

## ТЕРАГЕРЦЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ для телекоммуникаций

В. Семенова, аспирант НИУ ИТМО,  
В. Беспалов, д.ф-м.н., профессор НИУ ИТМО

Наиболее перспективным подходом для создания высокоскоростных беспроводных сетей с повышенной пропускной способностью представляются 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 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

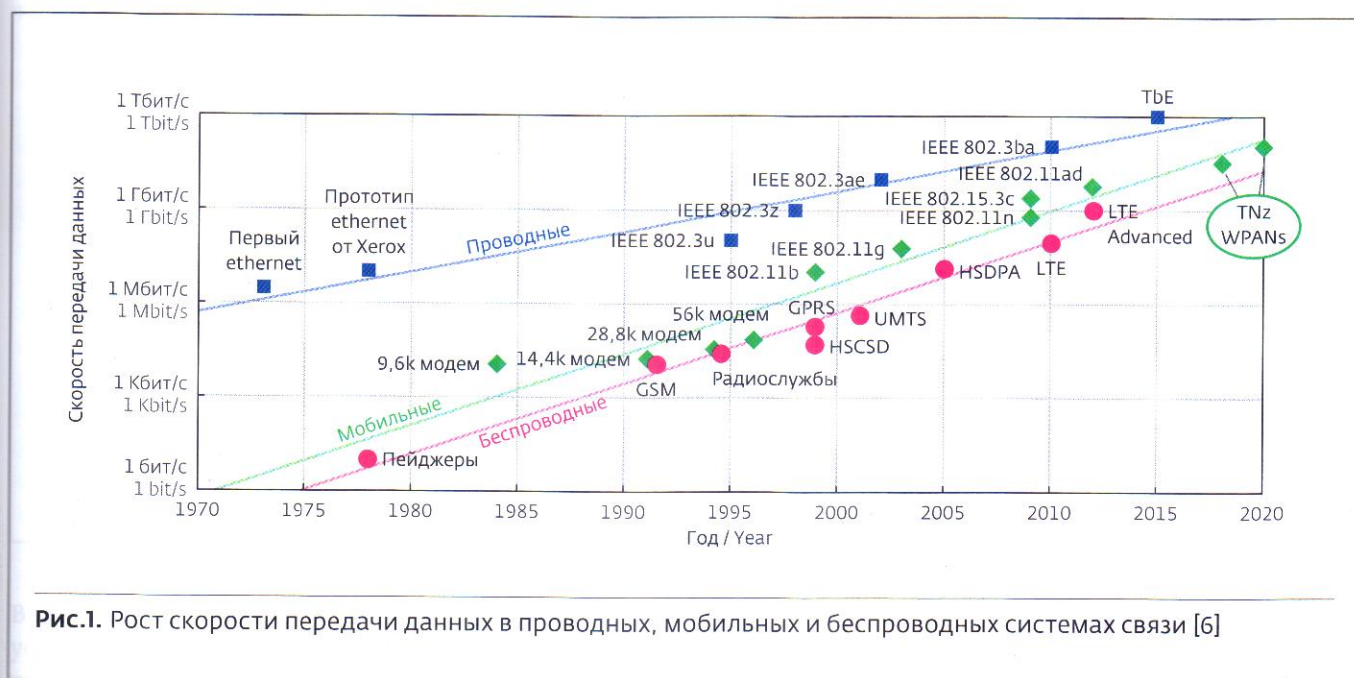


Рис.1. Рост скорости передачи данных в проводных, мобильных и беспроводных системах связи [6]

скорости передачи данных в десятки гигабит в секунду [13, 14]. Еще одно преимущество ТГц-линий связи заключается 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

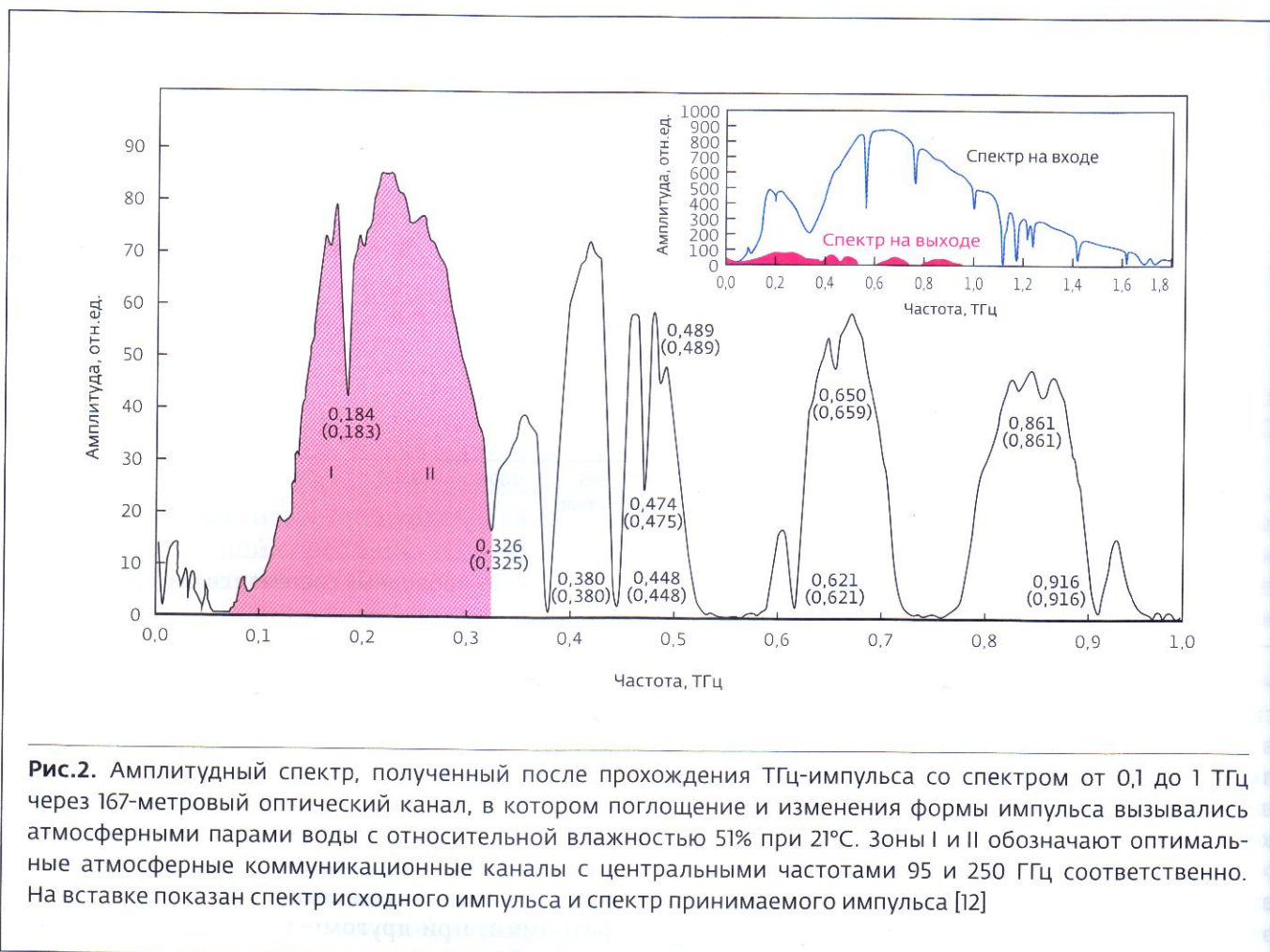
ТГц-системы беспроводной связи подразделяются на оптические, электронные и гибридные, в зависимости от используемых компонентов. Наибольшее распространение к данному моменту получили именно гибридные (смешанные) системы, поскольку на данном этапе развития фотоники и электроники именно сочетание электронных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

#### 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



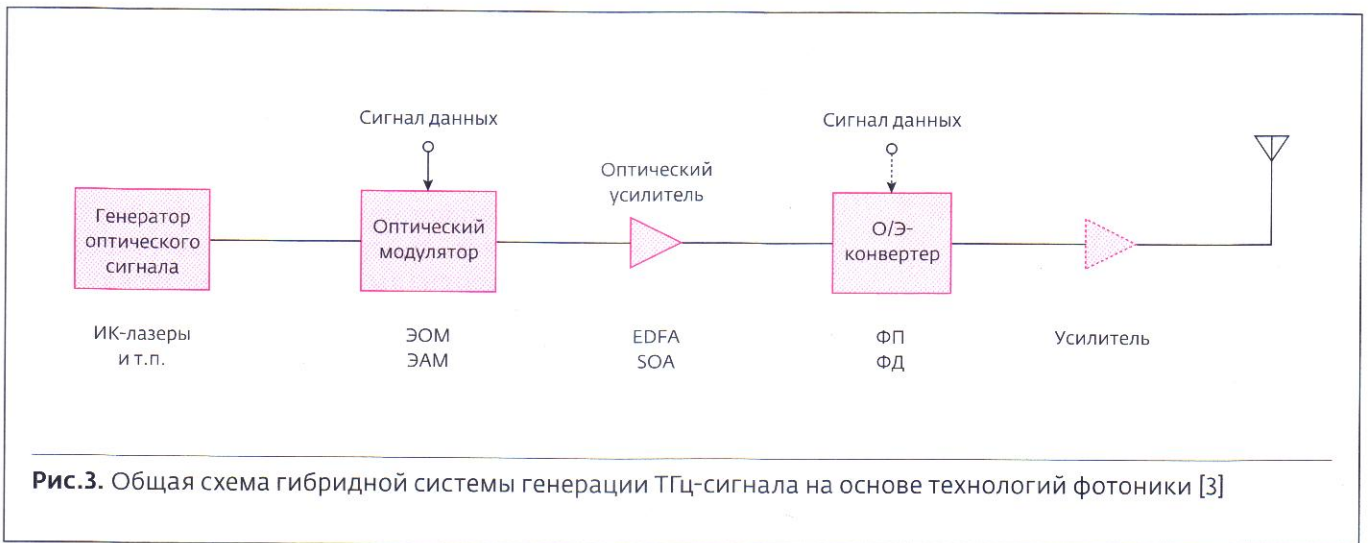
**Рис.2.** Амплитудный спектр, полученный после прохождения ТГц-импульса со спектром от 0,1 до 1 ТГц через 167-метровый оптический канал, в котором поглощение и изменения формы импульса вызывались атмосферными парами воды с относительной влажностью 51% при 21°С. Зоны I и II обозначают оптимальные атмосферные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

перестройки и стабильности, и может применяться для достижения скоростей передачи данных до 10 Гбит/с и более, поскольку доступны телекоммуникационные 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 (фотосмешение) 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.

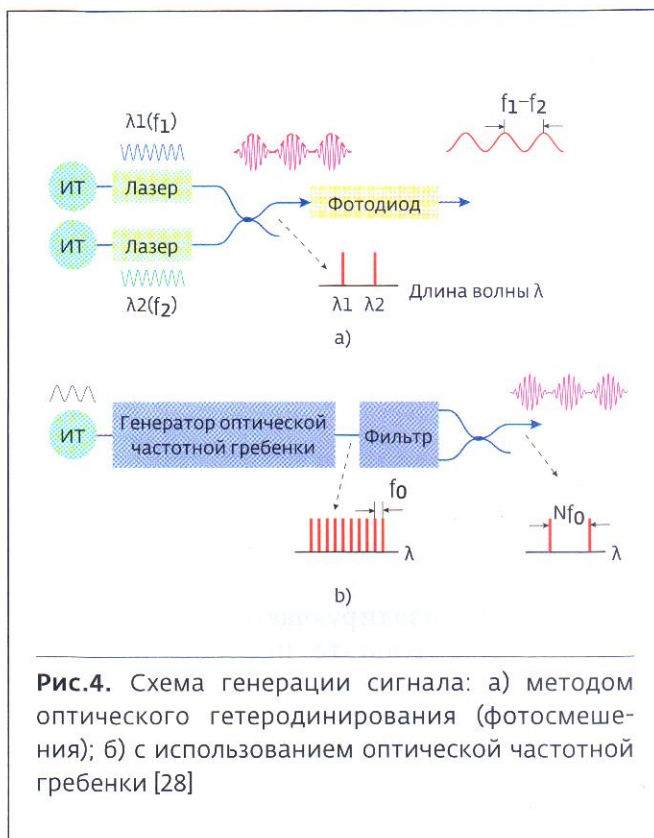


В некоторых случаях за фотодиодом помещают усилитель мощности и/или частотный умножитель, если только данные электронные устройства доступны на нужных частотах. В качестве генератора оптического сигнала чаще всего применяются ИК-полупроводниковые лазеры, поэтому неотъемлемой частью таких схем являются надежные и экономически выгодные телекоммуникационные компоненты: оптическое волокно, эрбиевые волоконные усилители и полупроводниковые лазерные усилители. Для модуляции ТГц-сигналом эффективно применяется управление напряжением смещения конвертера [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 фотосмешения [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 фотосмешения поляризация, частоты и фазы вводимых оптических пучков должны быть постоянными, поэтому необходимо вводить в схему системы фазовой синхронизации. Таким образом, применение оптических смесителей для ТГц-генерации имеет ряд преимуществ – они



**Рис.4.** Схема генерации сигнала: а) методом оптического гетеродина (фотосмешения); б) с использованием оптической частотной гребенки [28]

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].

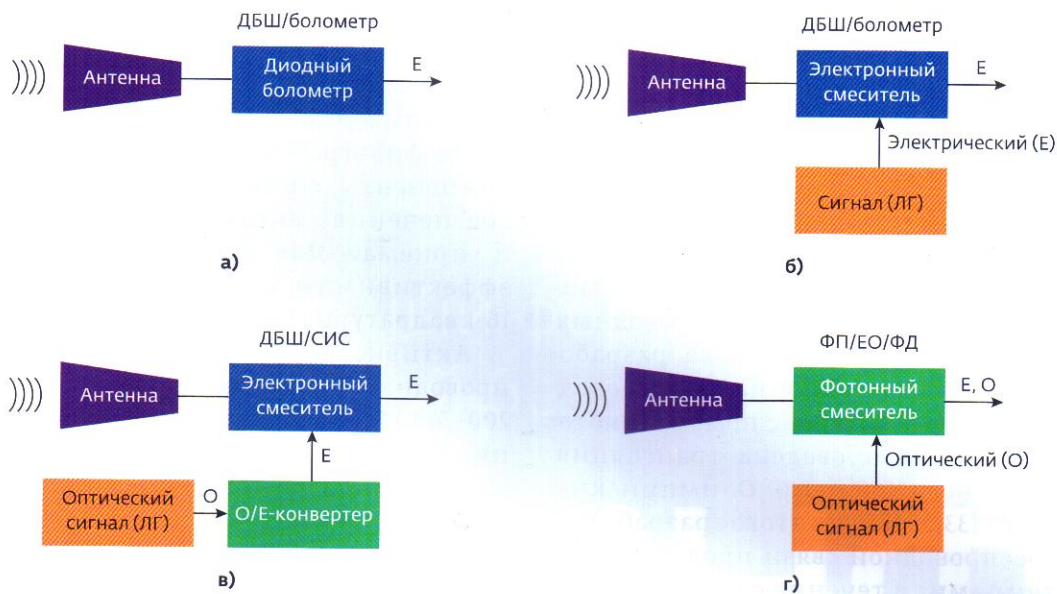
На рис.4б показана другая гетеродинная техника генерации ТГц-излучения, которая позволяет получать сигналы с низким фазовым

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 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



**Рис.5.** Схема детектирования: а) прямого детектирования ТГц-сигнала; б) гетеродинное детектирование на основе ДБШ смесителя и гетеродина; в) и г) гетеродинного детектирования с гетеродинами на основе оптической генерации ТГц-сигнала [23]

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 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 рис.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.

## ДЕМОНСТРАЦИИ СИСТЕМ БЕСПРОВОДНОЙ ТГц-СВЯЗИ

Впервые ТГц-беспроводная система связи с несущей частотой более 100 ГГц была представлена в 2000 году японской компанией NTT [32]. Система представляла собой беспроводную линию с несущей частотой 120 ГГц, в которой генерация и модуляция сигналов осуществлялись 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 Пекине [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. Смеситель субгармоники умножительно на основе барьерных диодов Шоттки, H-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 восьмифазовой модуляции; 50 Гбит/с при квадратурной амплитудной модуляции; 100 Гбит/с при 16-квадратурной фазовой модуляции. Дистанция передачи во всех случаях была равна 20 м. Прием осуществляется при помощи электронного одночипового преобразователя с понижением частоты на основе активной миллиметровой монолитной интегральной схемы. Тот же коллектив авторов впоследствии представил систему передачи данных с применением от одной до трех несущих на частотах около 237 ГГц для однополяризационной передачи на расстояние от 20 до 40 м 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 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 бит/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 скорости передачи данный 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 м. 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 расстояние 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 сетях будет обусловлен применением сложных многоуровневых систем модуляции и различных методов уплотнения. На сегодняшний день уже существуют прототипы беспроводных терагерцевых систем коммуникации, рекордная скорость передачи данных в которых достигает 100 Гбит/с.

Дальнейший рост скорости передаваемой в беспроводных сетях информации будет обеспечен 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

- World Record One Petabit per Second Fiber Transmission over 50-km: Equivalent to Sending 5,000 HDTV Videos per Second over a Single Fiber. [Электронный ресурс]. URL:<http://www.ntt.co.jp/news/2012/1209e/120920a.html#a1>.
- Cherry S. Edholm's law of bandwidth // IEEE Spectr. 2004. V. 41. P. 50.
- Kleine-Ostmann T., Nagatsuma T. A review on terahertz communications research // J.Infrared Millim. Terahertz Waves. 2011. V. 32. P. 143-171.
- Kürner T. Towards future THz communications systems // Terahertz Science and Technology. 2012. V. 5. № 1. P. 11-17.
- Curran K., Millar A., Conor Mc Garvey. Near Field Communication // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2012. № 3 (2). P. 371-382.
- Kürner Th., Priebe S. Towards THz Communications - Status in Research, Standardization and Regulation // Journal Infrared MilliTerahz Waves, 2013.
- O'Brien D. C., Faulkner G.E., Zyambo E.B. et al. High-speed integrated transceivers for optical wireless // IEEE Communications Magazine. 2003. V. 41. P. 58-62.
- 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.
- Moeller L., Su Ke, Barat R.B., Federici J.F. THz and IR Signaling through Fog Scintillations. - European Wireless. Poznan, Poland, 18-20 April 2012.
- 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.
- 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.
- 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.
- Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology // Nature Photon. 2007. V. 1. P. 97-105.
- 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.
- Federici J. and Moeller L. Review of terahertz and subterahertz wireless communications // Journal of Applied Physics. 2010. V. 107. № 11. P. 111101.
- 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.
- 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.
- 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.
- Nogatsuma T., Horiguchi Sh., Minamikata Y. et al. Terahertz wireless communications based on photonics technologies // OSA Optics Express. 2013. V. 21. № 20. P. 23736-47.
- 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. P. 976-988.
  26. **Stöhr A., Babielski S., Cannard P.J.** et al. Millimeter-Wave Photonic Components for Broadband Wireless Systems // IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES. 2010. V. 58. № 11. P. 3071-82
  27. **Preußler S., Wenzel N., Braun R.-P., Owschmikow 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. **Moeller L., Federici J., Su Ke.** 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-Cbit/s data transmission // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2012. V. 60. № 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. **Nakasha Y., Sato M., Tajima T.** 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](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. **Tsympkin 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.