

5G毫米波移动通信系统部署场景 Analysis and Suggestion on Deployment Scenario of 5G MMW Mobile Communication System

分析和建议

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

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

摘要:

5G毫米波通信是5G移动通信系统的重要组成部分,是5G满足大带宽需求的必要手段。运营商需要明确5G毫米波部署场景和方案,推动产业链协同发展。从业务发展需求角度对5G毫米波部署的必要性和5G毫米波现阶段的频谱划分、标准化、产业链发展情况进行分析,结合5G毫米波系统测试结果,给出了5G毫米波应用主要场景和部署方案;并从产业发展角度,给出了下一阶段5G毫米波设备、终端的发展建议。

Abstract:

5G MMW communication is an important part of 5G mobile communication system and a necessary means for 5G to meet the demand of large bandwidth. Operators need to clarify 5G MMW deployment scenarios and plans to promote collaborative development of the industrial chain. The necessity of 5G millimeter-wave (MMW) deployment is analyzed from the perspective of business development demand. The development situation of the industry chain, standardization and spectrum division of 5G MMW at the present stage is analyzed. Combined with the test results of 5G MMW system, the main application scenarios and deployment scheme are proposed. From the perspective of industrial development, suggestions of 5G MMW devices and terminals in the next stage are proposed.

Keywords:

5G; Millimeter-wave; Deployment scheme; Development proposals

关键词:

5G;毫米波;部署方案;发展建议

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2019.08.001

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

文章编号:1007-3043(2019)08-0001-06

引用格式:张忠皓,李福昌,延凯悦,等. 5G毫米波移动通信系统部署场景分析和建议[J]. 邮电设计技术,2019(8):1-6.

1 概述

毫米波一般是指波长1~10 mm、频率30~300 GHz的电磁波。相较于低频段,毫米波频段有丰富的带宽资源,并且由于传播特性和波束赋形方面的特点,毫米波从50年代开始就被用于雷达等军事方面,随着毫米波器件工艺材料进步和技术民用化发展,出现了车载毫米波雷达和毫米波成像技术,被广泛用于交通、医疗、安检等领域。

毫米波在移动通信发展初期并不是通信行业的首选,一方面是由于4G之前的移动通信带宽要求不

高,6 GHz以下的窄带宽已经足够满足需求;另一方面由于蜂窝移动通信有规模连续组网的特点,采用传播距离较短的毫米波部署将需要投入更多的建站成本。

但是近年来快速发展的移动通信业务对通信带宽的需求急速提升,按照2015年ITU-R WP5D发布报告M.2083(5G愿景)定义的系统需求,5G将支持至少100 Mbit/s~1 Gbit/s的边缘用户体验速率,10~20 Gbit/s的系统峰值速率。相对于提高频谱利用率,增加频谱带宽以提高系统峰值速率的方法更简单直接。但是,6 GHz以下频率资源匮乏,很难找到连续的大带宽满足5G系统需求。移动通信行业的目光开始向高频段转移,毫米波开始成为移动通信发展的重要研究方向。

毫米波频段可以构建高达800 MHz的超大带宽通

收稿日期:2019-05-16

信系统,通信速率高达10 Gbit/s,可以满足ITU对于5G通信系统的要求。3GPP在2016年初公布了毫米波信道模型的技术报告3GPP TR 38.900,明确了毫米波频段作为5G户外通信频段的可行性。目前,毫米波已经作为3GPP 5G移动通信系统的必要组成部分。

相对于6 GHz以下频段,5G毫米波落地应用还有很多问题有待解决和进一步完善,如高频器件性能、电磁兼容问题、波束赋形和波束管理算法、链路特性等方面。另一方面,运营商和行业也开始从系统应用角度考虑5G毫米波部署和应用问题。但是部署和应用的相关研究还比较分散,尚未形成明确的5G毫米波移动通信系统应用方向和具体的部署方案。

目前国内6 GHz以下5G系统已经从试验网向商用转变,5G毫米波也需要适时开始进行网络部署规划,移动通信行业急需运营商明确5G毫米波NR系统未来的整体需求,明确设备、终端的开发计划。运营商也需要向行业发布明确的信号,推动毫米波产业链成熟,为未来部署做好准备。

本文首先从5G毫米波产业发展现状着手,从频谱、标准化、产业链、部署情况几个方面对毫米波产业成熟度进行分析。其次,在对当前毫米波设备进行摸底测试基础上,明确毫米波设备容量和覆盖能力,从网络部署角度提出5G毫米波部署场景和部署方案建议;最后,从网络部署需求角度,对毫米波产业链的发展方向提出建议。

2 5G毫米波产业发展现状

2.1 5G毫米波频谱分配情况

频谱是移动通信产业最为宝贵的资源,任何一代移动通信技术的正式商用,都必须获取一定的频谱资源。国际电联(ITU)在2019年世界无线电大会(WRC-19)研究周期内专门设立了TG 5/1工作组,负责1.13议题的研究工作,即为5G系统在毫米波频段研究确定可使用的频谱资源,目前TG 5/1工作组已经完成了2019年世界无线电通信大会准备会会议文件(CPM报告)中关于1.13议题的相关内容。这意味着WRC-19将对毫米波频段提出明确的频段建议。

当前,美国、韩国、日本等国家已陆续完成5G高频频谱的划分与拍卖,5G商业部署前景明朗,拍卖情况如表1所示。

欧盟在2018年7月已经明确24.25~27.5 GHz频段用于5G,建议欧盟各成员国在2020年底前在26 GHz

表1 美、日、韩5G高频频谱拍卖情况

国家	运营商	频段
日本	乐天	27~27.4 GHz
	NTT Docomo	27.4~27.8 GHz
	KDDI	27.8~28.2 GHz
	Softbank	29.1~29.5 GHz
韩国	KT	26.5~27.3 GHz
	LG U+	27.3~28.1 GHz
	SK电讯	28.1~28.9 GHz
美国	Verizon	在28/39 GHz频段获得1 GHz
	AT&T	在39 GHz波频段获得400 MHz
	T-Mobile	在28 GHz和39 GHz频段获得200 MHz

频段至少保障1 GHz频谱用于移动/固定通信网络。此外,欧盟将继续研究32G(31.8~33.4 GHz)和40G(40.5~43.5 GHz)等其他高频段。英国、德国等国家已经确认了5G中高频待分配或待招标的频段(见表2)。

表2 英、德待拍卖5G高频频谱

国家	运营商	频段/GHz
英国	沃达丰、英国电信、O2等	24.25~27.5
德国	德国电信、沃达丰、西班牙电信等	27.8~28.4
		28.9~29.4

从上述5G毫米波频段的规划和拍卖中可以看出,毫米波部署初期,大多数国家将注意力都集中在26 GHz和28 GHz这2个频段上,在这2个频段上投入的资源也是最多的。

我国工业和信息化部于2017年7月批复24.75~27.5 GHz和37~42.5 GHz频段用于我国5G技术研发毫米波实验频段,试验地点为中国信息通信研究院MT-Net试验室以及北京怀柔、顺义的5G技术试验外场。但是目前毫米波频谱的具体规划仍未正式发布。

2.2 5G毫米波标准化情况

在3GPP中毫米波频段的射频标准讨论和制定工作由3GPP RAN4牵头开展,研究分为2个阶段:第1阶段研究40 GHz以下的频率,以满足较为紧急的商业需求,于2018年12月完成。第2阶段计划从2018年开始,到2019年12月完成,该阶段专注于最高100 GHz的频率,以全面实现IMT-2020的愿景。

5G频段具有多样性,一般称之为低频(6 GHz以下)和高频(24.25~52.6 GHz),第1阶段频谱分配定义了52.6 GHz以下的毫米波频谱(见表3)。

在3GPP中,上述毫米波频段和3.5 GHz的NR系统是同步标准化的,目前已经形成2018-12-30的R15版本。R16版本正在讨论中,并将在2019年6月固化。

表3 3GPP毫米波频段号定义

频段号	频段/MHz	双工方式
n257	26 500~29 500	TDD
n258	24 250~27 500	TDD
n260	37 000~40 000	TDD
n261	27 500~28 350	TDD

2.3 5G毫米波产业链发展情况

总体上看,毫米波产业链还处于初级阶段,距离成熟商用还有一段距离。

毫米波基带部分与5G低频段设备具有相同成熟度,但是射频相关的功能和性能较5G低频段设备有较大差距。毫米波频段通信面临的挑战主要在于高频核心器件,主要包括功率放大器、低噪声放大器、锁相环电路、滤波器、高速高精度数模及模数转换器、阵列天线等。此外,作为5G高频段通信系统走向实用化的关键步骤,低成本、高可靠性的封装及测试等技术也至关重要。在测试方面,5G毫米波的射频测试将难以采用传统的连线测试,只能采用OTA的测试方法。OTA的测试方法和测试技术虽然在快速发展中,但是目前尚未制定完成。

主设备方面,由于目前北美和日韩已经开始部署毫米波系统,所以厂家设备频段以北美和日韩频段为主。设备可以支持基本功能,但是部分功能如波束管理、移动性等有待进一步完善。

芯片和终端的进度总体上落后于设备。

英特尔(Intel)于2017年11月发布了XMM 8060 5G多模基带芯片,该芯片同时支持6 GHz以下频段和28 GHz毫米波频段。高通已经能够提供商用的毫米波终端芯片X50和X55,天线模组QTM525。

高通公司目前已具备测试终端MTP8510-5G,频点为N257A或者N261(28 GHz频段)。在商用终端方面,OPPO/VIVO/ZTE预计2019年底将推出X55芯片样机终端,商用终端预计2020年出现。

我国在高性能高频器件、原型系统验证等方面还存在较大差距,需要进一步开展创新性研究与开发工作。

3 5G毫米波系统性能测试情况

3.1 5G毫米波峰值速率测试

5G毫米波的峰值速率与带宽、帧结构、支持的流数、调制阶数等因素有关。

在毫米波外场测试中,在近点进行了毫米波小区

峰值容量测试。测试结果如表4所示。其中,系统支持4流,采用帧结构DDDS,即3个连续的下行slot、1个特殊slot(配比为0:2:12)。

表4 上下行、不同带宽、不同调制方式下的近点速率

业务类型	带宽/MHz	调制方式	小区总速率/(Mbit/s)
DL UDP	400	256QAM	5 010
		64QAM	4 210
	800	256QAM	9 310
		64QAM	7 510
UL UDP	400	256QAM	901
		64QAM	720
	800	256QAM	1 910
		64QAM	1 430

从外场测试结果可以看到,5G毫米波系统在800 MHz带宽情况下,小区下行峰值速率可以达到9.31 Gbit/s,上行峰值速率可以达到1.91 Gbit/s。

3.2 5G毫米波拉远测试

5G毫米波的覆盖能力与设备的EIRP、系统灵敏度等因素有关。

在毫米波外场测试中,在LOS径环境下进行视距道路拉远,SSB_RSRP和下行吞吐率情况如图1所示。其中,采用帧结构DDDS,EIRP为58 dBm。

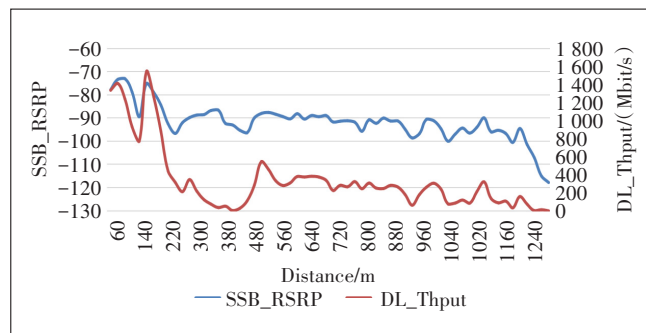


图1 下行拉远距离与SSB_RSRP和速率情况

从外场测试结果可以看到,5G毫米波系统在1.1 km距离SSB_RSRP维持在-100 dBm以上,速率为200 Mbit/s。

3.3 5G毫米波穿透性能测试

在毫米波外场测试中,对不同遮挡物、不同情况的毫米波穿透损耗进行测试,结果如表5所示。

测试中可以看到,毫米波基本不具备穿透混凝土承重墙的能力。本次外场没有进行雨雪等恶劣天气对于毫米波影响的测试,根据对毫米波雨衰的分析,降雨对毫米波影响很大,毫米波速率有较大下降。通过理

表5 5G毫米波穿透性能损耗

树冠(直径4 m)	人体(单侧/周围)	混凝土承重墙	木门(5 cm)	普通玻璃门	房车车体
20 dB	11~28 dB	无法穿透	6 dB	5 dB	17~23 dB

论分析和实际测试,毫米波穿透损耗较6 GHz以下频段更高。

4 5G毫米波部署场景分析

4.1 5G高低频混合组网

新一代移动通信的覆盖部署范围具有核心城市-主要城市-城市-乡村逐步覆盖的规律,在部署初期均是与其他通信系统结合,覆盖品牌价值区域,或者解决高热场景的业务需求。5G通信系统也遵循上述部署规律,部署初期将与LTE系统进行混合组网提供高速率大带宽服务。

从产业链成熟和网络部署进度角度考虑,国内5G毫米波系统商业部署时间点比6 GHz以下频段5G系统晚2年左右,届时5G 6 GHz以下频段系统预计已经完成大部分城市重点区域覆盖。所以5G毫米波系统部署时,将与6 GHz以下频段的5G系统结合,形成5G系统高低频混合组网方式,用于重要品牌价值区域的覆盖,提升品牌价值,或者用于人流密集场所和热点区域的吸热,提供进一步的大容量上传能力。

在具体组网方式方面,5G毫米波系统可以根据需求与5G低频系统共站址部署或拉远部署,提供精准覆盖,需要具备较强的系统间、频段间的互操作功能和移动性管理功能。根据具体部署场景,需要毫米波宏站、毫米波微站、毫米波微RRU、毫米波分布式微站等多种形态的设备。在终端方面,需要支持3G/4G/5G高低频的多模多频终端。

从毫米波传播特性和覆盖能力考虑,5G毫米波适合部署在相对空旷无遮挡或少遮挡的室外和室内环境。

典型的部署场景和具体需求如表6所示。

4.2 大带宽回传

毫米波频点较高、波长较短,可以在相同面积实现更多天线阵列布防,波束能量更集中。并且5G毫米波系统可以提供高达800 MHz带宽、10 Gbit/s的系统峰值速率,使毫米波可以作为无线回传链路,解决一些场景无法布放光纤或布放光纤代价过高的问题。

在具体组网方式方面,5G毫米波系统采用SA独立频点组网,作为其他无线通信系统中的回传链路,采

表6 5G高低频混合组网典型场景

典型场景	场景特点	设备需求	规划需求
交通枢纽	室内面积大且相对空旷,有功能区域划分,用户密度高,流动性强,流量需求大	毫米波微站、毫米波微RRU、毫米波分布式微站	不同的功能区需要有针对性的覆盖方案,需要对小区的划分进行针对性设计以达到移动性与容量的平衡,需要室内外联合覆盖
体育场馆	室内面积大且相对空旷,阻挡物少,用户密度高、具有整体流动性,上行流量需求大	毫米波微站、毫米波微RRU、毫米波分布式微站	部署中需要充分利用毫米波波束赋形特点,注意小区间同频干扰。需要室内外联合覆盖
广场	室外面积大且相对空旷,阻挡物少,用户密度高、流动性相对较强,流量需求大	毫米波宏站、毫米波微RRU	部署中需要充分利用毫米波波束赋形和空间复用特点,提高系统效率

用宏站提供足够的覆盖距离,链路两端设备相互精准覆盖,布放后无需移动,建立链路后保持连接状态。系统需要接入管理功能,需要部分无线资源调度管理功能,无需移动性管理功能,功能实现较高低频混合组网简单。

另一种大带宽回传方式是毫米波自回传:一方面作为基站为终端提供服务,一方面通过站间对打实现无线回传,这种方式可以作为无法布放光纤回传时的灵活解决方案。

从毫米波传播特性和覆盖能力考虑,需要保证链路上无遮挡,并且需要充分考虑恶劣天气,如雨、雪、雾对毫米波的影响。典型的部署场景和具体需求如表7所示。

表7 大带宽回传典型场景

典型场景	场景特点	设备需求	规划需求
家庭宽带接入	作为回传链路,流量需求较大,无移动性需求	毫米波宏站,定制化CPE,提供毫米波转Wi-Fi功能	一般要求终端室外安装,链路无遮挡,对基站高度有一定要求
滑雪赛道	作为回传链路,流量需求大,无移动性需求	毫米波宏站	采用毫米波宏站对打方式,提供远距离高质量传输,链路无遮挡,需要考虑供电方案
毫米波自回传	一方面作为基站为终端提供服务,一方面通过站间对打实现无线回传	毫米波宏站	部署中需要充分利用毫米波波束赋形和空间复用特点,提高系统效率

4.3 园区专网

5G毫米波系统频段在采用高低频混合组网为公众用户提供大带宽服务之外,还可以将频点单独规划,提供面向行业用户的业务专网服务。

5G毫米波系统具有大带宽、低时延的特点,如果与MEC相结合,可以更好地释放MEC技术的特点,同

时 MEC 也可以为毫米波系统叠加丰富多样的增值服务,为毫米波网络赋能。在 MEC 平台基础上,引入 AI 技术,将业务与 AI 结合,则可以为覆盖区域提供“大容量高速率+本地化”的智能解决方案,满足行业客户低时延、大带宽、安全隔离的需求。

在具体组网方式方面,5G 毫米波系统采用 SA 独立频点组网,对园区提供信号深度覆盖,系统需要具备较强的移动性管理功能。根据具体部署场景,需要毫米波宏站、毫米波微站、毫米波微 RRU、毫米波分布式微站等多种形态的设备。在终端方面,需要根据专网业务需求进行定制,如定制化 CPE、功能终端、公网专网混合终端。

专网管理平台和 MEC 边远计算平台是园区专网的重要部分,网络架构和数据流如图 2 所示。

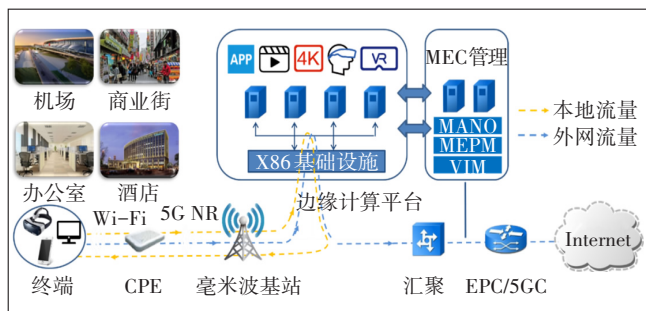


图2 毫米波专网架构和数据流示意图

从毫米波传播特性和覆盖能力考虑,5G 毫米波适合部署在相对空旷无遮挡或少遮挡的园区环境。典型的部署场景和具体需求如表 8 所示。

5 5G 毫米波产业链发展建议

5.1 尽快出台 5G 毫米波频谱规划

表 8 园区专网典型场景

典型场景	场景特点	设备需求	规划需求
智慧工厂	需要低时延、高可靠、与外网隔离。控制平台建设在边缘节点,提供数据分析能力	多种形态的设备	深度覆盖、高可靠通信算法和技术、MEC+AI 平台能力
重保安防	需要大带宽上行能力、视频快速处理和即时反馈能力、人脸识别能力、集群通信能力、与外网隔离	多种形态的设备	深度覆盖、大带宽群通信能力,灵活的小区划分能力
智慧办公	与外网隔离,数据监控分析能力,集群通信、邮件和文件分发、园区监控能力	多种形态的设备	深度覆盖、高性能 CPE、MEC+AI 平台能力,灵活的小区划分能力

频谱是移动通信产业最根本的生命线,推动 5G 毫米波产业发展,首先需要国内明确毫米波频谱规划和划分。

在工信部无线电管理局《2019 年全国无线电管理工作要点》中明确提出“适时发布 5G 系统部分毫米波频段频率使用规划,引导 5G 系统毫米波产业发展”。5G 毫米波频谱规划有望在 2019 年出台。

5.2 5G 毫米波设备发展建议

5.2.1 设备形态要求

通过毫米波部署场景分析可知,丰富的应用场景要求毫米波设备具有丰富的设备形态(见表 9)。

表 9 设备形态要求

设备名称	设备形态	主要要求
宏站	大容量 BBU、高增益 RRU,基本满足与 5G sub6 GHz 频段共站址部署	EIRP 在 62 dBm 以上,体积/重量:18 L/18 kg
一体化微站	包括基带、射频与天线,根据覆盖场景和功率登记可以分为室外微站、室内微站	小型化、隐蔽化 EIRP 在 48 dBm 以上,体积/重量:8 L/8 kg
微 AAU	根据覆盖场景和功率登记可以分为室外微 AAU、室内微 AAU	小型化、隐蔽化 EIRP 在 48 dBm 以上,体积/重量:3 L/3 kg
分布式微站	包括 BBU、汇聚单元、RRU 单元	小型化、隐蔽化

5.2.2 设备演进要求

a) 多模多频演进要求。毫米波设备需要满足运营商多模多频组网方式需求,能够与现网 LTE 系统、5G 低频段系统进行设备形态上的融合。对于宏站,要求 BBU 可以同时支持 5G 低频段和毫米波频段 AAU 和微 AAU,满足高低频三扇区组网需求。要求射频单元提供 5G 低频与毫米波系统的硬件融合设计方案,有效降低铁塔租金。对于分布式微站,要求系统同时支持 5G 低频段和毫米波频段,BBU 和汇聚单元支持 5G 低频段和毫米波频段拉远 RRU 单元的接入。提供 5G 低频与毫米波频段拉远 RRU 的融合设计方案。

b) 灵活部署要求。相对于 sub6G 设备,毫米波元器件的尺寸更小,单位面积可以部署更多的天线阵子或者毫米设备更容易小型化。设备需要进行优化设计,减小微站和微 AAU 单元设备体积,进行美化设计便于隐蔽部署,提供多种方式的供电方案和回传方案。

c) 白盒化发展要求。采用开源软件+通用器件来代替传统专用设备,利用器件的规模效应摊薄研发成本,降低接入网的综合成本。白盒化将有利于吸引一大批有创新能力的中小企业进入移动通信产业,使移

动通信产业链由封闭逐步走向开放,是未来微站的发展趋势。

5.2.3 主要能力要求

a) 带宽和峰值速率。毫米波设备应支持 200、400 MHz 单载波能力,应支持多载波聚合,总带宽 800 MHz 的能力。毫米波设备应支持 64QAM 和 256QAM 调制方式,系统峰值传输速率应达到 10 Gbit/s 以上。

b) 波束赋形。受制于毫米波传播特性,毫米波收发机需要采用大规模天线阵列来弥补严重的空中传播路径损失。5G 毫米波设备需要充分利用大规模天线阵列和波束赋形技术,提高信号覆盖能力。

c) 波束管理。5G 毫米波频段系统需要具备较好的波束管理算法,包括控制信道和数据业务信道设计、波束选择、波束反馈、波束指示以及波束恢复等,保证 UE 在移动过程中的波束选择与波束跟踪,保证 UE 在遮挡情况下的波束切换与波束恢复能力。

5.3 5G 毫米波终端发展建议

面对丰富多样的 5G 毫米波应用场景,特别是园区专网场景,毫米波终端应根据专网业务需求进行定制,如定制化 CPE、功能终端、公网专网混合终端。

表 10 示出的是终端形态要求。

表 10 终端形态要求

设备名称	设备形态	主要要求
定制化 CPE	毫米波转 Wi-Fi 用户端设备,根据性能要求,分为家庭宽带 CPE 和企业级 CPE	对于家庭宽带,要求与家庭光猫具备相同功能,为用户提供 Wi-Fi、有线宽带接入能力;对于企业客户,按照客户需求进行定制化开发,保证带宽和用户数需求,如单 AP 射频接入用户数和整机有流量用户数能力
专网功能终端	根据客户需求和功能进行分级定制化	注重安全、功能定制化、价格合理化,满足行业需求;对于集群业务,提供 PTT 能力,可以按照客户要求定制电池容量、屏幕尺寸等硬件能力和语音、文字、视频等功能;对于监控、安防等业务,提供毫米波传输模组或极筒功能终端,提供多种接入端口,满足用户单一功能要求
公网专网混合终端	与 5G 终端融合设计	支持多模多频,支持 5G 高低频双联接和 5G 毫米波载波聚合能力,支持专网 APP 应用,终端其他能力需求与当前公网终端相同

5.4 5G 毫米波产业链合作推动

目前美、日、韩等国已经完成 5G 毫米波频谱划分并开始部署,产业链较国内成熟。从国际竞争角度考虑,通信行业应该紧抓中国 5G 快速发展契机,构建 5G 毫米波合作平台,凝聚毫米波产业力量,引领毫米波技术发展,打造毫米波生态体系,推动毫米波产业链成熟,加速毫米波网络部署,探索合作共赢的 5G 毫米波

业务模式,赋能 5G 网络,互惠共赢。

在毫米波产业链合作方面,应由运营商牵头,联合设备厂商、终端厂商、芯片厂商、天线厂商、垂直行业、高校等产业链上下游,不断拓展毫米波应用场景,通过 5G 毫米波业务试点、规模应用和实际部署,带动产品、平台、业务的研发和迭代,形成多样化的产品和解决方案,增强合作伙伴创新能力和竞争力。

6 结束语

本文从频谱、标准化、产业链、部署情况几个方面对毫米波产业成熟度进行分析,指出目前国内毫米波产业发展速度较国外缓慢,有待进一步推动。在对多厂家毫米波设备进行测试摸底的基础上,明确当前毫米波设备容量和覆盖能力,并根据毫米波系统特性从网络部署角度提出了高低频混合组网、大带宽回传和园区专网 3 种可行的 5G 毫米波部署场景和具体方案建议。最后站在毫米波产业发展的角度,提出了加速出台频谱规划,加速设备和终端成熟,加快整合产业力量的产业发展建议。

参考文献:

- [1] 石星. 毫米波雷达的应用和发展[J]. 电讯技术, 2006(1):1-9.
- [2] 吴荣燎,金钻,钟停江,等. 基于毫米波雷达的车辆测距系统[J]. 智能网联汽车, 2019(2):33-35.
- [3] 袁帅. 毫米波雷达在智能网联汽车中的应用[J]. 信息技术与标准化, 2018(1-2):62-64.
- [4] 徐枫,朱莉,刘敏. 近程毫米波全息成像技术发展综述[J]. 微波学报, 2017, 33(8):289-294.
- [5] 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.
- [6] PI Z, KHAN F. An Introduction to Millimeter-Wave Mobile Broadband Systems [J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(6): 101-107.
- [7] HOSSAIN E, HASAN M. 5G Cellular: Key Enabling Technologies and Research Challenges [J]. IEEE Instrument Measurement Magazine, 2015, 18(3):11-21.
- [8] 洪伟. 关于毫米波与太赫兹通信的思考[J]. 中兴通信技术, 2018, 24(3):39-42.

作者简介:

张忠皓,教授级高级工程师,博士,北京邮电大学兼职教授,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,博士,国家知识产权局中国专利审查技术专家,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;延凯悦,工程师,硕士,主要研究方向为毫米波、MEC、5G 通信等;高帅,工程师,硕士,主要研究方向为毫米波、MEC、5G 通信等。