75–85.
 43. **Tadao Nagatsuma.** Breakthroughs in Photonics 2013: THz Communications Based on Photonics. – IEEE Photonics Journal, 2014, v. 6, № 2.
 44. http://spectrum.ieee.org/tech-talk/telecom/wireless/darpa-builds-first-terahertz-amplifier?utm_source=feedburner&utm_medium=feed&utm_campaign=Feed%3A+IeeeSpectrum+%28IEEE+Spectrum%29 – Neil Savage, First Terahertz Amplifier "Goes to 11", IEEE Spectr. 2014.
 45. **Kozlov S., Grachev Ya., Liu X. et al.** Data spectral encoding method with pulsed terahertz sources. – 2015 EMN/Optoelectronics Meeting at Beijing, China April – Invited.
 46. **Tsyppkin A., Putilin S., Mel'nik M. et al.** The transmission of 45 bits of information by a pair of interfering femtosecond pulses with superwide spectra. – J. Opt. Technol., 2013, v. 80, p. 466.