

太赫兹通信关键技术与发展愿景

Key Technology and Development Vision of Terahertz Communication

马静艳,张忠皓,李福昌,高 帅,延凯悦(中国联通网络技术研究院,北京 100048)

Ma Jingyan,Zhang Zhonghao,Li Fuchang,Gao Shuai,Yan Kaiyue(China Unicom Network Technology Research Institute, Beijing 100048,China)

摘 要:

6G研究已启动,太赫兹通信技术以其支持超大带宽资源和超高通信速率等技术特点成为未来6G愿景实现的关键候选技术。从太赫兹通信技术特点出发,讨论了太赫兹通信未来可能的应用场景,系统分析了太赫兹通信的关键技术方向、产业发展现状与面临挑战,最后提出了未来太赫兹通信技术的目标愿景与发展建议。

关键词:

太赫兹通信;应用场景;关键技术与挑战;发展愿景

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2020.04.001

文章编号:1007-3043(2020)04-0001-05

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

6G research has been started. Terahertz communication technology has become a key candidate technology for the realization of 6G vision in the future due to its technical characteristics such as supporting ultra wide bandwidth resources and ultra-high communication rate. Starting from the characteristics of terahertz communication technology, it discusses the possible application scenarios of terahertz communication in the future, systematically analyzes the key technical direction, industrial development status and challenges of terahertz communication, and finally it puts forward the target vision and development suggestions of terahertz communication technology in the future.

Keywords:

Terahertz communication; Application scenarios; Key technologies and challenges; Development vision

引用格式:马静艳,张忠皓,李福昌,等. 太赫兹通信关键技术与发展愿景[J]. 邮电设计技术,2020(4):1-5.

0 引言

随着5G商用启动,产业界对未来5G/6G技术研发工作日趋关注。2019年3月,芬兰奥卢大学6G Flagship在芬兰举行了首届6G无线峰会,基于参会专家讨论和分享的观点,2019年9月发布了全球首个6G白皮书^[1],内容涵盖6G的关键驱动因素、演进要求、挑战和研究问题等。2019年11月3日,我国科技部召集发改委、工信部、教育部、中科院,自然科学基金委等单位,成立了国家6G技术研发推进工作组和总体专家

组,举行了6G研究启动仪式,标志着我国6G技术研发工作的正式启动。

6G Flagship白皮书^[1]认为,未来6G通信愿景的特征是“泛在”“无线”“智能”,未来6G可以提供无缝覆盖的泛在无线连接,提供情景感知的智能服务等应用。目前形成广泛共识的6G愿景至少需要包含以下几个特征:与AI技术深度融合,峰值速率达到Tbit/s,会采用新型的多址和编码技术,会有空天地海多维度一体化通信以及从宏观到微观的多尺度通信等等。实现上述愿景需要各个方向的关键技术的突破和支撑,目前6G技术研究仍处于探索起步阶段,技术路线尚不明确,关键指标和应用场景还未有统一的定义,

收稿日期:2020-02-28

但是业界基本能够达成共识的是:太赫兹通信作为新型频谱技术,将会是6G愿景实现的关键底层技术。

太赫兹波是指频段在0.1~10 THz,波长为30~3 000 μm的电磁波。该频段电磁波位于微波波段和可见光波段之间,低频段部分与毫米波段有部分重合。太赫兹频段电磁波在频带资源等方面的独有特性,使其成为适合未来6G通信的关键支撑技术。为尽可能发挥运营商的需求牵引作用,加速和推动太赫兹通信技术产业链发展,本文将从太赫兹通信技术特点出发,围绕太赫兹通信应用场景,关键技术及挑战、发展愿景等方面展开探讨。

1 太赫兹通信技术特点

1.1 支持超大工作带宽和超高通信速率

现阶段5G高频毫米波支持的最大工作带宽为800 MHz,目前业界的实验测试下行峰值速率最高在10 Gbit/s左右。超高通信速率的实现离不开超大工作带宽的支持。与已经广泛应用的微波频段通信相比,太赫兹频段具有非常丰富的频率资源,可利用的工作带宽可能高达十几甚至几十GHz,目前国内外已实现的太赫兹通信原型验证系统的工作带宽一般都大于2 GHz^[2-12],远远大于现阶段5G通信系统的工作带宽。

超大带宽资源的利用使得太赫兹通信系统可以支持超高的通信速率,目前工作频段在300 GHz以下太赫兹通信支持的最高速率可达100 Gbit/s,预计未来6G应用时太赫兹通信速率可能达到太比特量级,而支持超大工作带宽和超高通信速率将会是太赫兹通信最显著的技术特征和性能优势。

1.2 传播损耗和穿透损耗大

太赫兹频段的频率比毫米波更高,依据电磁波的传播特性,这个频段的传播与穿透损耗也比较大。根据自由空间损耗Friis计算公式^[13]:

$$L_{FS} = 32.4 + 20\log f + 20\log d - G_{Tx} - G_{Rx} \quad (1)$$

根据式(1),可以得到在自由空间传播时,1 THz以下太赫兹频段的电磁波相对于26 GHz毫米波频段粗略的路损差,如图1所示。

由图1可以看出,不考虑水分子和氧气吸收带的情况下,自由空间传播时1 THz以下太赫兹频段相对26 GHz毫米波的路径损耗增加了10~35 dB。因此在发射和接收增益受限的情景下,太赫兹频段的通信系统覆盖距离会大大缩短,并且穿透和绕射能力较差,所以更适合用于室内短距高速通信,需要其他覆盖增

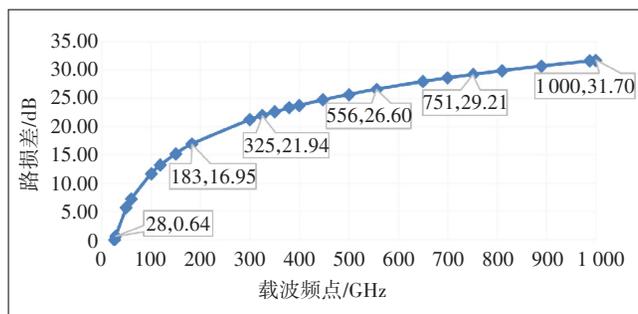


图1 太赫兹频段与毫米波26 GHz频点自由空间传播路损差

强类技术来满足室外远距离覆盖要求。

1.3 支持大规模天线技术

大规模天线阵列的应用是5G通信的一个技术特点,尤其是在高频段毫米波的应用带来了众多应用优势。太赫兹频段频率远大于毫米波段,随着频率增加,天线尺寸越来越小,根据全球首个6G白皮书预估^[1],随着技术的发展,当频段到250 GHz,4 cm²的面积可能安装超过1 000个天线。而且由于太赫兹频段的路径传播损耗较大,未来太赫兹通信系统极有可能会采用超大规模天线技术来实现室外或较远距离的增强覆盖。超大规模天线技术的应用除了增强通信覆盖距离外,还可以用于支持超窄波束赋形,超高角度分辨率和超高定位精度性能,未来6G通信的室内定位精度可能达到厘米量级^[1]。

2 太赫兹通信应用场景探讨

2.1 无线接入、光纤替代

太赫兹通信具有超高通信速率和传播损耗较大等技术特点,使其比较适用于短距无线通信等应用场景,比如用于为热点地区提供超高速网络覆盖,用于实现需要超高数据率支持的全息通信,用于数据中心超高速通信等,另外还可以考虑用于代替光纤或电缆实现基站数据的高速回传,节省光纤部署成本;用太赫兹无线链路做固定无线接入,实现无线家宽业务;在沙漠、河流等无法部署光纤的地方应用太赫兹无线链路实现高速数据传输,作为光纤的延伸等应用。

无线接入和光纤替代的场景应用也是现阶段5G高频毫米波的重要应用场景,由于太赫兹可以支持的通信速率会远远大于毫米波频段,所以太赫兹通信该类场景的应用可视为毫米波通信的一个未来增强版,用于适应6G应用的能力需求。

2.2 空天地海一体化通信

太赫兹频段电磁波在外层空间可以进行无损传

输,用较小发射功率实现远距离通信。因此太赫兹可广泛应用于空间通信场景,比如卫星之间的高速通信,星地之间的高速通信等。太赫兹波长较短,天线系统可以实现小型化、平面化,还可以穿透通信黑障。随着太赫兹通信技术的持续发展,太赫兹通信系统可以通过搭载卫星、无人机、飞艇等天基平台和空基平台,做为无线通信和中继设备,应用于卫星集群间、天地间和千公里以上的星间高速通信,实现未来的空地海一体化通信。

2.3 微小尺度通信

太赫兹波长极短,有望实现毫微尺寸的收发设备和组件。随着石墨烯等新型材料研究的兴起,太赫兹通信除了传统的宏观尺度应用,还有望作为无线纳米网络通信频段,用以实现微小尺度的各种通信应用场景,比如可用于健康监测系统的可穿戴或植入式太赫兹设备,纳米传感器体域网,纳米传感器物联网,以及可用于芯片的高速数据传输的片上/片间无线通信等^[14]。这些未来的可能应用场景需要通过石墨烯等新型材料和工艺技术的突破来实现^[15]。

3 太赫兹通信关键技术

3.1 太赫兹关键器件与原型系统

太赫兹关键器件/芯片/组件的研产能力是目前太赫兹通信最关键的核心理技术,也是太赫兹通信应用面临的巨大挑战。

模拟链路相关的高频模拟分立器件,包括太赫兹功率放大器、太赫兹天线、太赫兹倍频器、太赫兹混频器、太赫兹滤波器、太赫兹低噪放等。国内对于太赫兹通信关键器件的研发能力接近国际领先水平,但是面向未来实际应用还需要在功率发射能力,工作环境,变频损耗、功耗等方面实现性能的不不断提升。另外未来系统链路的芯片集成化是必然发展趋势,需要实现核心技术的不断突破进展。

除了模拟链路系统的集成芯片,太赫兹通信未来实际应用还面临超宽带数模和模数转换芯片、数字基带处理芯片等方面的技术挑战。由于太赫兹可用带宽(>2 GHz)远大于4G、5G系统使用的工作带(<800 MHz),目前的主流数模和模数转换芯片很难满足采样带宽的要求,另外超大带宽信号的处理也会给基带处理芯片带来非常大的功耗压力。因此一方面需要研发更高采样速率的超大带宽数模和模数转换芯片、低功耗基带处理芯片;另一方面是研发低量化精度信号

处理系统。未来的太赫兹通信系统的实现可能需要2个方向的技术结合来解决数模转换和基带处理问题。

目前国内的太赫兹通信关键分立部件及原型验证系统的研发能力与国际先进水平接近,芯片能力较弱,国内相关方向研究成果多集中于高校和研究院所等科研机构,产业成熟度低。目前国内的太赫兹通信原型系统多为无线传输能力的验证,到未来实际应用还需要考虑通信距离、实时性、空分复用、功耗和成本等方面的能力指标。太赫兹通信关键核心器件/芯片性能指标的突破进展,相关产业链的成熟发展,是上述能力实现的必要条件和保证。

3.2 太赫兹传播特性和信道建模

太赫兹的电磁波对陶瓷、纸张、木材、纺织品和塑料等介质材料可以轻易穿透,但很难穿透金属和水。在大气环境下,高自由空间损耗以及大气效应引起的额外衰减是一个巨大的挑战,在不同的天气条件下,如大气分子、雨滴或雾滴,都可能导致太赫兹波段电磁波的高衰减或散射。然而在某些确定的太赫兹窗口频段处依旧可以产生较低的衰减,可用于无线通信传输。对太赫兹在晴朗空气、雨天、雾天等场景的链路损耗等传播特性的研究已有较多成果发表^[16]。

太赫兹信道模型建模方法一般有参数化统计信道建模、确定性信道建模和参数化半确定性建模等3种类型。基于太赫兹通信的一些室内场景的实验测试结果显示,太赫兹信道传播路径稀疏性较强,未来太赫兹通信的信道建模更倾向于使用确定性信道建模或参数化半确定性信道建模方法,比如射线追踪方法,以及结合确定性和统计特性的数字地图混合建模方法等。

太赫兹波传播特性和信道建模会直接影响太赫兹通信实际应用场景的部署,是实现太赫兹通信应用的基础研究。未来太赫兹通信可能会用于空地海多维度、宏观到微观多尺度的多样化应用场景,太赫兹通信信道建模需要探讨和研究各种不同应用场景下的信道传播模型,以应用于未来的实际场景部署。

3.3 太赫兹通信空口技术

与5G空口技术相比,太赫兹通信具有超大带宽的资源优势,但是现阶段太赫兹通信原型系统硬件链路也存在变频损耗较大、采样带宽受限、基带处理功耗大等不理想因素。太赫兹通信空口技术除了在基带波形设计、帧结构和参数集的设计、调制编码、波束管理等技术链都面临新的演进要求外,受到太赫兹通信

硬件系统能力的影响,针对系统链路各种非理想特性和因素的算法设计和补偿也是太赫兹通信空口技术需要考虑和研究的技术方向。

太赫兹通信超高速率的特点与优势,除了需要硬件链路的传输能力以外,也需要通过空口技术的有效设计来保证和实现。包括频谱和带宽资源的动态配置、波束接入的智能管理以及高低频、空天地多维度、宏观到微观多尺度的空口协同和信息融合等。未来空口设计方案需要具有上述能力和特点才能适配6G太赫兹通信的技术特征和优势。目前6G技术研究仍处于探索起步阶段,技术路线尚不明确,需要产业界共同参与研究,并积极探讨,逐步厘清未来太赫兹通信空口技术路线和发展方向。

4 太赫兹通信产业现状与挑战

4.1 标准化进展

国际电信联盟ITU已经指定分配0.12 THz和0.22 THz频段分别用于下一代地面无线通信和卫星间通信。世界无线电大会WRC-2015第767号决议,确定了WRC-2019关于275~450 GHz频段用于陆地移动和固定业务的议程。2019年11月,WRC-2019会议议题1.15为275~450 GHz频率范围操作的陆地移动和固定业务应用确定频谱,如图2所示,新增275~296 GHz、306~313 GHz、318~333 GHz、356~450 GHz 4个全球标识的移动业务频段,并且出现了2个超大带宽频点275 GHz(252~296 GHz,带宽44 GHz,)和400 GHz(356~450 GHz,带宽94 GHz)。

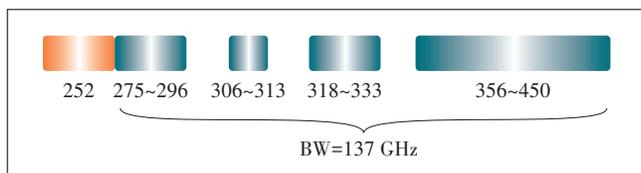


图2 WRC-2019议题1.15太赫兹频谱划分情况

美国电气电子工程师学会(IEEE)积极推进太赫兹通信的标准化工作。IEEE 802.15于2008年成立太赫兹兴趣小组(IG THz——THz Interest Group),重点关注在275~3 000 GHz频段运行的太赫兹通信和相关网络应用。IG THz专注于开放频谱问题、信道建模等技术的发展。IEEE 802.15于2013年7月成立研究组SG 100G,朝着制定新标准迈出了第1步。该研究组于2014年3月完成其工作,并建立了3d任务组。2017年,3d任务组发布了IEEE Std.802.15.3d-2017,该修订

案以IEEE Std. 802.15.3c为基础,定义了符合IEEE Std.802.15.3-2016的无线点对点物理层,其频率范围为252~325 GHz,是第1个工作在300 GHz的无线通信标准。

3GPP预计2023—2026年启动6G研究;2026—2028年启动6G标准研究。

4.2 产业链现状

美国、日本、欧盟等国际区域组织和国家对太赫兹通信技术发展十分重视,相关研究计划启动较早,并且在关键器件和原型系统方面都取得了众多成果和进展。美国太赫兹关键器件的产品种类和频段较为完备,产业链发展较成熟。2019年3月,美国联邦通信委员会FCC正式批准开放95 GHz~3 THz太赫兹频段用于6G实验。日本电报电话公司NTT 2006年实现了频率0.12 THz、传输距离15 km的太赫兹无线通信演示系统,完成世界上首例太赫兹通信演示,并在2008年成功应用于北京奥运会的高清转播。

2005年,我国科技部、中国科学院、国家自然科学基金委员会在香山联合召开以“太赫兹科学技术”为主题的科学会议,标志着中国太赫兹研究战略的启动。随后启动了众多太赫兹通信技术方向的国家重大专项课题,旨在突破太赫兹关键技术及相关功能器件,完成原理验证系统和实验验证。国内科研机构也在政策支持下取得了众多进展和成果,但是目前研究成果多为学研机构的关键分立器件和原型系统演示,在芯片集成、能耗和成本等方面与产业成熟还存在较远距离,处于技术研发较前沿、产业化落后的现状。太赫兹通信的产业化落后主要有2个方面因素。

a) 起步晚、基础差。我国半导体和射频器件产业起步晚,产业化程度低,在化合物半导体材料等基础领域技术落后、产能不足。缺乏先进成熟的半导体制造工艺,核心器件尤其是高频模拟器件是通信产业短板。此外我国的高频器件和芯片技术一直面临国外的严密专利布局和技术封锁,限制了我国太赫兹通信关键器件研产能力和发展水平。

b) 市场需求不迫切。随着5G商用化进展,国内企业在毫米波段高频器件方向不断有蓄力突破的规划和行动。相比毫米波段高频器件,太赫兹频段通信类器件由于行业需求迫切程度较低,产业热度不高。太赫兹通信关键器件方面国内技术进展和成果多为学研类机构,器件厂商、设备厂商和运营商参与程度低,缺少应用需求的牵引,从而缺少产业化动力和方

向,无法有效推动产业化进展和构建产业生态。

5 太赫兹通信目标愿景与发展建议

未来6G通信中,太赫兹通信技术将与其他低频段网络融合组网,广泛应用于地面的各种超宽带无线接入和光纤替代场景,搭载卫星、无人机、飞艇等平台,做为无线中继设备,应用于空天地海多维度一体化通信,应用于从宏观到微观的多尺度通信,成为未来社会信息融合连接的重要支撑技术。愿景的实现需要太赫兹通信各项关键技术的不断突破和进展、技术标准化和产业链的日趋成熟。国家需要提前布局,抓紧未来5~10年的产业发展窗口期,在政策支持和产业引导等方面加大支持力度,进行倾向性布局,不断增强自主创新研发能力和核心竞争力,推动太赫兹通信技术产业化发展。

政策扶持方面,需要国家继续加大对太赫兹通信技术相关课题和项目的投入和支持,并开始在学研类课题基础上逐步增加示范类应用要求,鼓励支持器件厂商、设备厂商和运营商等产业链角色的加入,基于应用需求布局课题项目研究,促进产学研用结合,推动产业发展。除了与关键器件和系统相关的技术研究,也需要启动太赫兹通信空口技术相关的课题研究,鼓励和支持该方向相关技术专利和标准的输出,为我国在未来6G通信的技术专利和标准化布局做好技术储备。

产业引导方面,支持和鼓励设备厂商和运营商尽早明确应用场景和技术需求,以应用需求为牵引,促进产业上下游协同合作,构建密切合作、互利共赢的生态体系,实现太赫兹通信各项关键技术的不断突破和进展,技术标准化和产业链的日趋成熟,应用场景部署方案的逐步成型,太赫兹通信技术的应用落地,共同推动太赫兹通信产业的成熟发展。

参考文献:

[1] 6G Flagship University of Oulu. Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence [EB/OL]. [2019-12-26]. <https://www.electronicsonline.net.au/content/business/article>.

[2] MOELLER L, FEDERICI J, SU K. 2.5Gbit/s duobinary signalling with narrow bandwidth 0.625 terahertz source [J]. Electronics Letters, 2011, 47(15): 856-858.

[3] THYAGARAJAN S V, KANG S, NIKNEJAD A M. A 240GHz wide-band QPSK receiver in 65nm CMOS[C]//Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. USA: IEEE, 2014: 357-360.

[4] 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.

[5] KALLFASS I, ANTES J, SCHNEIDER T, et al. All active MMIC-Based wireless communication at 220 GHz [J]. IEEE Trans. on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(2): 477-487.

[6] ANTES J, KONIG S, LEUTHER A, et al. 220 GHz wireless data transmission experiments up to 30 Gbit/s [J]. IEEE Mtt S International Microwave Symposium Digest IEEE Mtt S International Microwave Symposium, 2012: 1-3.

[7] 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.

[8] 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.

[9] DENG X J, WANG C, LIN C X, et al. Experimental research on 0.14 THz super high speed wireless communication system [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(6): 1430-1432.

[10] WANG C, LU B, LIN C X, 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.

[11] 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.

[12] 张健, 邓贤进, 王成, 等. 太赫兹高速无线通信: 体制、技术与验证系统 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(1): 1-13.

[13] FRIIS H T. A note on a simple transmission formula [J]. Proceedings of the IRE, 1946, 34(5): 254-256.

[14] AKYILDIZ I F, JORNET J M, HAN C. Terahertz band: Next frontier for wireless communications [J]. Physical Communication, 2014, 12(9): 16-32.

[15] 李少谦, 陈智, 文岐业, 等. 太赫兹通信技术导论 [M]. 国防工业出版社, 2015

[16] LIEBE H J. MPM—An atmospheric millimeter-wave propagation model [J]. International Journal of Infrared and millimeter waves, 1989, 10(6): 631-650.

作者简介:

马静艳, 工程师, 博士, 主要研究方向为太赫兹、毫米波、5G通信等; 张忠皓, 教授级高级工程师, 北京邮电大学兼职教授, 博士, 主要从事移动网无线新技术相关课题研究、标准制定、设备验证和新业务研究工作; 李福昌, 教授级高级工程师, 国家知识产权局中国专利审查技术专家, 博士, 主要从事移动通信及固网移动融合等专业的标准制定、测试验证、课题研究等工作; 高帅, 工程师, 硕士, 主要研究方向为毫米波、太赫兹、MEC、5G通信等; 延凯悦, 工程师, 硕士, 主要研究方向为毫米波、MEC、5G通信等。