

关于毫米波与太赫兹通信的思考

Thoughts on Millimeter Wave and Terahertz Communications

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 03-0039-004

摘要: 认为毫米波多通道高集成度芯片和多通道高速基带处理芯片的发展日新月异,毫米波正在逐渐成为支撑第5代移动通信(5G)、超高速短距无线接入、空联网(IoS)等的共性技术,而且还在往更高的太赫兹频段扩展。随着这些技术的逐渐商用,它们将深刻改变人们的生活。针对毫米波与太赫兹通信做了评述,权当抛砖引玉。

关键词: 毫米波; 太赫兹; 无线通信

Abstract: It is considered that millimeter-wave multi-channel high-integration chip and multi-channel high-speed baseband processing chip are developing rapidly. Millimeter wave is becoming a generic technology for 5G wireless communications, high throughput short-range wireless access, Internet of Space (IoS), etc., and is also extending to THz frequency band. Therefore, some comments and predictions on millimeter wave and THz communications are presented in this paper for reference.

Keywords: millimeter wave; Terahertz; wireless communications

洪伟/HONG Wei

(东南大学, 江苏 南京 211189)
(Southeast University, Nanjing
211189, China)

1 毫米波与太赫兹通信

简介

在微波毫米波领域, 300 MHz ~ 26.5 GHz 定义为微波频段, 26.5 ~ 300 GHz 定义为毫米波频段。之所以以 26.5 GHz 作为分界点, 是由于毫米波 Ka-波段的定义为 26.5 ~ 40 GHz 所致。300 ~ 3 000 GHz 定义为亚毫米波频段, 微波领域一般认为 300 (0.3 THz) ~ 10 000 GHz (10 THz) 为太赫兹 (THz) 频段。在光学和物理界, 定义 100 ~ 10 000 GHz, 即 0.1 ~ 10 THz 为太赫兹频段^[1-4]。尽管不同领域对于毫米波和太赫兹频段的定义有所差异, 但对研究和应用没有实质性的影响。

收稿日期: 2018-05-10
网络出版日期: 2018-05-29

毫米波技术的研究历史已超过百年, 可追溯到 19 世纪末。但很长时间以来, 毫米波技术主要应用于军事、射电天文等领域。近年来, 随着 5G 的发展, 毫米波成为 5G 核心技术之一^[4-7]。5G 分低频段 (Sub-6 GHz) 和高频段 (毫米波), 低频段目标是支持 $n \times 1$ Gbit/s 的高速通信, 而毫米波频段支持 $n \times 10$ Gbit/s 的高速通信。在 3G、4G 网络中, 毫米波技术, 例如 40 GHz 频段和 80 GHz 频段 (E-Band) 的点对点高速传输系统, 已广泛应用于网络回传和前传。

据报道, 手机用户超过 50% 的流量是通过 Wi-Fi 获得的, 也就是说移动通信与无线局域网 (WLAN) 已深度融合。目前, Wi-Fi 主要使用的是 2.4 GHz 和 5.8 GHz 的工业、科学、医学 (ISM) 频段。为了支持移动用户更高的接入速率, 电气和电子工程师协

会 (IEEE) 802.11 标准组也在寻求毫米波解决方案, 如 60 GHz 频段的 IEEE 802.11ad、IEEE 802.11ay 和 IEEE 802.11aj (60 GHz), 以及中国主导的 IEEE 802.11aj (45 GHz)^[8-9]。超高吞吐率毫米波短距接入将是 5G/B5G 的一个重要的支撑技术或组成部分。

近年来, 以美国为首的西方国家正在快速布局高速卫星互联网或空联网 (IoS), 中国也在紧锣密鼓地发展以卫星网为基础的空天地海一体化通信网。虽然星座不同, 星数各异, 但是每颗星的吞吐总量大都在 10 Gbit/s 量级。为了支持如此高的吞吐量和高速组网, 宽带毫米波高速传输技术成为首选。近几年, 太赫兹通信也被不断提及, 甚至有人认为 6G 移动通信就是由毫米波向太赫兹扩展, 也有人认为 5G+IoS 就是 6G。当然, 现在说 6G 是什么还有点为时尚早, 随着新技术的不断涌现和人们对其逐渐形成共识, 6G 技术才会渐渐地明朗。

毫米波与太赫兹成像技术已在射电天文领域广泛应用, 近年来在机场安检、医学成像等领域也开始应用。毫米波雷达在军事领域、民用导航领域应用历史已很久。近年来, 汽

车自动驾驶的研究和试验已形成一股热潮,其核心技术包括传感器、高精度电子地图和人工智能(AI)等。其中,毫米波汽车雷达由于其作用距离远,测速、测角、测距精度高,全天候工作等优点将成为汽车辅助驾驶(ADAS)和汽车自动驾驶的最主要的传感器。这也将成为无线电设备继手机之后的又一个规模巨大的市场。将毫米波雷达与通信系统融合,在探测周围汽车的同时实现车间通信也是当前的一个热点研究课题。车联网(IoV)也是当前的一个热点领域,其目的是在车到万物(V2X)(这里V指车,X指路边基础设施、其他车辆、行人、云平台等)之间建立起智能交通管理和车辆智能化控制的一体化网络,相关标准有专用短程通信技术(DSRC)和长期演进(LTE)-V2X,主要在5.9 GHz频段。随着V2X交互信息量的增加,很可能需要增加毫米波频段。

当前太赫兹通信还处于萌芽状态,频谱规划、应用场景、核心元器件等都还处于研究探索阶段。我们知道,半导体功率器件的输出功率随着频率的提高而降低,接收机的噪声系数随着频率的升高而增大(恶化),而且集成电路,特别是可实现低成本高集成度的硅基集成电路还会受到截止频率(f_c)的限制。因此,太赫兹通信走向实用还需要相当长的一段时间。尽管如此,考虑到太赫兹频段蕴含的巨大频谱资源,探索、开发和应用太赫兹频谱资源是未来一个重要的方向。考虑到5G毫米波通信定位为 $n \times 10$ Gbit/s通信,太赫兹通信将定位于 $n \times 100$ Gbit/s通信。下一节将对毫米波与太赫兹通信再进一步作些阐述。

2 毫米波与太赫兹通信及其应用

2.1 5G毫米波通信

对于5G低频段(Sub-6 GHz),相

应的国际标准NR15已颁布,中国工信部也已批准3.3~3.6 GHz和4.8~5.0 GHz 2个5G使用频段。对于5G毫米波,目前还处于研究阶段,很多问题需要梳理清楚,但工信部已就24.75~27.5 GHz和37~42.5 GHz两个5G毫米波候选频段征求意见。众所周知,大规模多输入多输出(MIMO)是5G关键技术之一。相对于5G低频段而言,5G毫米波将面临很多技术方面的挑战和瓶颈问题。例如:全数字大规模MIMO阵列的几十到几百通道数和500 MHz以上的信道带宽将导致太比特每秒海量数据的实时处理问题;由于阵列天线单元间距二分之一波长的限制,在毫米波频段将不得不将天线和多通道毫米波收发信机一体化集成,这将导致测量方法以及测量规范的变革,而且需要在多通道(2/4/8/16/32/64通道)毫米波单芯片、封装技术以及封装天线等方面取得突破。目前,大部分单位研发的5G大规模MIMO系统是基于相控子阵的混合多波束阵,这本质上是一个折中方案。一方面,采用 m 个单元的相控子阵可将毫米波收发信机通道数从 N 减至 N/m ,从而大大降低成本、功耗、后端数字处理难度等;但另一方面,由于引入相控子阵,同一时间阵列多波束的覆盖范围也大大缩减^[9],需要通过时分相扫实现宽的覆盖范围,从而导致通信容量的大幅度下降。因此,随着集成电路的发展和系统集成技术的提高,5G毫米波最终应过渡到基于全数字多波束的大规模MIMO技术。此外,基于射频无源波束形成网络的多波束阵^[10]也是非常理想的实现大规模MIMO的技术,但对于高阶波束形成网络,如何降低其插入损耗是一个需要突破的瓶颈问题。

2.2 毫米波超高速短距无线通信

正如前面提到的,目前手机用户超过50%的流量是通过Wi-Fi获得的。因此,基于WLAN的高速短距接

入成为承载用户无线流量的主要手段。可以预见:5G及B5G系统中这一状况也将继续。1997年IEEE针对WLAN在2.4 GHz的ISM频段制定了第一个标准,即IEEE 802.11,之后陆续颁布了802.11a~n,传输速率基本上在几兆比特每秒到几十兆比特每秒。近年来又陆续推出或制订一些可支持吉比特每秒传输的标准,如802.11ac、802.11ad、802.11ay、802.11aj等,其中后3个标准都在毫米波频段。也就是说,为了支持更高速率(如: $n \times 1$ Gbit/s ~ $n \times 10$ Gbit/s)的无线接入,毫米波成为首选频段。

2010年,本文作者等提出了中国毫米波超高速近远程通信标准Q-LINKPAN建议,并带领中国无线个域网(CWPAN)标准化工作组下的SG5研究组开始该标准的研究与制订。2012年IEEE 802.11aj国际标准工作组成立,主要基于中国提出的45 GHz超高速短距接入(Q-LINKPAN的短距部分)和中国60 GHz短距接入制订一个新的标准,这也是IEEE 802.11家族中第一个由中国主导的标准。2013年工信部批准了9.5 GHz的频谱用于发展该标准(40.5~47 GHz、47.2~50.2 GHz)。2015年,科技部5G重大专项将该标准作为短距毫米波高速接入部分给予支持。2015年1月东南大学牵头的研究团队完成了IEEE 802.11aj(45 GHz)标准协议的物理层传输主体框架及媒体接入控制层主要技术,2018年5月IEEE 802.11aj国际标准正式发布。在该标准制订过程中,很多大学、研究所和企业的数以百计的人员做出了卓越的贡献,东南大学和中兴微通公司近百人的教师、工程师、研究生团队以及很多大学和研究所的科研人员为IEEE 802.11aj(45 GHz)的顺利完成付出了艰苦的劳动。

2.3 面向空联网的毫米波宽带高速传输技术

空联网(IoS)利用中低轨卫星网

实现全球无死角的高速覆盖,正在成为继物联网(IoT)之后的一个新的研究热点,鉴于其重大的军事意义和民用价值,欧美等发达国家已开始规划和部署高速空联网。例如:维珍、软银等公司投入建设的OneWeb低轨卫星网,计划在低地球轨道部署700多颗卫星,每颗星的吞吐率为6 Gbit/s,支持地面终端速率为50 Mbit/s。谷歌、SES、汇丰银行等投入建设的O3B中轨卫星网,计划在8 062 km轨道高度上部署16~24颗卫星,每颗星有10个可调波束,吞吐率达16 Gbit/s。SpaceX计划在1 000多千米和几百千米的近地轨道上发射4 425(也有报道说10 000)多颗卫星,构建高速空联网。

随着经济的发展,中国需逐步承担起大国的责任,高速空联网将是支撑中国全球战略的不可替代的基础条件。此外,中国南海、东海,以及很多偏远山区还没有实现有效的高速通信覆盖。因此,部署中国的高速空联网具有重大的战略意义。实际上,空天地海一体化通信在中国已越来越得到重视,很多研究单位也已积极开展相关工作。也就是说,中国在空联网方面起步不晚,抓住时机,则可像北斗一样,实现又一次跨越。

自1970年中国第一颗人造卫星发射以来的近半个世纪,卫星发射技术已趋于成熟,发展高速空联网的关键是高速数据传输与组网技术。OneWeb和O3B空联网中每颗卫星的吞吐率都接近或超过10 Gbit/s。为了支撑如此高的吞吐率或吉比特每秒量级的数据传输速率,大带宽的毫米波通信技术成为首选。此外,相较于微波低频段,毫米波系统和天线的体积、重量和功耗将大幅度减小,从而适合于中小卫星载荷。

应用于高速空联网的毫米波宽带高速传输技术主要包含以下关键技术:(1)毫米波宽带通信系统;(2)毫米波高集成度相控阵技术;(3)毫米波多通道单芯片集成技术(包括抗

辐照技术);(4)动态组网技术等。

有人认为,5G+IoS就是6G。且不说这个看法是否正确,但陆地通信向空天地海一体化通信发展的趋势是很明显的。因此,将5G核心技术融入IoS的系统设计和标准制订是有意义的。

2.4 毫米波与车联网

5G除了移动宽带增强(eMBB)延续传统之外,还增加了海量机器类通信(mMTC)和超可靠低时延通信(uRLLC)两个应用方向,涵盖了IoT、IoV、工业互联网等。关于IoV的定义说法不一,但基本上都包含了3个层面:数据采集、云中心和大数据分析。信息采集包括车载终端对自身环境和状态信息的采集,也应当包括道路基础设施对道路状况信息的采集等。采集手段包括视频、毫米波雷达、激光雷达、全球定位系统(GPS)等。毫米波雷达由于其成本低,测速、测距、测角精度高而被用作车载雷达、道路监测雷达(如卡口雷达)等。因此,从IoV信息采集角度讲,毫米波雷达是最重要的传感器之一。车载毫米波雷达使用频率主要集中在24 GHz和77 GHz两个频段,今后有可能逐渐过渡到76~81 GHz频段。

目前,车载毫米波雷达比较多采用调频连续波(FMCW)体制,其功能也比较清楚,就是测速、测距、测角,当然还要具备多目标跟踪能力。如果大量车辆安装毫米波FMCW雷达,人们自然会担心相互之间的干扰问题。从技术角度讲,由于车载毫米波FMCW雷达都采用相干检测,通过雷达信号处理基本上可滤除其他车辆雷达的非相干干扰信号。有人研究能否通过码分多址(CDMA)等技术进一步提高抗干扰能力,每一个雷达就像手机一样分配一个伪随机码,采用相关接收将自己发射并反射回来的信号检测出来。如果可以这样,那自然就会想到能否将车载雷达与车间

通信融合起来,同时实现雷达探测与低延时车到车(或端到端)通信,从而成为IoV的重要组成部分?因此,毫米波车载雷达与车间通信的融合设计将是今后一个重要的研究方向。

目前,关于IoV的标准主要有基于IEEE 802.11p和IEEE 1609的支持高速低延时的DSRC标准和3GPP的LTE-V2X标准,主要集中在5.9 GHz频段。随着5G特别是毫米波5G的到来,基于5G的IoV或V2X将支撑车辆海量采集数据量以及超高速率的通信。

2.5 太赫兹通信

虽然太赫兹具有可以覆盖0.1~10 THz的巨大频谱资源,但考虑到可实现性、成本、器件水平等因素,目前探索太赫兹通信还主要集中在0.1~0.5 THz频率范围。对于通信而言,大气吸收是选择合适频段的一个重要因素。我们知道,在0.1~0.5 THz频率范围内,120 GHz、180 GHz,以及325 GHz频段是大气吸收峰,每千米的吸收损耗高达十几到几十分贝。因此,选择通信频段时需要避开这些频率。140 GHz、220 GHz、300 GHz、400 GHz频段都是大气窗口频率,每千米大气吸收衰减大约几分贝,可以作为通信频段。实际上,在140 GHz、220 GHz频段开展通信研究已有几十年历史。近年来,300 GHz、400 GHz频段也不断成为高速通信研究的热点频段。

在毫米波频段还蕴藏着巨大的未被充分开发的频谱资源,现在就开始太赫兹通信研究是否为时过早?从学术角度而言,提早十年甚至几十年开始一个未来领域的探索研究是很正常的。那么,太赫兹通信与毫米波通信的定位必然会有差异。实际上,毫米波通信一般都是定位于 $n \times 10$ Gbit/s的高速率,而太赫兹通信将定位于 $n \times 100$ Gbit/s甚至Tbit/s的超高速通信。多年前,就有将太赫兹应用于星际通信的说法,其理由是带宽

大、尺寸小、大气层外无大气吸收损耗、天线容易获得 40 dB 以上的高增益等。近年来,开始讨论太赫兹超高速近距通信,以代替高速有线互连,如高速处理平台的背板,服务器无线互连等。至于太赫兹通信最终的核心应用是什么,还需要随着时间的推移逐渐显现。

3 结束语

到目前为止,关于毫米波与太赫兹通信还有一些争议,有相当一部分专家和单位对毫米波 5G 还持不乐观态度。但是,要看到毫米波多通道高集成度芯片和多通道高速基带处理芯片的发展日新月异。我们几年前面临的瓶颈问题正在被陆续克服(如已报道的 16 通道,每通道 ADC 采样率可达 2 GSa/s 的高速基带处理芯片等)。虽然我们还将面临很多挑战,但毫米波 5G、毫米波超高速短距接入(IEEE 802.11aj)、基于毫米波宽带传输的 IoS,甚至太赫兹通信都可能比我们预测的来得还要早,而随着这些技术的逐渐商用,将会深刻改变人

们的生活。

参考文献

- [1] LIU S G. Recent Development of Terahertz Science and Technology [J]. China Basic Science, 2006, 142(12): 7-12
- [2] YAO J Q, LU Y, ZHANG B G, et al. New Research Progress of THz Radiation[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2005, 16(4): 503-510
- [3] SIEGEL P. Terahertz Technology [J]. IEEE Transactions on Microwave and Theory Techniques, 2002, 50: 910-928
- [4] 洪伟、余超、陈继新,等. 毫米波与太赫兹技术 [J]. 中国科学:信息科学, 2016, 46(8): 1086-1107
- [5] HONG W, JIANG Z H, YU C, et al. Multibeam Antenna Technology for 5G Wireless Communications[J]. IEEE Transactions on AP, 2017, 65(12): 6231-6249. DOI: 10.1109/TAP.2017.2712819
- [6] PI Z, KHAN F. An Introduction to Millimeter-Wave Mobile Broadband Systems [J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(6): 101-107. DOI: 10.1109/MCOM.2011.5783993
- [7] HOSSAIN E, HASAN M. 5G Cellular: Key Enabling Technologies and Research Challenges [J]. IEEE Instrument Measurement Magazine, 2015, 18(3): 11-21. DOI: 10.1109/MIM.2015.7108393
- [8] HONG W, HE S W, WANG H M, et al. An Overview of China Millimeter-Wave Multiple Gigabit Wireless Local Area Network System [J]. IEICE Transaction Communications, 2018, E101-B(2): 262-276. DOI: 10.1587/transcom.2017IS10004
- [9] HONG W, WANG H M, CHEN J X, et al. Recent Advances in Q-LINKPAN/IEEE

802.11aj (45GHz) Millimeter Wave Communication Technologies[C]//Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). South Korea: Seoul, 2013, 227-229. DOI: 10.1109/APMC.2013.6695102

- [10] CHEN P, HONG W, KUAI Z Q, et al. A Multibeam Antenna Based on Substrate Integrated Waveguide MIMO Technology for Wireless Communications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(6): 1813-1821. DOI: 10.1109/TAP.2009.2019868

作者简介



洪伟, 教育部长江学者奖励计划特聘教授、IEEE Fellow、国家杰出青年基金获得者、东南大学毫米波国家重点实验室主任, 目前担任中国电子学会微波分会副主任委员、天线分会副主任委员等职, 曾任或现任多个全球刊物编委等; 作为首席科学家或项目负责人承担完成多项国家“973”、“863”、创新群体、重大专项项目等; 获国家自然科学基金 2 项、部省科技进步一等奖 3 项等多项科技奖, 以及首届全国创新争先奖状、第三届中国青年科技奖等荣誉奖, 指导的学生中有 2 人获全国优秀博士学位论文奖、1 人获提名全国优秀博士学位论文奖; 发表论文 300 余篇, 出版学术专著 2 部, 在英、美、德、日、韩等十多个国家召开的国际会议上作大会报告/特邀报告/专题报告 40 余次, 获授权发明专利 90 余项。