

文章编号: 2095-4980(2020)03-0369-05

## 310 GHz 太赫兹通信系统设计

熊子康<sup>a,b,c</sup>, 何敬锁<sup>\*a,b,c</sup>, 武晓磊<sup>a,b,c</sup>, 苏波<sup>a,b,c</sup>, 张存林<sup>a,b,c</sup>

(首都师范大学 a.物理系; b.太赫兹光电子学教育部重点实验室; c.北京成像技术高精尖创新中心, 北京 100048)

**摘要:** 太赫兹波具有传输速率高、容量大、方向性好、抗干扰能力强等特点, 由于大气损耗大和大功率源的缺乏, 较适用于短距离无线通信。基于 300 GHz 频段的优良特性, 设计了一种 310 GHz 太赫兹无线通信系统。通信链路基于美国亚毫米波与太赫兹产品制造公司(VDI)的谐波混频和超外差收发, 系统主要由倍频器、功率放大器、滤波器和 VDI 次谐波混频器构成。根据链路预算搭建实际通信系统, 仿真和实验结果证明: 随着通信速率的升高, 解调信号的失真逐渐增加。通信距离 1 m 条件下, 系统能实现 10 Gbps 无误码传输, 当速率达到 11 Gbps 时, 误码率为  $5 \times 10^{-6}$ 。

**关键词:** 太赫兹波; 谐波混频; 误码率; 无线通信

**中图分类号:** TN92

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2018281

## Design of 310 GHz Terahertz communication system

XIONG Zikang<sup>a,b,c</sup>, HE Jingsuo<sup>\*a,b,c</sup>, WU Xiaolei<sup>a,b,c</sup>, SU Bo<sup>a,b,c</sup>, ZHANG Cunlin<sup>a,b,c</sup>

(a.Department of Physics; b.Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education; c.Beijing Imaging Technology Center, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** Terahertz wave has the characteristics of high transmission rate, large capacity, good directivity and strong anti-interference ability, but it is more suitable for short-distance wireless communication due to the large atmospheric loss and the lack of high-power sources. Based on the excellent characteristics of the 300 GHz band, a 310 GHz terahertz wireless communication system is designed. The communication link is based on Virginia Diodes Inc(VDI) harmonic mixing and superheterodyne transmission. The system is mainly composed of frequency multiplier, power amplifier, filter and VDI subharmonic mixer. The actual communication system is built according to the link budget. The simulation and experimental results show that the distortion of the demodulated signal increases with the increase of the communication rate. The system can achieve 10 Gbps error-free transmission with a communication distance of 1 m. When the rate reaches 11 Gbps, the bit error rate is  $5 \times 10^{-6}$ .

**Keywords:** Terahertz wave; harmonic mixing; bit error rate; wireless communication

信息技术的飞速发展使得人们对于通信速率的需要日益提高。根据 Edholm 的带宽定律, 人们对无线短距离通信的带宽需求一般每 18 个月翻 1 倍<sup>[1]</sup>。想要达到 10 Gbps 量级的高速通信, 微波通信由于其窄带宽的限制将无法实现。为了得到足够大的传输容量, 考虑利用高频载波实现高速数据传输<sup>[2-3]</sup>, 太赫兹波逐渐成为未来高速无线通信研究的焦点。

太赫兹波是指频率在 0.1~10 THz(波长为 0.03~3 mm)范围内的电磁波<sup>[4]</sup>, 具有带宽超宽、波束窄、方向性好和传输容量大等特点。由于大气损耗大和大功率源的缺乏, 较适用于短距离无线通信。由于水汽对太赫兹波有强烈的吸收, 太赫兹通信系统对大气条件有一定要求和视距性质<sup>[5]</sup>。考虑利用 300 GHz 这一太赫兹波大气衰减很低的窗口用于通信, 既能提供宽带宽和大容量, 又能保证较低的损耗和较高输出功率, 对太赫兹集成器件的

收稿日期: 2018-11-09; 修回日期: 2019-04-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61675138; 61575131)

作者简介: 熊子康(1995-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹通信。email:973059053@qq.com

\*通信作者: 何敬锁 email:hejingsuo@263.net

要求相对较低, 便于开展后期的实验工作。对于 300 GHz 通信频段的研究, 日本信息与通信技术研究所于 2012 年采用单行载波光二极管发射极和肖特基势垒二极管检测器在 300 GHz 频段实现了 24 Gbps 无线数据传输, 该系统用于短距离(0~0.5 m)传输; 2014 年实现了在 300 GHz 频段以 50 Gbps 的正交相移键控调制格式实时传输<sup>[6-7]</sup>; 2017 年, 德国 Braunschweig 太赫兹通信实验室基于单片微波集成电路(Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC)的模拟前端, 在 300 GHz 载波频率下传输数据速率高达 64 Gbps 的宽带复合调制信号, 最大发射机符号速率为 32 Gbps<sup>[8-9]</sup>。2012 年中国工程物理研究院基于纯电子器件<sup>[10-11]</sup>, 完成了基于 16 进制正交幅度调制(16QAM)的 0.34 THz 的 3 Gbps 实时解调通信实验, 能够实现 50 m 距离的无线传输, 采用“16QAM 正交调制+次谐波混频+多级放大”原理, 频谱利用率高, 便于功率级联和远距离通信; 2016 年利用肖特基二极管设计 340 GHz 的二进制开关键控(On Off Keying, OOK)接收机, 实现高达 18 Gbps 高速 OOK 无线通信<sup>[12-14]</sup>。日本 NTT 公司的 300 GHz 系统基于光学和电子学结合方法, 用非线性光混频方式产生 THz 波, 通信距离很短; 德国 Braunschweig 实验室的通信系统对 MMIC 的线性度和带宽要求极高, 频谱利用率不高。

针对上述问题, 设计了一种 310 GHz 太赫兹无线通信系统, 该系统和中国工程物理研究院的太赫兹系统设计原理一致, 同时兼具了结构简单小巧, 易于携带的优点, 且后期功率提升潜力明显, 便于开展室内太赫兹通信实验。该系统采用纯电子学方法, 射频信号源产生频率为 19.375 GHz 的射频信号, 经过倍频器上变频, 使用电谐波混频器产生调制信号, 经放大后由天线发送。发射端采用美国 VDI 谐波混频器的零中频(zero-IF)发射机, 接收端采用谐波混频零中频接收机, 仿真得到各阶段信号的频谱图。通过链路预算搭建实际通信系统, 实验结果与仿真结果基本一致, 表明该系统可以实现 1 m 距离范围内的 10 Gbps 无误码高速无线数据传输。速率提高, 解调得到的信号容易失真, 当速率达到 11 Gbps 时, 误码率为  $5 \times 10^{-6}$ , 证明了该系统可用于室内短距离 Gbp 量级高速无线传输。

## 1 310 GHz 太赫兹通信系统

基于 VDI 谐波混频超外差收发的 310 GHz 无线通信系统如图 1 所示。发射端采用 VDI 谐波混频器的零中频发射机, 通过谐波混频器的中频端口输入信号进行调制, 避免了镜像抑制的问题。由于采用 OOK 调制会导致频谱效率太低, 4ASK 调制又需要一定的信号处理, 不易于实时传输, 因此采用一种基于非归零码(Non-Return to Zero, NRZ)和零中频混频器的调制方法, 可以在二进制 OOK 调制的基础上, 提高频谱效率 1 倍以上, 且易于实时实现。

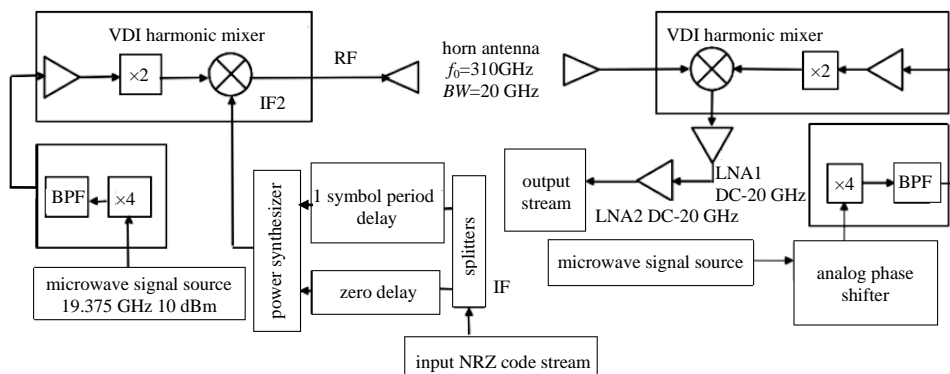


Fig.1 310 GHz wireless communication system based on VDI harmonic mixing superheterodyne transceiver  
图 1 基于 VDI 谐波混频超外差收发的 310 GHz 无线通信系统

利用 VDI 公司的谐波混频器参数仿真, 混频器由倍频和混频封装构成<sup>[15]</sup>, 基于次谐波混频原理, 根据三角函数积化和差公式, 频率分别为  $f_1$  和  $f_2$  的余弦信号相乘, 数学表达式为:

$$\cos(2\pi f_1 t) \cos(2\pi f_2 t) = \frac{1}{2} \cos(2\pi f_2 t) + \frac{1}{4} [\cos(2\pi(2f_1 - f_2)t) + \cos(2\pi(2f_1 + f_2)t)] \quad (1)$$

微波信号源产生一个频率为 19.375 GHz, 功率为 10 dBm 的正弦信号, 依次经过 4 倍频器、滤波器、功率放大器和二倍频器后, 达到 155 GHz 时与输入信号 IF2 进行次谐波混频, 通过零中频上混频输出得到中心频率为 310 GHz、带宽为 20 GHz 的调制信号, 信号通过喇叭天线发射并由接收端天线接收。接收端采用超外差混频接收机, 为使接收到的信号覆盖 300~320 GHz 频带, 接收机的本振中心频率选择为 310 GHz, 中频带宽选

择 0~10 GHz。考虑到接收中频低噪声放大器(LNA)的噪声，接收端整体噪声温度估计为 6 000 K。为使零中频接收机的本振与接收信号本振同相，使用模拟移相器调整本振相位。

将图 1 中的系统 IF 输入 20 Gbps NRZ 码流信号进行调制解调实验，图 2 给出了发射和零中频接收解调后的时域信号与原始输入信号之间的对比( $U_{out}$  vs IF2)，以及最终输出信号的频谱。从图中可知，当接收和发射相位匹配时，零中频解调工作正常。从波形可以看出，当前系统具备 20 Gbps 信号发射的能力，发射功率约为 -15 dBm。值得注意的是，在实际的系统中，由于链路损耗及接收系统噪声的因素，解调波形会恶化。

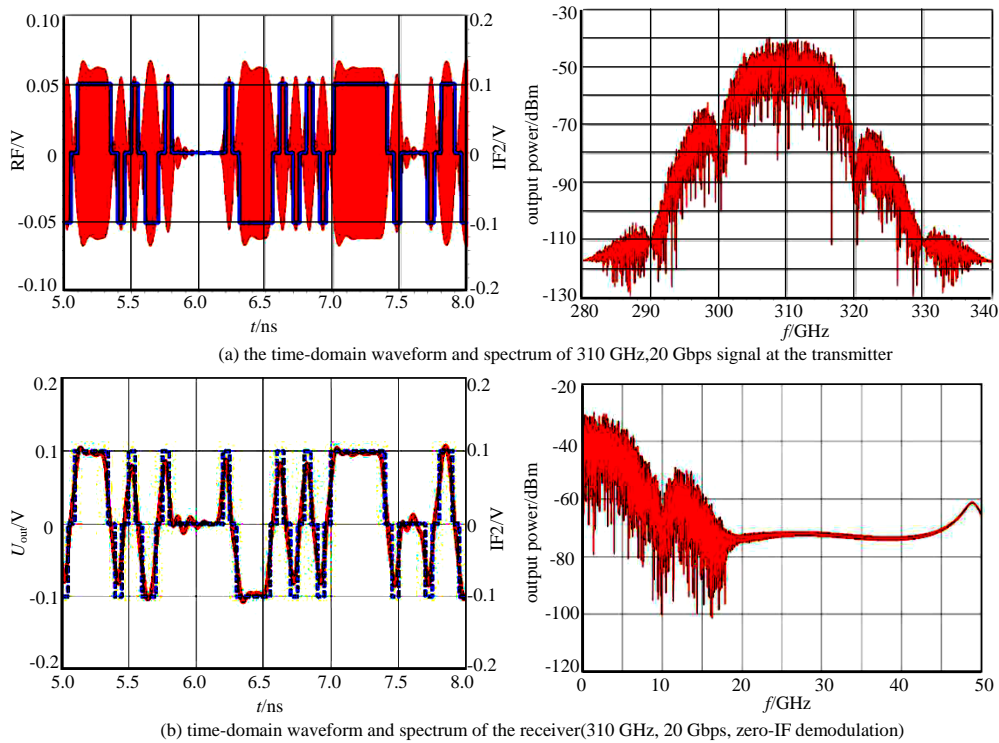


Fig.2 Time-domain waveform and spectrum at 310 GHz,20 Gbps signal transmission and zero-IF reception  
图 2 310 GHz,20 Gbps 信号发射和零中频接收的时域波形和频谱

## 2 系统链路预算与分析

采用图 1 所示的 310 GHz 无线通信系统，发射机输出功率为-15 dBm，发射天线采用 26 dBi 的 VDI 波导喇叭天线，信号带宽为 20 GHz，NRZ 调制速率为 20 Gbps；接收天线采用 26 dBi 的 VDI 波导喇叭天线，中频带宽 DC-20 GHz。链路预算如表 1 所示。

表 1 基于 VDI 谐波混频超外差收发 的 20 Gbps 通信链路预算

Table1 20 Gbps communication link budget based on VDI harmonic mixing superheterodyne transceiver

parameter	numerical value 1	numerical value 2
operating center frequency/GHz	310	310
modulation mode	NRZ	NRZ
modulation rate/Gbps	20	20
signal bandwidth,BW/ GHz	20	20
spectral efficiency,Eff/(bps/Hz)	1	1
transmit power, $P_{out}$ /dBm	-15	-15
receiver noise temperature, $T_r$ /K	6 000	6 000
antenna gain, $G$ /dBi	26	26
lens gain/dB	no	20
transmission distance, $D$ /m	0.2	2
SNR/dB	25.7	25.7

从表 1 可以看出, 该太赫兹通信系统结构较为简单, 便于集成, 但受发射端输出功率 $-15\text{ dBm}$  限制, 传输距离仅为  $0.2\text{ m}$ 。在链路中增加太赫兹透镜提高增益, 可以使通信距离延伸至  $2\text{ m}$ 。太赫兹通信系统内部结构简单, 便于集成, 有利于实际系统的搭建, 适用于  $\text{Gbps}$  量级的高速短距离无线通信。

### 3 太赫兹无线通信实验

基于上述仿真结果以及链路预算和分析, 搭建无线通信系统进行太赫兹通信实验。实验的通信速率和误码率采用误码率分析仪来测量, 其框图如图 3 所示。收发的本振频率由信号源经功分器给出, 频率  $19.375\text{ GHz}$ , 馈入发射机、接收机的本振功率均为  $0\text{ dBm}$ , 发射信号由误码率分析仪给出, 功率为 $-2\text{ dBm}$ , 接收信号经过接收机输出后, 再加一级宽带放大器(Mini-Circuit 公司, 型号 ZX60-14012L+,  $300\text{ kHz}\sim 14\text{ GHz}$ , 增益  $12\text{ dB}$ )送至误码率分析仪, 由仪器测量其误码率、眼图等通信系统指标。

实验测试场景如图 4 所示, 由于信号源功率和小增益喇叭天线的限制, 实际操作时发现收发距离在  $1\text{ m}$  时, 能保证通信质量良好; 增大距离, 会产生较大的误码和噪声。因此实验时在收发相距  $1\text{ m}$  的地方, 使用 2 个透镜进行聚束, 测试速率从  $1\sim 11\text{ Gbps}$ , 从测试结果可以看出, 速率在  $10\text{ Gbps}$  及以下时, 可实现  $1\text{ m}$  距离无误码的传输(误码率在  $1\times 10^{-10}$  以下), 在  $11\text{ Gbps}$  时, 误码率为  $5\times 10^{-6}$ , 说明该系统在  $1\text{ m}$  距离上的传输速率上限为  $10\text{ Gbps}$ 。实验结果与仿真分析能达到的最大传输速率  $20\text{ Gbps}$  相比, 有一定的差距, 这是由于实际通信实验中存在传输环境、多径信道传输及器件损耗等因素, 会导致信号功率有不同程度的衰减, 这些因素在仿真中考虑欠佳。在实验过程中, 可以通过增大信号源的发射功率以及更换大增益的喇叭天线提高系统的性能, 从整体实验情况来看, 这套太赫兹通信系统是可行的, 能够进行高速无线通信。

### 4 结论

基于  $300\text{ GHz}$  频段的太赫兹通信的优良特点, 本文设计了一套  $310\text{ GHz}$  太赫兹通信系统, 通过仿真和链路分析对该系统通信质量  $T$  进行评价, 并通过实验验证了这套通信系统的可行性。该系统集成度高, 结构简单, 易于携带和实时实验, 为太赫兹通信的新发展提供了很好的思路。未来的工作将继续考虑太赫兹通信信道的影响和高阶编码调制技术, 通过改进室内信道建模, 提高仿真结果和实验结果的适配性, 以构建实时可调的太赫兹无线高速通信系统。

#### 参考文献:

- [1] CHERRY S. Edholm's law of bandwidth[J]. IEEE Spectrum, 2004,41(7):58-60.
- [2] 刘海涛. 太赫兹无线通信系统研究与设计[D]. 成都:电子科技大学, 2014. (LIU Haitao. Research and design of terahertz wireless communication system[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2014.)
- [3] 潘犀灵. 结合光纤网络的超快无线通信技术展望[J]. 光学与光电技术, 2015,13(6):5-9. (PAN Xiling. Recent advances in millimeter-wave photonic wireless links for very high data rate communication[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2015,13(6):5-9.)
- [4] SIEGEL P H. Terahertz technology[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory Techcrunch, 2002(50):910-928.
- [5] MA T,NALLAPAN K,GUERBOUKHA H,et al. Analog signal processing in the terahertz communication links using waveguide Bragg gratings:example of dispersion compensation[J]. Optics Express, 2017,25(10):11009.

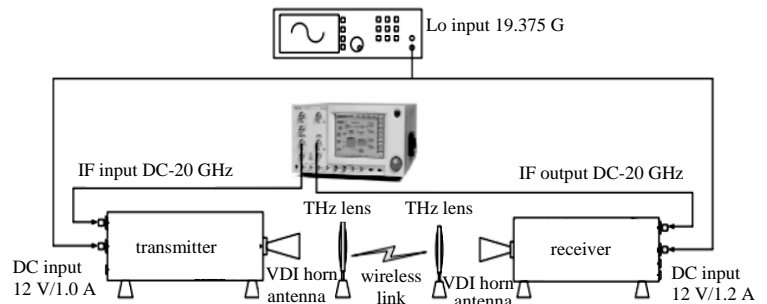


Fig.3 Block diagram of wireless communication experiment  
图 3 无线通信实验框图



Fig.4 Test scenario of wireless communication experiment  
图 4 无线通信实验测试场景

- [6] SONG H J, AJITO K, MURAMOTO Y, et al. 24 Gbit/s data transmission in 300 GHz band for future terahertz communications[J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(15):953–954.
- [7] SONG H J, KIM J Y, AJITO K, et al. 50 Gb/s direct conversion QPSK modulator and demodulator MMICs for terahertz communications at 300 GHz[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2014, 62(3):600–609.
- [8] DAN I, REY S, MERKLE T, et al. Impact of modulation type and baud rate on a 300 GHz fixed wireless link[C]// *Radio and Wireless Symposium*. Tuscaloosa: IEEE, 2017:86–89.
- [9] JASTROW C, MUNTER K, PIESIEWICZ R, et al. 300 GHz channel measurement and transmission system[C]// *International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*. Pasadena, CA: [s.n.], 2008:1–2.
- [10] 赵明明, 余建军. 太赫兹通信系统的研究现状与应用展望[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2018, 16(6):931–937. (ZHAO Mingming, YU Jianjun. Research status and application prospect of terahertz communication system[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2018, 16(6):931–937.)
- [11] CHEN Zhi, MA Xinying, ZHANG Bo, et al. A survey on terahertz communications[J]. *China Communications*, 2019, 16(2):1–35.
- [12] 田遥岭, 蒋均, 黄昆, 等. 0.34 THz 肖特基二极管高速 OOK 信号直接检波器[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(8):205–211. (TIAN Yaoling, JIANG Jun, HUANG Kun, et al. 0.34 THz high speed On-Off Keying(OOK) signal direct detector based on Schottky diode[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(8):205–211.)
- [13] 王成, 陆彬, 缪丽, 等. 0.34 THz 无线通信收发前端[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(6):1530–1534. (WANG Cheng, LU Bin, MIAO Li, et al. 0.34 THz T/R front-end wireless communication[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(6):1530–1534.)
- [14] WANG Cheng, LU Bin, LIN Changxing, et al. 0.34 THz wireless link based on high order modulation for future wireless local area network[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2014, 4(2):75–85.
- [15] 岳俊山, 陈辉, 蒋红梅. 300 GHz 太赫兹波室内无线通信系统的 Simulink 仿真[J]. *桂林电子科技大学学报*, 2014, 34(1):5–10. (YUE Junshan, CHEN Hui, JIANG Hongmei. Simulink simulation of indoor wireless communication system on 300 GHz terahertz wave[J]. *Journal of Guilin University of Electronic Technology*, 2014, 34(1):5–10.)