

发展中国太赫兹高速通信技术与应用的思考

Thoughts on the Development of Terahertz High Speed Communication Technology and Its Application in China

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 03-0043-005

摘要: 太赫兹通信是未来移动通信 (Beyond 5G) 中极具优势的技术途径, 也是空间信息网络高速传输的重要技术手段, 具有军民融合、协同发展的应用前景。中国太赫兹高速无线通信关键技术已经取得了重要突破, 与世界技术水平基本同步。因此, 进一步加大力度发展太赫兹高速通信技术, 对于中国引领国际高速无线通信技术发展和未来移动通信标准化进程具有重要的战略意义。

关键词: 太赫兹通信; 未来移动通信; Beyond 5G

Abstract: Terahertz (THz) communication has great potential for the future mobile communications (Beyond 5G), and is also an important technique for the high data rate transmission in spatial information network. THz communication has great application prospects in military-civilian integration and coordinated development. In China, important breakthroughs have been achieved for the key techniques of THz high data rate communications, which is practically keeping up with the most advanced technological level in the world. Therefore, further intensifying efforts on the development of THz communication have the strategic importance for China in leading the development of future wireless communication techniques and the standardization process of Beyond 5G.

Key words: Terahertz communication; future mobile communications; Beyond 5G

陈智/CHEN Zhi
张雅鑫/ZHANG Yaxin
李少谦/LI Shaoqian

(电子科技大学, 四川 成都 611731)
(University of Electronic Science and
Technology of China, Chengdu 611731,
China)

1 太赫兹通信技术是下一代高速无线通信的核心技术

太赫兹波段 (THz) 是指频率在 0.1 ~ 10 THz 范围内的电磁波, 频率介于微波和红外波段之间, 兼有微波和光波的特性, 具有低量子能量、大带宽、良好的穿透性等特点, 是大容量数据实时无线传输最有效的

技术手段。太赫兹通信与微波通信相比, 带宽大, 信息传输容量高; 载波频率高, 能够有效穿透等离子体鞘套; 波长短, 易于实现小型化。与激光通信相比, 其波束宽度适中, 对平台稳定性和跟瞄要求较低。大气对太赫兹波的吸收较强, 有利于实现空间保密通信。

太赫兹通信技术在高速无线通信领域具备了明显的技术优势:

(1) 频谱资源宽, 太赫兹高速无线通信可选利用的频率资源丰富。

(2) 高速数据传输能力强, 具备

100 Gbit/s 以上高速数据传输能力。

(3) 通信跟踪捕获能力强, 灵活可控的多波束通信, 为太赫兹通信在空间组网通信中提供更好的跟踪捕获能力。

(4) 抗干扰/抗截获能力强, 太赫兹波传播的方向性好、波束窄, 侦查难度大; 太赫兹信号的激励和接收难度大, 具有更好的保密性和抗干扰的能力。

(5) 克服临近空间通信黑障的能力强, 能有效穿透等离子体鞘套, 可以为临近空间高速飞行器的测控提供通信手段。

近年来, 无线通信正面临有限频谱资源和迅速增长的高速业务需求的矛盾, 传统频谱资源几乎耗尽。各种高速需求不断涌现, 如目前已商用的二维全高清电视信号 (Full-HD) 的无压缩数据率为 3.56 Gbit/s, 更高分辨率的二维 4K 高清电视信号速率为 6 Gbit/s; 而三维电视信号的速率为上述二维信号的 2 倍, 即 3D-Full-HD 为 7.12 Gbit/s, 3D-4K 为 12 Gbit/s。更有

收稿日期: 2018-02-06
网络出版日期: 2018-02-10

甚者,目前正在研发的超高清电视(S-HDTV)可能的数据率将可达到24 Gbit/s。随着用户对业务质量要求越来越高,无压缩或压缩率低的高清电视信号的传送也逐渐增多。如此高速率的数据传输目前主要依赖于光纤通信,但在一些临时的需要移动的场所,光纤通信就不太能胜任。例如:3D-Full-HD体育赛事直播,摄像机的位置需要经常变动,因此需要实现从摄像机到电视制作中心的超高速视频信号的机动传送。这样的场合很难临时铺设光纤线路,而传统的微波点对点通信设备又不能支持几十吉比特每秒甚至几十吉比特每秒的数据传输速率。在下一代的高速通信网中,对高速的点对点无线通信链路将具有极大的需求。

2 太赫兹通信技术已经成为科技强国竞相抢占的技术制高点

随着电磁空间竞争日趋白热化,电磁频谱已成为一种极重要的战略资源,而太赫兹波是电磁空间唯一亟待开发利用的频谱资源,因此世界各国高度关注重视。此外,现有的无线通信技术已难以满足多功能、大容量无线传输网络的发展需求,迫切需要发展新一代高速传输的无线通信技术,发展天地一体化的高速信息网络。因此,太赫兹高速通信技术成为了目前世界各科技强国争先抢占的科学技术制高点。

美国认为:太赫兹科学是改变未来世界的十大科学技术之一,陆海空三局、能源部、国家科学基金会等政府机构给予了大力支持,设立了太赫兹高速无线通信骨干网络建设相关计划。美国国防高级研究计划局(DARPA)开展了名为THOR的研究计划(该计划包含研发和评估一系列可用于移动的Ad-Hoc自由空间通信系统的技术),并投入大量经费研制0.1~1 THz频段太赫兹通信关键器

件和系统;2013年提出了100 Gbit/s骨干网计划,致力于开发机载通信链路实现大容量远距离无线通信,2015年美国预计其通信卫星将可能具备10 Gbit/s量级的传输速率,2020年将具备50 Gbit/s以上的传输速率。

欧盟第5—7框架计划中启动了一系列跨国太赫兹研究项目,包括以英国剑桥大学为牵头单位的WANTED计划、THz-Bridge计划,欧洲太空总署启动的大型太赫兹Star-Tiger计划。2017年欧盟已经正式布局6G通信技术,目前已初步定位于进一步的增强型移动宽带,峰值数据速率要大于100 Gbit/s,计划采用高于0.275 THz以上的太赫兹频段,并且欧盟准备在2019年的世界无线电通信大会上要求把0.275 THz以上的太赫兹频段确认用于移动及固定服务。

日本政府将太赫兹技术列为未来10年科技战略规划10项重大关键科学技术之首。日本电报电话公司(NTT)早在2006年在国际上首次研制出0.12 THz无线通信样机,并于2008年成功用于高清转播,目前正在全力研究0.5~0.6 THz高速率大容量无线通信系统。日本总务省规划将在2020年东京奥运会上采用太赫兹通信系统实现100 Gbit/s高速无线局域网服务。

2013年7月太赫兹通信国际标准小组将802.15.1Ghz升级为5Ghz,可见太赫兹科学技术的研究已在全球范围内全面性地展开并得到了高度重视。

3 全球太赫兹通信技术的发展趋势

自2006年日本分别实现120 GHz、10 Gbit/s通信演示系统(被喻为“无线通信标志性成果”)以来,太赫兹通信得到了快速发展,已经成为全球各国的研究热点。已有多家机构开展了相应研究,包括德国固态物理研究所(IAF)、德国联邦物理技术研究院(PTB)、Braunschweig大学、日本NTT、

美国贝尔实验室、加拿大多伦多大学、法国IEMN、美国Asyrmatos通信系统公司等。纵观近几年来太赫兹通信技术的发展历程及成果,它正逐步向更高速率、更高大气窗口频率以及低功耗与小型集成化和实用化方向发展。目前,太赫兹通信技术形成了基于微波光子学的光电结合方式、全固态混频电子学方式、直接调制方式这3类针对不同的应用场景并行发展的态势。

采用光电结合方式的太赫兹通信技术是较早发展的太赫兹通信系统方案,该方案需要2个窄线宽的锁模激光器,利用光学外差法并通过单行载流子光电二极管(UTC-PD)转化成太赫兹信号,其调制方式是基于光学的马赫曾德尔调制器(MZM)的高速调制器,不仅可以实现幅移键控(ASK)和二进制启闭键控(OOK)二元调制,而且可以实现多进制正交幅度调制(MQAM)、多进制数字相位调制(MPSK)多元调制^[1-2]。

日本早在2006年,在载波频率为0.12 THz的单路通信系统中,通信速率达到10 Gbit/s^[3];在2010年,日本NTT已研发出0.25 THz室内通信实验系统,它的通信距离是0.5 m,通信速率已实现8 Gbit/s。

近些年来,微波光子学中光电结合方式的太赫兹通信不断朝着超高速率方向发展,例如:2014年法国国家科学研究院采用微波光子学的方法研制了在400 GHz数据速率上高达46 Gbit/s的THz无线传输系统^[4];2015年柏林城市大学和伦敦大学采用光梳状源实现了微波光子学方式的多载波太赫兹通信系统,进行了三载波10 Gbit/s的正交相移键控(QPSK)太赫兹无线通信传输^[5]。该系统优势在于:传输速率高,带宽利用率高;但是由于发射功率仅为微瓦级,并且系统体积和能耗均较高,虽然在地面短距离高速通信方面有优势,但难以适合应用于远距离空间信息网络系统。

全固态混频电子学方式的太赫

兹通信系统是利用混频器将基带或中频调制信号搬移到太赫兹频段。由于采用全电子学的混频器、倍频器等,射频前端易于集成和小型化。

NTT应用该系统在2008年北京奥运会上进行了Full-HD信号的传送,该系统可实现最大通信距离达3~4 km,其全电子系统可实现的通信距离为2 km。2009年,系统中所有的光激性器件均换成了InP HEMT MMICs,该系统最大数据传输速率为11.1 Gbit/s,从而实现了大于800 m、10 Gbit/s信号的无误传输。

2010年,NTT实验室再次对该系统进行改进,新系统将抑制震荡的电阻片替换成新型鳍线正交模态收发转换器(OMT),并通过减小鳍线长度来实现对震荡的抑制。由于鳍线OMT的使用,新的双向通信系统实现了10 Gbit/s的双向数据传输率以及20 Gbit/s的单向数据传输率。

2011年,德国弗劳恩霍夫应用固体物理研究所(IAF)、卡尔斯鲁厄理工学院(KIT)搭建了一套0.22 THz无线通信演示系统^[7],具体如图1所示。在输出功率约为1.4 mW,采用16/64/128/256正交幅度调制QAM、OOK等调制方式时,实现12.5 Gbit/s、传输距离2 m的通信演示实验,并完成太赫兹波在纯净大气、大雨和大雾天的衰减测试。2012年,他们对该系统进行了适当的系列改进,实现了

15 Gbit/s、20 m和25 Gbit/s、10 m的通信演示实验^[8-9]。2013年,该研究所实现传输速率40 Gbit/s、通信距离1 km的无线通信世界新纪录,并在容量上实现了与光纤的无缝连接^[10]。

2015年,加利福尼亚大学设计了一个非相干的140 GHz收发器和一个采用65 nm互补金属氧化物半导体(CMOS)技术的太赫兹发生器,集成了数据速率为2.5 Gbit/s的太赫兹通信系统^[11]。同年,加州大学伯克利分校采用65 nm CMOS技术设计了一个240 GHz的收发系统,实现了10 Gbit/s的数据速率,其最大数据传输速率可达16 Gbit/s^[12]。

2015年,圣何塞州立大学采用了40 nm CMOS的技术集成了210 GHz OOK调制方式的无线通信系统,该系统能够实现了无差错的伪随机数据在1 cm范围内的传输,传输速率为10.7 Gbit/s^[13]。2016年,德国伍珀塔尔大学提出了一种工作在240 GHz的、全集成式直接转换正交发射机和接收机芯片组,该芯片组采用0.13 μm SiGe双极CMOS工艺,最高通信速率可达到2.73 Gbit/s^[14]。

目前,该方式太赫兹通信系统具有体积小、易集成、功耗低的特点,不足之处在于本振源经过多次倍频后相噪恶化,且变频损耗大,载波信号的输出功率在微瓦级,因此该类系统需要进一步发展高增益宽频带功率

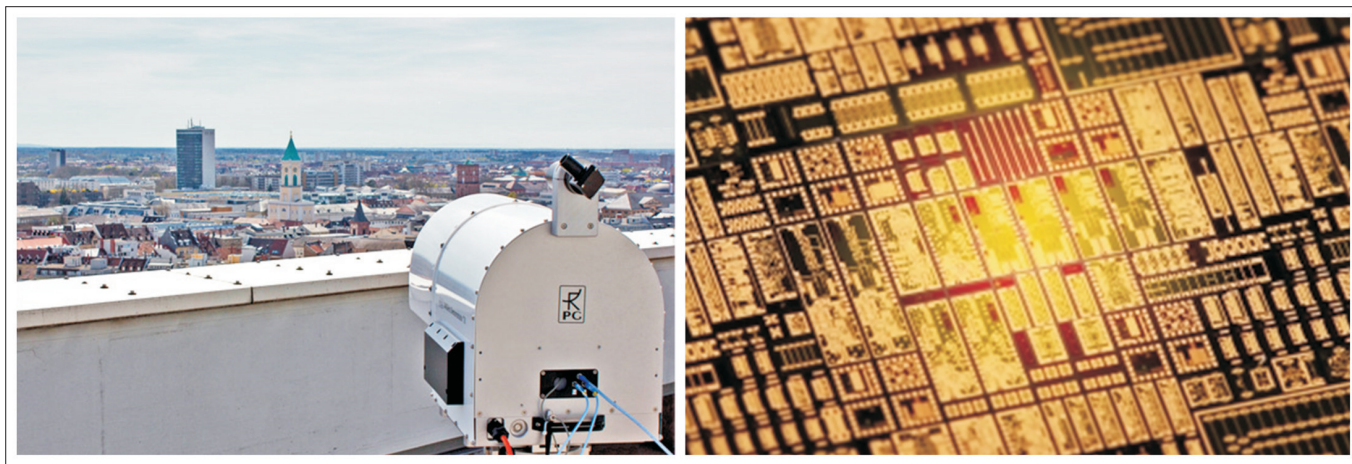
放大器以提高发射功率。

基于直接调制方式的太赫兹通信系统是近年来随着太赫兹调制器速率突破衍生发展的新一类通信系统^[15-18]。这种通信方案的核心关键技术为高速调制器,需要实现太赫兹波幅度或相位直接调制,其优势在于易于集成、体积小、灵活性大,可随意选择载波频率、太赫兹源功率,是可搭配中高功率太赫兹源实现10 mW以上功率输出的通信系统,可实现中远距离无线通信;不足之处在于目前太赫兹直接调制器还在研究中,还未突破10 Gbit/s以上的太赫兹直接调制器。目前中国的电子科技大学已经掌握了该技术的核心方案,在国际上首次突破1 Gbit/s的太赫兹直接调制器。

4 中国太赫兹通信技术发展现状

中国政府各级部门十分重视太赫兹科学技术的发展,多个部委设立了太赫兹的相关研究计划。在国家的支持下,通过10余年的发展,中国已经形成了一支以高校、科研院所为主体的太赫兹技术创新研发队伍。在太赫兹通信技术的方向上,电子科技大学等多家单位取得了较为突出的成果。

2015—2016年间,电子科技大学研制出了中国首套地面实时传输裸



▲图1 德国卡尔斯鲁厄理工学院研制的太赫兹通信系统^[14]

眼 3D 业务的太赫兹通信系统,该系统工作频率为 0.22 THz,并基于 QPSK 直接调制解调的方式,调制解调器采用 0.22 THz 分谐波混频器,基带信号由码型发生器产生,经混频器中频端口馈入,调制到 0.22 THz 载波频率后通过喇叭天线发射,已调信号经接收端混频器相干解调后送至误码分析仪进行误码分析。该系统可以实现 10 Gbit/s 实时高速数据通信,有较好的误码性能^[1],平均误码率小于 10^{-6} 。该系统目前采用相干接收技术和大口径天线已实现了 0.2 km 距离传输,为高速中远距离无线通信打下了重要基础。

2016 年,电子科技大学率先在国际上研制出了首套直接调制方式的太赫兹通信系统,并实现了千米级高清视频传输。该系统采用外部高速调制器直接对空间传输太赫兹信号进行调制,这种调制方式较现有的太赫兹通信方式,具有可灵活搭配中高功率太赫兹辐射源实现远距离通信的优点,有效突破了目前太赫兹通信系统中承载发射功率过低的问题。目前,该系统实现了 0.34 THz 工作频率吉比特每秒的高清视频业务数据传输。

另外,湖南大学在 100 GHz 频段,用基于光电结合的方式实现高速实时数据通信。发射端采用光电二极管产生 100 GHz 高频载波,接收端通过分谐波混频器进行相干解调,实现了速率达 6 Gbit/s 的通信。上海微系统所采用量子级联激光器已实现了 3.1 THz、传输速率为 100 Mbit/s 的演示系统。

系列性的成果为中国太赫兹通信技术积累了良好的核心元器件技术和系统的基础,也为空间太赫兹测控技术的研究打下了良好的基础。

随着其他各国对太赫兹技术的加大投入,使得中国太赫兹通信技术发展面临着严峻的挑战,例如:欧盟 2017 年成立的由德国、希腊、芬兰、葡萄牙、英国等跨国 TERRANOVA 计

划,明确提出研发超高速太赫兹创新无线通信技术。

5 发展具有自主知识产权太赫兹通信技术建议及思考

(1) 大力发展高性能太赫兹核心芯片和器件

太赫兹通信技术是一个跨学科、跨专业的复合型技术领域,不仅需要通信技术和突破,还需要高性能器件做支撑。因此,发展太赫兹通信技术必须要突破高性能器件技术,这亟需政府在研发上加大支持力度。特别是要在大功率 GaN 太赫兹二极管的制备、大功率太赫兹固态电子放大器、高效率太赫兹倍频器、混频器、高速高效太赫兹调制器、高增益太赫兹天线、高灵敏太赫兹相干接收器件以及太赫兹高速基带等研究方向上加大投入,争取尽快取得突破,解决当前发展瓶颈。建议设立太赫兹通信关键器件的研究专项,重点支持高性能太赫兹固态电子学信号源、太赫兹放大器、太赫兹调制器、太赫兹接收器件等的研制,以尽快提高中国太赫兹通信技术核心元器件的研究水平,确保太赫兹高速无线通信系统元器件的自在可控。

(2) 构建全国开放的高性能太赫兹通信技术测试平台和大型全国性研究发展计划

高性能太赫兹通信技术测试平台对于太赫兹通信用器件的测试、联试,对于发展太赫兹通信技术至关重要。然而,太赫兹测试设备价格昂贵,太赫兹通信系统的集成和联试又需要多台设备并行使用,单一研究单位难以搭建全面、高性能的测试平台。建议建立全国性的、开放的高性能太赫兹通信技术测试平台,形成完整的测试设备链路,为太赫兹通信技术的发展提供保障。

(3) 立项国家重大科研计划支持太赫兹通信技术和系统研究

中国多个部委都设立了与太赫兹通信技术相关的项目,但是支持力度仍远低于发达国家。针对目前中国太赫兹通信技术现有的发展水平与能力,建议由国家科技部门牵头设立一个大型的全国性太赫兹通信技术研究计划,进一步加大投入力度,中国将极有可能在该领域实现弯道超车,赶超国际先进水平。

6 结束语

太赫兹通信具有高速数据无线传输能力、强通信跟踪捕获能力、高保密性等优点,是发展未来 Beyond 5G 大容量数据最重要技术手段,是推动、发展新一代高速大容量无线通信的重要基础,对于发展中国先进科学技术,提升中国科技创新能力具有重大的战略意义。

参考文献

- [1] ITO H, NAKAJIMA F, FURUTA T, et al. Continuous THz-Wave Generation Using Antenna-Integrated Uni-Travelling-Carrier Photodiodes[J]. Semiconductor Science and Technology, 2005, 20(7): S191-S198
- [2] ANDREAS S, SEBASTIAN B, PAUL J C, et al. Millimeter-Wave Photonic Components for Broadband Wireless Systems [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(11): 3071-3082. DOI: 10.1109/TMTT.2010.2077470
- [3] 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. DOI: 10.1109/TMTT.2006.872798
- [4] DUCOURNAU G, SZRIFTGISER P, BECK A, et al. Ultrawide-Bandwidth Single-Channel 0.4-THz Wireless Link Combining Broadband Quasi-Optic Photomixer and Coherent Detection [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2014, 4(3): 328-337. DOI: 10.1109/TTHZ.2014.2309006
- [5] SHAO T, SHAMS H, ANANDARAJAH P M, et al. Phase Noise Investigation of Multicarrier Sub-THz Wireless Transmission System Based on an Injection-Locked Gain-Switched Laser [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2015, 5(4): 590-597. DOI: 10.1109/TTHZ.2015.2418996
- [6] JIA S, YU X, HU H, et al. 120 Gbit/s Multi-Channel THz Wireless Transmission and THz Receiver Performance Analysis [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, (99): 1-1. DOI: 10.1109/LPT.2016.2647280
- [7] KAALLFASS I, ANTES J, SCHNEIDER T, et al. All Active MMIC-Based Wireless Communication at 220 GHz [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and

- Technology, 2011, 1(2):477-487.DOI: 10.1109/TTHZ.2011.2160021
- [8] KALLFASS I, ANTES J, LOPEZ-DIAZ D, et al. Broadband Active Integrated Circuits for Terahertz Communication[C]//2012 18th European Wireless. Berlin: VDE-Verlag, 2012:1-5
- [9] ANTES J, KONIG S, LEUTHER A, et al. 220 GHz Wireless Data Transmission Experiments up to 30 Gbit/s[C]//IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. USA:IEEE,2012:1-3
- [10] KOENIG S, LOPEZ-DIAZ D, ANTES J, et al. Wireless Sub-THz Communication System with High Data Rate[J]. Nature Photonics, 2013, 7(12): 977-981. DOI: 10.1038/nphoton.2013.275
- [11] GU Q J. THz Interconnect: the Last Centimeter Communication [J]. Communications Magazine IEEE, 2015, 53(4):206-215. DOI: 10.1109/MCOM.2015.7081096
- [12] THYAGARAJAN S V, KANG S, NIKNEJAD A M. A 240GHz Wideband QPSK Receiver in 65nm CMOS[C]//Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. USA: IEEE, 2014:357-360. DOI: 10.1109/RFIC.2014.6851741
- [13] MOGHADAMI S, HAJILOU F, AGRAWAL P, et al. A 210 GHz Fully-Integrated OOK Transceiver for Short-Range Wireless Chip-to-Chip Communication in 40 nm CMOS Technology [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2015, 5(5): 737-741.DOI: 10.1109/TTHZ.2015.2459673
- [14] SARMAH N, GRZYB J, STATMOLPV K, et al. A Fully Integrated 240-GHz Direct-Conversion Quadrature Transmitter and Receiver Chipset in SiGe Technology [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2016, 64(2):562-574.DOI: 10.1109/TMTT.2015.2504930
- [15] ISHIGAKI K, SHIRAISHI M, SUZUKI S, et al. Direct Intensity Modulation and Wireless Data Transmission Characteristics of Terahertz-Oscillating Resonant Tunneling Diodes [J]. Electronics Letters, 2012,48(10): 582-U98
- [16] OROJASHI N, SUZUKI S, ASADA M. One THz Harmonic Oscillation of Resonant Tunneling Diodes[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(23): 233501
- [17] TAN Z, CHEN Z, CAO J, et al. Wireless Terahertz Light Transmission based on Digitally-Modulated Terahertz Quantum-Cascade Laser[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(3): 031403
- [18] GRANT P D, LAFRAMBOISE S R, DUDEK R, et al. Terahertz Free Space Communications Demonstration with Quantum Cascade Laser and Quantum Well Photodetector[J]. Electronics Letters, 2009, 45(18): 952-953
- [19] CHEN Z, ZHANG B, ZHANG Y, et al. 220 GHz Outdoor Wireless Communication System Based on A Schottky-Diode Transceiver[J]. Leice Electronics Express, 2016, 13(9):9. DOI: 10.1587/elex.13.20160282
- [20] YUAN W, WANG H, LI H, et al. 0.3THz Wireless Communication Systems for Space Applications[C]// Proceedings Volume 9795, Selected Papers of the Photoelectronic Technology Committee Conferences held June-July 2015. International Society for Optics and Photonics. China: SPIE, 2015:97953A. DOI: 10.1117/12.2211206

作者简介



陈智, 电子科技大学教授、博士生导师; 主要从事太赫兹通信、无线与移动通信的研究工作。



张雅鑫, 电子科技大学教授、博士生导师; 主要从事太赫兹调制和射频器件的研究工作。



李少谦, 电子科技大学教授、博导, IEEE Fellow, 通信抗干扰技术国家重点实验室主任, 国家新一代宽带无线移动通信网重大专项总体组成员, 国家“863”计划5G重大项目总体组成员, 国家“973”计划咨询专家组成员, 国家通信与网络重点研发计划专家组成员, 工信部通信科技委委员; 主要研究方向为无线与移动通信技术; 主持完成了30余项国家级科研项目, 获国家、国防和省部级科技奖7次; 获专利授权50余项, 发表论文100余篇, 出版专著多部。