

УДК 621.39

М.Е. Ильченко, д-р техн. наук, Т.Н. Нарытник, канд. тех. наук, Б.Н. Шелковников, канд. тех. наук, В.И. Христенко

## Радиотелекоммуникационные системы терагерцового диапазона

В статье рассматриваются состояние и преимущества использования радиотелекоммуникационных систем терагерцового диапазона (от 100 ГГц до 3000 ГГц), сферы использования таких технологий, проблемы и возможные методы их решения. Частотный ресурс используемого в настоящее время радиодиапазона физически не способен передавать сверх- и высокоскоростные потоки данных по радиоканалу. Применение многопозиционных модуляций для увеличения скорости несет ограниченный характер, тогда как применение более высоких частот позволяет использовать более широкую полосу для передачи гигабитовых потоков. Такой подход имеет много преимуществ, такие как конфиденциальность передачи данных и узконаправленность радиоизлучения. В статье также рассматриваются примеры существующих систем и их особенности с использованием современных радиотехнологий CMOS, а также полупроводниковых материалов SiGe и GaAs, InP.

**Advantages of use of a radio channel in a terahertz range, sphere of use of such technologies, problems and possible methods of their elimination are considered in this article. The existing frequency resource physically isn't capable to transfer multigigabit data torrents via a radio channel. Application of multilevel modulations for increase in speed bears the limited character whereas application of higher frequencies allows using wider strip for transferring multigigabit streams. Such approach has many advantages, such as confidentiality of data transmission, a narrow beam. Examples of existing systems and their lacks by use of technologies CMOS, as well as materials SiGe, GaAs and InP are considered in the article.**

**Ключевые слова:** терагерцовый диапазон, радиоканал, радиотелекоммуникационная система, гигабитовый поток, полупроводниковые технологии

### Введение

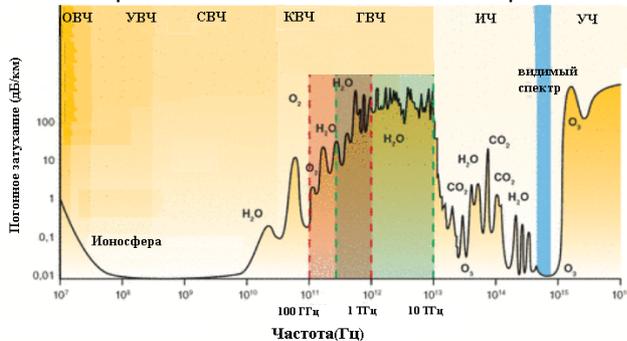
На сегодняшний день скорости локальных вычислительных сетей (LAN) достигли отметки 100 Гб/с и 40 Гб/с (100G и 40G Ethernet соответственно), а используется (в частности в Укра-

ине) на данный момент 10G Ethernet. Телевидение высокой четкости и сверхвысокой четкости требует цифровой канал 1,5 Гб/с и 6 Гб/с соответственно без схем сжатия, которые принципиально замедляют систему, что в свою очередь делает невозможным передачу HDTV сигнала в реальном времени. Поэтому стандарты 10G Ethernet и выше отлично подходят для передачи такого рода трафика. Такая тенденция ведет к необходимости создания цифровых беспроводных систем, способных напрямую соединяться с 10G системами. Такой соединении может оказаться выгодным решением для многих приложений. Однако существующие системы и частотный ресурс физически не способны пропускать такие потоки по воздуху. Решением этой дилеммы может быть использование более многопозиционных модуляций, что имеет ограниченное применение. Однако более эффективным способом является использование более высоких частот с простой схемой модуляции (например, ASK). В данной статье рассматриваются некоторые примеры таких систем, работающих на частотах выше 100 ГГц. На данный момент также уже существуют системы, работающие на частотах 70 ГГц и 80 ГГц [1], которые позволяют передавать гигабитовые потоки. Эти системы планируется применяться в технологии WiMax в городских условиях, а также как запасной канал в случае обрыва оптической наземной линии. Миллиметровый диапазон волн продолжает привлекать исследователей, поскольку, в частности, полосы свыше 100 ГГц являются не лицензированными, и позволяют передавать разнообразный трафик в одном потоке. Еще одним примером могут являться системы, работающие на частотах около 60 ГГц. Развитие технологий CMOS (Complementary-symmetry/metal-oxide-semiconductor или КМОП - комплементарная логика на транзисторах металл-оксид-полупроводник) позволило разработать приемопередатчики размером до 90 нанометров, способные передавать цифровые потоки скоростью до 15 Гб/с на расстояние в несколько метров с использованием модуляции QPSK и 16-QAM. Более того использование таких частот позволяет размещать на одной территории огромное множество станций без взаимной интерференции и каких либо влияний. Получаемый луч оказывается узконаправлен-

ным, что позволяет передавать информацию с высокой степенью конфиденциальности и безопасности, такой луч не подвержен эффекту дифракции. Наряду с преимуществами, волны миллиметрового диапазона претерпевают сильные затухания в воздухе, что существенно ограничивает дальность действия таких систем. Более того, прямая видимость должна быть обеспечена при любых погодных условиях, так как требуется точная установка антенны, ее наведение и поддержание узконаправленного (0,1-0,4 град) луча антенны, поскольку колебания антенны также существенно влияют на параметры передачи.

Беспроводные системы короткого радиуса действия сейчас находятся на стадии исследования рабочей группы IEEE 802.15 TG3c (Working Group for Wireless Personal Area Networks, Task Group 3c), которая также занимается передачей несжатого видео HDTV на мобильные устройства и персональные компьютеры. Рабочая группа IEEE 802.15 TG3c начала свою работу в марте 2008 года с обсуждения использования частот не только до 300 ГГц, но и несколько ТГц в системах анализа состава различных веществ.

На рис. 1 изображена зависимость величины затухания электромагнитной волны в свободном пространстве от частоты. Как видно, частоты вплоть до 150 ГГц могут быть использованы для связи на расстоянии в несколько километров.

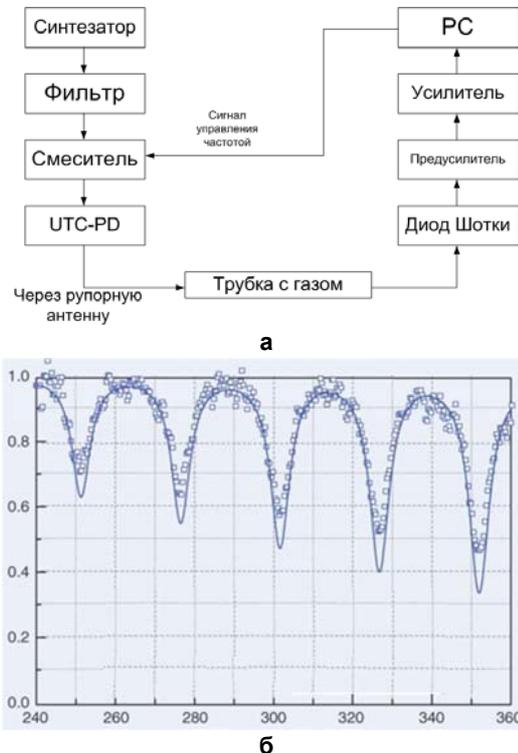


**Рис. 1.** Зависимость атмосферного затухания электромагнитных волн от частоты  
**ОВЧ** – очень высокие частоты, **УВЧ** – ультравысокие частоты, **СВЧ** – сверхвысокие частоты, **КВЧ** – крайне высокие частоты, **ГВЧ** – гипервысокие частоты, **ИЧ** – инфракрасные частоты, **УЧ** – ультрафиолетовые частоты.

### 1. Возможные области применения терагерцового диапазона

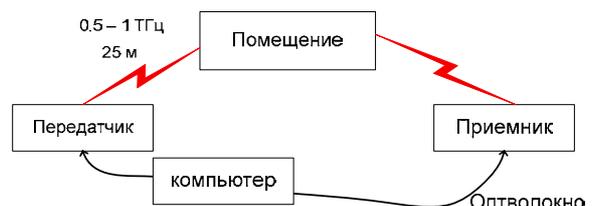
Системы, работающие на частотах свыше 100 ГГц могут найти применения в многих отраслях. Так, военные (США) всерьез занялись разработкой таких систем (в частности элементной базы). Всем известна система GPS. Но, как известно она

не способна точно определять местоположение объекта, а также фотографировать землю с «хорошим расширением». Если посмотреть на фотографии, полученные из спутников – они выглядят уныло и некачественно. А теперь можно представить фотографии, имеющие качество сравнимое с качеством картинки на экране телевизора. Этого можно достичь, используя диапазон миллиметровых волн или даже терагерц [1]. Также, широкое применение ожидается в сфере анализа веществ. Известно, что волны на таких частотах сильно затухают в любых веществах (в воздухе, бетоне, газах, воде). Это свойство можно использовать для анализа состава вещества. Как пример, на рисунке 2 изображена система анализа газовой трубки с газом N<sub>2</sub>O и N<sub>2</sub> с отношением 3:1, а также экспериментальный (точками) и теоретический результаты.



**Рис. 2.** Экспериментальная установка для анализа газа (а) и сравнение теоретических и практических результатов (б). Здесь UTC – PD – фотодиод с одним носителем заряда, PC – компьютер

На рисунке 3 изображена схема сенсорного анализа вредных веществ в помещении любого типа.



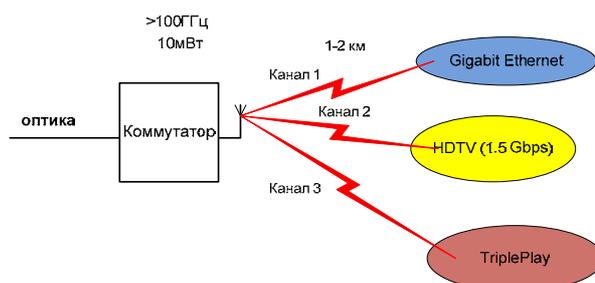
**Рис. 3.** Система анализа веществ в помещении

Широкое применение миллиметровые технологии ожидается в системах получения изображения различного характера (анализ работы сердца человека и других частей тела, в системах безопасности (рис. 4), приборов ночного видения и приборов видения при тумане). Примером системы для получения движущегося изображение является работа [5] в диапазоне 80-160 ГГц. В работе использовались CMOS технологии на силиконовой основе. В результате чего все функциональные узлы были интегрированы на чипе размером 0,16 мм<sup>2</sup>. В дальнейшем ожидается дальнейшая миниатюризация с использование 22-нм CMOS технологий на основе SiGe и InP гетеропереходов, способных работать на частотах свыше 200 ГГц. Следует заметить, что принципы, использованные в работе, могут быть также использованы и в системах передачи данных.

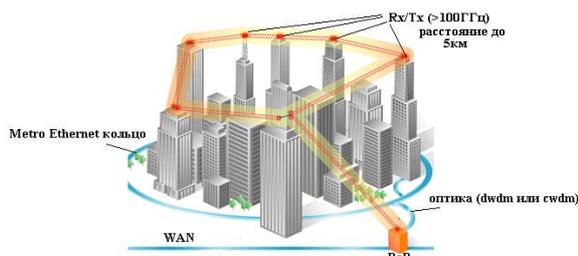


**Рис. 4. Применение миллиметрового и терагерцового диапазона в системах безопасности**

Весьма перспективной представляется разработка в терагерцовом диапазоне телекоммуникационных систем широкополосного радиодоступа, общий принцип построения которых представлен на рис. 5. Здесь коммутатором может быть обычный Ethernet свитч со встроенным небольшим модулем беспроводной связи. На рисунке 6 изображен возможный вариант применений данных технологий в городских условиях на магистральных сетях, как запасные каналы для наземных оптических линий.



**Рис. 5. Применение миллиметровых волн на «последней мили»**



**Рис. 6. Применение миллиметровых волн на магистральных сетях**

**2. Беспроводные цифровые системы терагерцового диапазона**

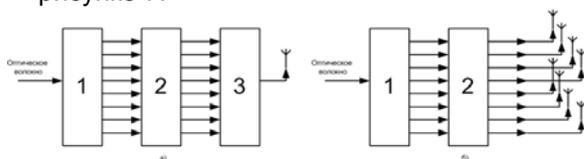
На сегодняшний день существует большое множество систем передачи информации, работающих на частотах свыше 100 ГГц. Ниже приведены лишь некоторые из них, обзор которых позволяет показать общие тенденции в развитии технологий миллиметрового диапазона. Основными критериями сравнения систем будут являться: скорость передачи данных, размеры передатчиков/приемников, дальность действия.

**120 ГГц система для передачи 10 Гб/с** на расстояние от 200 м до 2,5 км (в зависимости от требуемого коэффициента готовности). В работе для генерации были использованы фотонные технологии (два лазера с AWR решеткой и EDFA усилителем на выходе) с преобразованием в электрический вид с помощью диода UTC – PD [2] и транзистора HEMT (полевой транзистор на гетеропереходах) с максимальной выходной мощностью около 10 мВт [9]. Мощность может быть еще увеличена путем использования электрических резонансных цепей, интегрированных с диодом и HEMT транзистором на одной микросхеме в виде чипа. Для поддержания мощности на уровне 10 дБм и был использован дополнительно HEMT транзистор. BER был выбран равным 10<sup>-12</sup> (стандарт для OC-192 и 10G Ethernet). Для излучения в свободное пространство использовались два вида антенн – антенна с Гауссовской оптической линзой и антенна Кассегрейна с усилением соответственно

52 dBi и 48 dBi соответственно. Рабочая частота была выбрана 125 ГГц (на территории Японии) с полосой 17 ГГц (116,5 – 133,5 ГГц) и модуляцией ASK. Для коэффициента готовности 99,9999% расстояние составило около 500 м и 400 м в зависимости от вида антенны. Для беспроводной фиксированной связи (FWA) ( $BER=10^{-4}$ ) расстояние составило соответственно 2,5 км и 4,4 км в зависимости от антенны. В работе также было проведено исследование прохождения оптически промоделированного сигнала по оптоволокну с применением обычной амплитудной модуляцией и с подавленной несущей и одной боковой полосой. Результаты показали, что при использовании обычного одномодового волокна и ASK расстояние составило около 470 метров (тогда как обычные системы DWDM обеспечивают дистанции до 80 км без усилителей). При использовании однополосной модуляции и волокна со смещенной дисперсией расстояние составило около 10 км, что позволяет совмещать существующие оптические сети и радиосети в одну инфраструктуру и соединять генератор и передатчик через десятки километров.

Как видно из исследований, расстояние для потоков класса OC-192 и 10G Ethernet оказалось около сотни метров. Для увеличения этого расстояния предложено использовать следующие подходы:

- применение модуляции QPSK, которая позволяет на 3 дБ уменьшить требуемое отношение сигнал/шум в сравнении с ASK модуляцией;
- применение FEC и eFEC кодирования (дает энергетический выигрыш до 10 дБ). В работе [2] было показано, что применение таких схем позволяет при интенсивности дождя  $I=22$  мм/час и коэффициенте готовности 99,999 передавать информацию на расстояние до 800 м при применении кода Рида-Соломона;
- увеличение мощности излучения путем создания матрицы фотодиодов или матрицы антенн. Схема таких матриц изображена на рисунке 7.



**Рис. 7. Модули диодов UTC-PD: матрица диодов с одной антенной (а) и матрица диодов с матрицей антенн с пространственным объединением мощности (б); 1 – оптический делитель, 2- матрица UTC-PD фотодиодов, 3-цепь объединения мощности**

- увеличением чувствительности приемника, например путем использования эффекта сверхпроводимости.

**250 ГГц система для передачи 8 Гб/с** на расстояние в 50 см [3]. Для генерации и усиления использовались те же технологии, что и в предыдущих работах. Для детектирования использовался диод Шоттки с кольцевой антенной (для устранения влияния поляризации). Ключевым элементом в передатчике также был диод UTC-PD, способный генерировать максимальное значение энергии (около 200 мкВт) по сравнению с обычными рип диодами. Здесь использовалась ASK модуляция и рупорная антенна с усилением 25 dBi с дополнительной диэлектрической линзой для увеличения направленности. Для этой системы никаких схем автоподстройки частоты не использовалось, что привело к уменьшению длины пролета. Скорость потока в данном случае была ограничена 8 Гб/с вследствие ограниченной полосы малошумящих усилителей промежуточной частоты (около 4,5 ГГц). Следует подчеркнуть размеры приемного чипа около  $2 \times 1,5$  мм.

**Система с использованием полосы 300-400 ГГц для передачи 1 Гб/с** [4]. В данной системе было выполнено передачу одногогигабитного потока. В будущем планируется создание систем, способных передавать потоки со скоростями до 43 Гб/с. Тут следует заметить, что элементная база и здесь не менялась, а для детектирования использовался тот же диод Шоттки. Передачу 1Гб/с потока было выполнено на расстояние 50 см (при этом полоса пропускания усилителей фирмы Virginia Diode inc. составила около 300 МГц для частоты 380 ГГц). Выходная мощность от UTC-PD для частоты 380 ГГц составила 110 мкВт. Также использовалась рупорная антенна с усилением 25 dBi. Было подтверждено возможность передачи 1Гб/с для частот от 250 ГГц до 400 ГГц на расстояние до 2 м. Доступная мощность в 400 мкВт позволяет в будущем использовать полосу 300-400 ГГц для передачи 40 каналов 1Гб/с с мощностью 10 мкВт/канал на расстояние в несколько метров.

Сравнение рассмотренных выше систем приведено в таблице 1.

Конечно, это не все системы, которые были разработаны на сегодняшний день. Подобные системы также разрабатываются в таких странах как США, Канада, Англия, Россия, Финляндия, и с недавних пор в Украине. Недостатком рассмотренных систем следует считать ASK модуляцию, поскольку ее применение требует широкой полосы частот (приблизительно в 2 ра-

за больше чем полоса исходного сигнала). На сегодня это не является серьезной проблемой, но в будущем ожидается лицензирование данного диапазона, что приведет к более жесткому контролю занимаемых полос.

**Таблица 1. Совместные характеристики телекоммуникационных систем терагерцового диапазона**

Радиосистема	120 GHz	250 GHz	300-400 GHz
Частота (ГГц)	125	250	300-400
Полоса сигнала (ГГц)	17	16	---
Скорость потока (Гб/с)	10	8	1
Размеры (мм)	300*300*420	2*1,5	---
Выходная мощность	10 дБм	До 200 мкВт	До 120 мкВт
Дальность действия (м)	До 5000	0,5	0,5
Технологии	InP, GaAs	InP, GaAs	InP, GaAs
Модуляция	ASK	ASK	ASK

Дальнейшее увеличение скорости оказывается проблематично в виду того, что полоса сигнала оказывается чрезвычайно широкой для использования традиционных модуляторов и демодуляторов. Для увеличения скорости в данном диапазоне традиционно планируется использовать многопозиционные схемы модуляции, что очень затруднительно в виду усложнения схем модуляторов и демодуляторов. На данный момент только ASK и QPSK модуляции могут быть реализованы. Передача единого потока в широкой полосе ведет еще и к тому, что значительное влияние на форму сигнала начинает оказывать частотная дисперсия, что ведет к ухудшению чувствительности системы. Для преодоления этих проблем предполагается использовать несколько каналов с более узкой полосой и меньшей скоростью цифровых потоков, то есть несколько несущих с последующим суммированием мощностей. Хотя это и приведет к удорожанию и усложнению системы, такой подход позволит использовать многопозиционные схемы модуляции, такие как QAM-16 и выше.

## Выводы

Несмотря на существующие системы, проблемой все еще остается наличие элементной базы, твердотельных устройств, способных генерировать миллиметровые волны. Также следует провести исследование механизма распространения миллиметровых волн при различных погодных условиях, влияние отклонения антенны от своей оси на уровень принимаемого сигнала, а также провести моделирование таких систем с использованием всех неявных методов. На данный момент все еще отсутствует методика расчета пролета между радиостанциями в данном диапазоне, хотя и ведутся определенные разработки в ИТУ.

Перспективным направлением развития радиосистем терагерцового диапазона является разработка и внедрение новых схемотехнических решений, применение субмикронных и нанoeлектронных компонентов при построении приемно-передающего и антенного оборудования, что позволит, прежде всего, снизить стоимость оборудования и обеспечить необходимые надежностные электрические и энергетические характеристики. Малые вес и габариты систем терагерцового диапазона при высокой скорости передачи информации и надежность связи делают их привлекательными для использования в составе бортовой аппаратуры, в частности, для межспутниковой связи.

## Литература

1. Naoya Kukutsu and Yuichi Kado: Overview of millimeter and terahertz wave application Research, NTT Technical Review, Vol. 7, No.3, March 2009.
2. Akihiko Hirata, Hiroyuki Takahashi, Ryoichi Yamaguchi, Koichi Murata: Transmission Characteristics of 120-GHz-Band Wireless Link Using Radio-on-Fiber Technologies, Journal of Lightwave technology, Vol.26, No. 15, August 1, 2008.
3. H.-J. Song, K.Ajito, A.Hirata, A. Wakatsuki: 8 Gbit/s wireless data transmission at 250 GHz, Electronics Letters, 22<sup>nd</sup> of October, 2009, Vol. 45, No.22.
4. Tadao Nagatsuma, Ho-Jin Song, Yoshihide Fujimoto: Giga-bit Wireless Link Using 300-400 GHz Bands, 2009 International Topical Meeting on Microwave Photonics, 14-16 of October, Valencia.
5. E.Laskin, P. Chelalier, A.Chantre, B. Sautreuil: 80/160-GHz Transceiver and 140-GHz Amplifier in SiG.