文章编号: 1672-2892(2011)03-0265-05

# 0.14 THz 10 Gbps 无线通信系统

王 成<sup>1</sup>,刘 杰<sup>1</sup>,吴尚昀<sup>1</sup>,邓贤进<sup>1</sup>,何晓英<sup>2</sup>

(1.中国工程物理研究院 电子工程研究所,四川 绵阳 621900; 2.中国电子科技集团公司 第 29 研究所,四川 成都 610036)

摘 要:太赫兹通信由于其固有的宽带特性,在 Cbps 以上的高速无线通信领域受到广泛关注。 本文描述了一种工作在 0.14 THz 频段的无线通信系统,传输速率达 10 Gbps。该系统基于超外差结 构,中频采用数字信号处理技术进行 16QAM 高阶数字信号调制解调,依靠肖特基二极管次谐波混 频技术实现从中频到太赫兹信号的频谱搬移。目前该系统已经通过了 500 m 10 Gbps 距离无线传输 实验验证,通信频段为 133.8 GHz~137.4 GHz,带宽 3.6 GHz,发射功率 0 dBm,传输误码率低于 10<sup>-6</sup>。 关键词:太赫兹通信;高速无线通信;0.14 THz;10 Gbps

## 0.14 THz 10 Gbps wireless communication system

WANG Cheng<sup>1</sup>, LIU Jie<sup>1</sup>, WU Shang-yun<sup>1</sup>, DENG Xian-jing<sup>1</sup>, HE Xiao-ying<sup>2</sup> (1.Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China; 2.No.29 Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu Sichuan 610036, China)

**Abstract:** Utilizing the wide band performance of terahertz spectrum has attracted great attention in developing wireless communication system beyond Gbps. This paper describes a 0.14 THz band wireless communication system with 10 Gbps transmission data rate. This system is based on super-heterodyne structure. IF signal is processed with digital 16QAM modulation, which is converted to RF frequency with Schottky diode sub-harmonic mixer. Working in 133.8 GHz-137.4 GHz band(BW=3.6 GHz), 10 Gbps wireless signal transmission has been achieved successfully over a distance of 500 m with output power of 0 dBm, and transmission error bit rate less than 10<sup>-6</sup>.

Key words: terahertz communication; high speed wireless communication; 0.14 THz; 10 Gbps

随着无线通信频谱日益拥挤,传统的射频微波频段移动通信网络、无线局域网、空间卫星通信等的通信速率的提高受到极大限制。V 波段和 E 波段的毫米波高速无线通信系统虽然已经达到较高的通信速率,如澳大利亚 CSIRO ICT Centre 研制的 6 Gbps 的 85 GHz 点对点通信链路<sup>[1]</sup>,但受限于物理带宽,其通信速率难以进一步提高。自由空间光通信 FSO 是高速无线通信的有力竞争者,美国 AOptix 公司研制的 LCT-5 无线传输系统实现了 10 Gbps, 5 km 距离的无线传输。但 FSO 存在容易受到激光光束跟踪和瞄准、大气环境影响、光路遮挡等问题。

太赫兹频段由于其宽带特性,在通信、雷达、特征频谱检测等领域具有巨大应用潜力。日本 NTT 于 2004 年首先实现了基于 UTC-PD 非线性光混频的 120 GHz,10 Gbps 无线通信系统<sup>[2]</sup>,在发射端采用光学方法对 1 552 nm 激光进行 10 Gbps 光学 ASK 调制,然后激励 UTC-PD 产生 THz 载波,并通过天线发射。2009 年,NTT 用电子学 方法实现 120 GHz 10 Gbps 无线通信系统<sup>[3-4]</sup>,系统核心为基于 0.1 μm InP HEMT MMIC 的集成收发芯片,通过 800 m 传输距离实验验证,最大传输距离预计为 2 km。2008 年,加拿大多伦多大学基于 SiGe HBT MMIC 技术的 165 GHz /170 GHz Transceiver<sup>[5-6]</sup>和基于 SiGe BiCMOS MMIC 技术的 0.14 THz Transceiver<sup>[7]</sup>,在单芯片上集成了 振荡器、混频器、放大器、ASK 调制器和 64 静态分频器等组件,构成完整的射频信道,实现了数米距离内的 4 Gbps 无线通信。2004 年,Braunschweig 太赫兹通信实验室使用室温二维电子气(2DEG)调制器和飞秒激光器太赫兹时 域波谱仪进行了音频信号的太赫兹传输实验<sup>[8]</sup>,传输距离为 48 cm,模拟音频信号带宽为 25 kHz。2008 年, Braunschweig 太赫兹通信实验室在 0.3 THz 频率上成功实现 6 MHz 带宽模拟彩色视频基带信号的传输,实验距离 超过 22 m<sup>[9]</sup>。该系统采用肖特基二极管次谐波混频技术,将 0~10 GHz 的中频信号上变频到 290 GHz~310 GHz 频带,输出功率 50 μW。2004 年,Tze-An Liu 等人利用光导开关<sup>[10]</sup>,实现了模拟音频信号通信实验。

收稿日期: 2011-02-15; 修回日期: 2011-04-25

现有的太赫兹通信系统,趋向于在太赫兹低端(数百 GHz),利用低阶调制方式(模拟载波调制、ASK 或 BPSK) 来实现短距离无线通信(低辐射功率),这主要是由现有太赫兹器件水平决定的。本文提出了一种基于"肖特基二 极管次谐波混频+中频信号 16QAM 高阶调制解调"的太赫兹通信系统技术路线,该技术路线具有频谱利用效率 高、抗信道失真能力强、功率提升潜力大等优点,尚未发现在国际公开文献中有过类似报道。并在国内首先研制 了 0.14 THz 10 Gbps 无线通信系统,目前,该系统已经实现了基于软解调方案的 500 m 通信传输实验,通信频段 为 133.8 GHz~137.4 GHz,辐射功率-3 dBm,带宽 3.6 GHz,传输速率达 10 Gbps,误码率小于 10<sup>-6</sup>。

## 1 0.14 THz 无线通信系统

本文提出的太赫兹通信系统采用"肖特基二极管次谐波混频+中频信号 16QAM 高阶调制解调"技术方案。 该系统基于超外差通信体制,发射端 10 Gbps 数据码流首先经过 RS(204,188)编码,然后经由 16QAM 高阶数字信 号调制转换为载波中心频率 6 GHz、带宽 3.6 GHz 的中频(IF)调制信号,最后经过肖特基二极管次谐波混频搬移 到 133.8 GHz~137.4 GHz 的 RF 通信频段,通过 51 dB 增益环焦天线发射;接收端天线接收 RF 信号后,同样经 过肖特基二极管次谐波混频恢复 6 GHz 的 IF 载波,然后,经由 16QAM 高阶数字解调和 RS(204,188)解码恢复数 据码流。0.14 THz 无线通信系统结构框图如图 1 所示。





该技术方案的主要优点为:1)相比于采用直接载波调制实现 ASK 或者 BPSK 低阶调制方式的太赫兹通信系统,采用 16QAM 高阶数字信号调制解调可以大大提高频谱利用效率,例如:日本 NTT 120 GHz 通信系统采用 ASK 调制方式实现 10 Gbps 速率无线传输,占用通信带宽 17 GHz,基本无继续提高通信速率的物理带宽空间,而本系统占用带宽仅 3.6 GHz,频谱效率提高约 5 倍,具备 0.14 THz 大气窗口上实现数十 Gbps 通信速率的潜力; 2)采用数字通信体制,利用信道均衡、编码译码等一系列数字信号处理技术,抗信道失真能力强,可以根据信道的变化进行实时频谱补偿;3)目前可以输出 W 级功率的太赫兹行波管等电真空器件,相对带宽较窄,不能支持 ASK 等低阶调制方式的高速太赫兹通信,而采用高阶调制方式的本系统可以利用电真空器件提高发射功率, 实现远距离通信;4)系统采用全固态半导体电子学技术,体积小,功耗低。该系统的主要缺点是复杂度较高,特别是实时硬件高速并行信号处理,需要分阶段实现,所以目前的系统采用的是软解调方案,即采用软件方法实现

1) 0.14 THz 无线通信系统发射机和接收机

0.14 THz 无线通信系统发射机和接收机核心组件是基于肖特基二极管的 0.14 THz 二次谐波混频器,其上变 频损耗 7 dB,下变频损耗 13 dB,带宽 10 GHz。为了向次谐波混频器提供本振,发射机和接收机集成了 64.8 GHz 倍频放大源,该放大倍频源需要在外部输入 32.4 GHz,-5 dBm 本振信号。6 GHz 的 IF 信号输入功率为-5 dBm, 经 0.14 THz 次谐波混频器上变频后,输出中心频率分别为 135.6 GHz 和 123.6 GHz(带宽均为 3.6 GHz)的上下边带。为了避免下边带干扰,使用 137 GHz 带通滤波器来实现下边带抑制,抑制度大于 40 dB。上边带信号经过 0.14 THz 固态低噪声放大器放大后获得-3 dBm 功率输出。0.14 THz 接收机与发射机结构基本一致,移除了发射机的 RF 带通滤波器以减小损耗,接收机对接收到的 RF 信号放大后直接下变频获得 IF 信号。发射机和接收机框图和 主要性能指标分别如图 2 和表 1 所示。

Table 1 enormance of 0.14 Thz transmitter and receiver			
transmitter		receiver	
RF frequency	132.6 GHz-139.6 GHz	RF frequency	132.6 GHz-139.6 GHz
upconvert gain	2 dB	downconvert gain	-2 dB
maximum output power	0 dBm	noise temperature	about 4 000 K
sideband rejection	> 40 dB	gain ripple	< 4 dB
LO frequency	32.4 GHz	LO frequency	32.4 GHz
LO power	-5 dBm	LO power	-5 dBm
DC Power consumption	1.4 W	DC power consumption	1.4 W

表 1 0.14 THz 发射机和接收机性能
able1 Performance of 0.14 THz transmitter and receive



2) 发射机/接收机 Ka 本振及中频处理模块

发射机/接收机 Ka 本振及中频处理模块主要起到为 0.14 THz 发射机和接收机提供 Ka 频段本振和控制 IF 信号增益的作用。发射机/接收机 Ka 本振及中频处理模块的 Ka 本振输出频率为 31.6 GHz~33.6 GHz,步进 200 MHz, 输出功率 5 dBm,相位噪声小于-80 dBc/Hz(10 kHz offset),杂散水平小于-60 dBc,通过锁相倍频方式实现。发射机 IF 链路模块增益为 26 dB,接收机 IF 链路增益为 57 dB。Ka 本振功率的控制与 IF 链路增益的控制通过外部衰减器实现。

3) 10 Gbps 16QAM 高速信号调制解调和 RS(204,188)编码译码

由于信道的幅相均衡性能对 16QAM 高阶调制解调的影响十分显著,所以需要结合使用信道失真特性补偿和 信源编码以有效降低系统误码率。信源编码使用 RS(204,188)编码,单帧编码长度为 2 Mbit。在 16QAM 调制解 调处理过程中,利用数字信号处理技术进行信道失真特性补偿。本研究完成了 10 Gbps 16QAM 高阶数字信号调 制解调、RS(204,188)纠错编码算法研制和软件程序开发,软解调框图如图 3 所示。



Fig.3 Architecture of 10 Gbps 16QAM modulation and RS(204,188) coding 图 3 10 Gbps 16QAM 调制解调和 RS(204,188)编码译码流程图

软件处理的主要步骤为: a) 对原始图像文件进行 RS(204,188)信源编码; b) 基于编码文件,生成差分编码 16QAM 基带信号,经成型滤波、上变频、加定时及载波偏差后生成中频信号,生成波形文件,由太赫兹信道传输; c) 接收信号经采样产生采样文件,软解调程序分段读入,进行下变频、匹配滤波、定时同步(Gardner+内插)、载波同步(判决反馈锁相环),最后差分译码输出到解调文件中; d) 对解调文件进行 RS(204,188)译码,生成解调 图像文件。

4) 高增益环焦天线

为实现远场传输,系统使用了 0.14 THz 环焦天线,其增益为 51 dB,天线抛物面直径为 320 mm。天线为线 极化天线,接口为 WR6 矩形波导。

系统4部分均集成在光学式天线平台上,具备高低和俯仰二维转动控制能力,以实现天线的准确对准。

### 2 500 m 距离 10 Gbps 无线传输实验

基于当前系统实现了 500 m 距离上的 0.14 THz 10 Gbps 无线传输,实物系统如图 4 所示。系统传输实验采用

太赫兹射频信号加软解调方案,待传输的目标图像文件采用 RS(204,188)编码。编码文件 经过 16QAM 调制后生成波形文件,并载入任意波发生器 AWG7122B。任意波形发生器 AWG7122B 的 DA 速率为 20 Gsps,输出中心频率 6 GHz、带宽 3.6 GHz(4.2 GHz~7.8 GHz) 的 IF 信号。IF 信号单帧长度为 2 Mbit,重复频率为 5 kHz,传输数据率达 10 Gbps(包含帧头尾的空隙位),通过发射机 Ka 本振及中频处理模块的 IF 放大滤波后,馈入混频器的功率为-5 dBm。辐射输出频段为 133.8 GHz~137.4 GHz,辐射功率为-3 dBm。

51 dB antenna 0.14 THz transmitter



0.14 THz receiver

(a) transmitting system

Ka LO generator 10 Gbps software and IF amplifier demodulation (b) receiving system

Fig.4 0.14 THz transmitting and receiving system over 500 m free space channel 图 4 500 m 传输实验中的 0.14 THz 发射系统和接收系统

根据 Liebe 计算结果,在短距离内 0.14 THz 频段大气衰减小于 1 dB/km<sup>[11]</sup>,所以在 500 m 距离上几乎可以不 考虑大气衰减带来的信号损失。链路计算表明,当前系统的天线全向辐射功率为 48 dBm,自由空间传输损耗为 -129 dB,接收载噪比为 37.6 dB, IF 信号输出功率-34 dBm。而实际 IF 信号通过发射机、500 m 信道、接收机之 后,实测下变频接收功率为-41 dBm,载噪比 C/N 约 30 dB,较理论计算结果低 7 dB。这主要是由于天线增益、极化偏差、对准等调试因素和发射机/接收机的非理想特性引起的。

接收端 IF 信号经过 IF 放大滤波链路后, 馈入宽带示波器 DPO71254B 的信号功率为-1.5 dBm。宽带示波器

DPO71254B 对 IF 信号采样后生成采样文件,示波器采样率为 50 Gsps,采样长度为 20 M,图 5 所示为示波器单次采样的时域 波形和实时频谱。

示波器采样文件经过 16QAM 软件解 调及 RS 译码之后,可以获得解调图像文 件。图 6 所示为 16QAM 软件解调在依次完 成定时恢复、均衡和载波恢复 3 个阶段的 星座图。从图中可以看出,在没有信道补 偿的前提下,信道的幅相不均衡性对信号 质量的影响是比较显著的。信道均衡算法

(a) time domain waveform of received signal
 (b) spectrum of received signal
 Fig.5 Time domain waveform and frequency spectrum of sampled signal
 图 5 采样信号时域波形和频谱

的选取,对于均衡结果影响非常明显,需要根据射频信道的传输特性进行反复实验调整,以获得最好的均衡效果。 本实验中,在经过信道均衡之后,系统传输误码率可达 1.25×10<sup>-4</sup>。

图 7 所示为经过 RS(204,188)解码后得到的解调图像 文件, IF 信号单帧数据量为 2 Mbit, 重复实验结果显示无 比特错误发生,系统误码率从 1.25×10<sup>-4</sup> 降低到了 10<sup>-6</sup> 以 下,这显示编码译码在降低系统误码率上起到了非常显著 的作用。





Fig.7 Transmitted figure 图 7 图片传输效果

268

## 3 结论

本文提出了采用"肖特基二极管次谐波混频+中频信号 16QAM 高阶调制解调"技术路线来实现太赫兹通信, 尚未发现在国际公开文献中有过类似报道。并在国内首次实现了 0.14 THz 10 Gbps 无线传输系统,目前该系统采 用软件调制解调方案实现了 500 m 距离的无线高速信号传输,辐射功率-3 dBm,传输误码率低于 10<sup>-6</sup>。按照该 系统的实测数据计算,其最大传输距离约 1.5 km,相比于日本 NTT 的 120 GHz 无线通信系统(辐射功率 10 dBm, 最大通信距离 3 km),在辐射功率只有后者二十分之一的情况下,依然实现了 km 级的太赫兹通信。未来的研究 将着眼于高速硬件调制解调板卡的研制和太赫兹射频通道的持续改进,最终构建高速实时太赫兹无线通信系统。

#### 参考文献:

- Dyadyuk V,Bunton J D,Pathikulangara J,et al. A multi-gigabit millimeter-wave communication system with improved spectral efficiency[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2007,55(12):2813-2821.
- [2] Hirata A,Kosugi T,Takahashi H,et al. 120-GHz-band millimeter-wave photonic wireless link for 10-Gb/s data transmission[J].
  IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006,54(5):1937-1944.
- [3] Kosugi T,Hirata A,Nagatsuma T,et al. MM-wave long-range wireless systems[J]. IEEE Microwave Magazine, 2009,10(2): 68-76.
- [4] Hirata A,Yamaguchi R,Kosugi T,et al. 10-Gbit/s wireless link using InP HEMT MMICs for generating 120-GHz-band millimeter-wave signal[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009,57(5):1102-1109.
- [5] Laskin E, Chevalier P, Chantre A, et al. 165-GHz transceiver in SiGe technology[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2008,43(5):1087-1100.
- [6] Laskin E, Tang K W, Yau K H K, et al. 170-GHz transceiver with on-chip antennas in SiGe technology[C]// IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. Atlanta, GA:[s.n.], 2008:637-640.
- [7] Laskin E, Chevalier P, Sautreuil B, et al. A 140-GHz double-sideband transceiver with amplitude and frequency modulation operating over a few meters[C]// IEEE Bipolar/Bi CMOS Circuit and Technology Meeting. Capri, Italy:[s.n.], 2009:178.
- [8] Ostmann T K,Pierz K,Hein G,et al. Audio signal transmission over THz communication channel using semiconductor modulator[J]. Electronics Letters, 2004,40(2):124-126.
- [9] Jastrow C, Munter K, Piesiewicz R, et al. 300 GHz channel measurement and transmission system[C]// 33rd International Conference on Infared, Millimeter and Terahertz Waves. Pasadena, CA:[s.n.], 2008:1-2.
- [10] Liu T A,Lin G R,Chang Y C,et al. Wireless audio and burst communication link with directly modulated THz photoconductive antenna[J]. Optical Express, 2005,13(15):10416-10423.
- [11] Liebe H J,Layton D H. Millimeter-wave properties of the atmosphere: laboratory studies and propagation Modeling,NTIA Report 87-224[R]. [S.l.]:U.S. Department of Commerce, 1987.

#### 作者简介:



王 成(1987-),男,四川射洪人,在读硕 士研究生,主要研究方向为太赫兹通信技术、 太赫兹关键组件和毫米波组件与电路.email: c-w04@163.com.

**何晓英**(1979-), 女,四川眉山人,学士,主要研究方向 为电子对抗系统. **刘** 杰(1981-),男,江西泰和人,助理研究员,主要研究方向为电磁场理论、仿真技术、微 波技术、收发信道系统技术、通信系统技术等.

吴尚昀(1983-),男,广西钦州人,助理研究员,主要研究方向为电磁场理论、仿真技术、微 波技术、收发信道系统技术、通信系统技术等.

**邓贤进**(1973-),男,四川安岳人,硕士,副 研究员,主要研究方向为电磁场理论、仿真技术、 微波技术、收发信道系统技术、通信系统技术等.