



高频段宽带无线通信前瞻*

方 箭,王 坦,黄 标

(国家无线电监测中心 北京 100037)

摘 要:首先,从未来移动通信系统频谱需求与当前低频段频率规划总量的差距,论述向高频段寻找可用频率资源的必然趋势。然后,从高频段频率规划、标准化进展等方面,对全球高频段无线通信的发展现状进行阐述,并通过分析高频段特性,对其传播特征进行了归纳。最后,分别从潜在可用频段、无线传输技术、组网技术以及射频技术 4 个方面提出了未来高频段无线通信的优势和挑战。

关键词:频谱需求;高频段;无线通信;5G

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.03.020

Outlook of Broadband Wireless Communications at High Frequency Bands

Fang Jian, Wang Tan, Huang Biao

(State Radio Monitoring Center, Beijing 100037, China)

Abstract: Firstly, the inevitable trend was discussed that the available spectrum of the future mobile communication systems would be found in the higher frequency band, since the gap between the future spectrum requirements and the current planned total spectrum in the low-band was considerable. Then the status of the development of global high frequency wireless communications were introduced, in terms of high frequency band planning, related standardization and organization activities. Next, the propagation characteristics of high frequency bands were analyzed and summarized. Finally, the advantages and challenges of future high-band communications were proposed from potential available bands, transmission technologies, networking technologies, and radio frequency technologies.

Key words: spectrum requirement, high frequency band, wireless communication, 5G

1 引言

2013 年 12 月 4 日,我国第四代移动通信(4G)TD-LTE 牌照发放,宣告世界上移动通信用户数量最庞大的国家全面进入 4G 时代,而全球的 4G 网络数也上升到 250 多个^[1]。与此同时,面向下一代移动通信需求的第五代移动通信(5G)技术的研发也已在世界范围内如火如荼地展开。在

国际电信联盟关于 5G 愿景研究的号召下^[2],欧盟、日本等陆续开展相关工作^[3],我国也适时成立了 IMT-2020(5G)推进组^[4],从 5G 的需求、频率、无线传输与组网技术、评估测试验证技术、标准化及知识产权等各个方面,探究 5G 的宏伟蓝图。

业内观点普遍认为,随着移动互联网、物联网渗透到人们生活的方方面面,无线数据流量将持续快速增长,整个社会对信息通信的需求水平将不断提升,5G 相比 4G 将

* 国家科技重大专项基金资助项目(No.2012ZX03003004, No. 2012ZX03006003, No. 2012ZX03001043)



实现单位面积移动数据流量 1 000 倍增长^[5]。海量数据业务的需求,不仅依赖于各项无线传输与组网技术的演进,还需要更多的频谱资源予以支撑。

当前,《中华人民共和国无线电频率划分规定》在 9 kHz~275 GHz 频段范围对 42 种无线电业务进行划分^[6],无线通信系统主要归为移动业务。主流无线通信系统(包括 2G、3G、4G 以及无线局域网等)一般使用 6 GHz 以下的 VHF/UHF 频段,例如,蜂窝移动通信工作在 800 MHz、900 MHz、2 GHz 等频段附近,而无线局域网工作在 2.4 GHz、5 GHz 等频段附近,主要有下述两方面原因。其一,早期的无线接入主要提供语音业务和短消息数据业务,VHF/UHF 频段能保证足够的频谱资源;其二,对于天线尺寸大小、射频器件实现难易等,VHF/UHF 频段更加合适。

现阶段,低频段已经很难找到连续可用的宽带频谱资源,近些年,基于 CMOS 工艺的集成电路的快速发展,使得原本昂贵的毫米波无线通信设备将从小批量的专业市场快速转向并应用于大规模量产的民用无线通信市场。因此,在 5G 大带宽、高数据速率的需求下,寻求高频段潜在可用频谱资源成为解决频谱需求瓶颈问题的关键手段之一,而高频段无线通信也已被视为 5G 研究最重要的方向之一^[7]。

2 频谱需求预测

为积极应对未来移动通信数据流量的快速增长,ITU 确定在 WRC-15 大会上考虑为宽带移动通信系统增加频率划分,设立 1.1 议题以满足移动宽带的未来需求。1.1 议题的核心工作就是预测未来的频谱需求,并寻求未来的潜在可用资源。为此,ITU-R WP 5D 工作组对世界范围内的频谱需求进行测算,而中国、美国、俄罗斯、日本等国家也根据本国情况开展了相关工作,具体情况见表 1^[8]。虽然各

表 1 未来 IMT 频谱需求预测情况

组织或国家	时间	频谱需求/MHz
ITU-R WP 5D	2020 年	1 340~1 960
GSMA	2020 年	1 600~1 800
中国	2015 年	570~690
	2020 年	1 490~1 810
美国	2014 年	新增 245
俄罗斯	2020 年	1 065
日本	2020 年	1 825
澳大利亚	2020 年	约 1 100

国移动通信发展所处阶段、人口分布、预测建模方法等存在差异,但预测 2020 年的频谱需求均为 1.5 GHz 带宽左右。

对于以无线局域网为代表的宽带无线接入的频率需求预测,ITU-R WP 5A 工作组也开展了测算工作,具体见表 2^[9]。

表 2 未来宽带无线接入频谱需求预测情况

场景	低/MHz	高/MHz
公司	880	2 080
家庭	640	1 040
公众场合	880	1 280

虽然 ITU-R 已规划了约 1.2 GHz 带宽的频谱用于 IMT 系统,但考虑到划分和规划的区域特性,各国实际的规划值远小于该值,为满足未来移动通信系统对覆盖、性能、容量的不同需求,集中在 6 GHz 以下寻求更多的潜在资源。

考虑到 5G 商用可能面向 2025 年或更加长远,届时,新的业务量增长将导致频谱需求缺口继续扩大;另外,要求高传输速率和实时大数据量的传输服务多发生在密集城区 small cell 场景下,M2M 等服务应用也将广泛分布于短距离传播的区域内;而高频段的传播特性决定了它在热点场景下具有大容量接入的特点。因此,采用 6 GHz 以上高频段解决大容量需求问题必将是大势所趋。

3 全球高频段无线通信发展情况

传统而言,高频段往往用于大功率系统的点对点无线传输,如卫星通信、微波通信系统。近些年,业界逐渐开展了点对多点的无线通信相关研究和标准化工作。

国际上,在宽带无线接入系统方面,60 GHz 频段是业内关注的重点,其主要用于短距离、高速率的传输,传输距离通常在 10 m 以内,采用 TDD 工作模式,具体工作频段为 56~66 GHz,与此相关的主要是以下 3 个国际标准:ECMA 387 标准、IEEE 802.15.3c 和 IEEE 802.11ad,另外,IEEE 已经成立 IEEE 802.11aj 工作组,制定针对中国 60 GHz 和 45 GHz 频段的无线局域网标准。

在频率规划和分配方面,早在 2001 年,美国 FCC 以非授权方式为无线通信分配了一段 7 GHz(57~64 GHz)的连续频谱^[10];在欧洲,ECC 以非授权方式规划了连续 9 GHz(57~66 GHz)的连续频谱,将 62~63 GHz 和 65~66 GHz 两个频段分配给移动宽带系统,将 59~62 GHz 频段分配给无线局域网^[11];日本、澳大利亚也在此频段开展了相关规划,具体如图 1 所示。



图 1 国际 60 GHz 频段分配情况

在公众移动通信方面，欧盟正式启动 METIS (Mobile and Wireless Communications Enablers for the Twenty-Two (2020) Information Society) 项目^[3]，开始进行 5G 研发，高频段通信也是其关注重点之一。以三星公司为代表的韩国，针对 6 GHz 以上频段，特别是 13.4~14 GHz、18.1~18.6 GHz、27.0~29.5 GHz、38.0~39.5 GHz，进行了大量研究与测试，在 28 GHz 高频段上，利用 64 根天线，采用自适应波束成形技术，在 200 m 的距离内实现 1 Gbit/s 的峰值下载速率^[2]；NTT DoCoMo、爱立信等公司也开展高频段通信研究工作。

在国内，LTE-Hi (LTE hotspot/indoor) 作为 LTE 小基站满足热点及室内覆盖需求的技术，具有小覆盖、密集组网、低功耗、低成本等特点^[3]。国内标准化组织、国家重大科技专项等均开展相关研究，并已经正式在 3GPP R12 标准化工作中立项。相比传统的公众移动通信，LTE-Hi 使用更高的频率，目标频段主要在 3.4~3.8 GHz。而在更高频段，国内设立“863”计划重点项目“高频段无线通信基础技术研究开发与示范系统”、“973”计划“硅基毫米波亚毫米波集成电路与系统的基础研究”等，研究高频段通信的关键技术、器件实现、原型系统，为未来提供技术基础。另外，国内

IMT-2020(5G)推进组正在研究高频段关键技术、潜在候选频段等。在无线通信系统的频率规划方面，2006 年，将 59~64 GHz 频段规划用于无线微功率(短距离)无线电技术应用；2013 年，我国率先将 40~50 GHz 频段规划用于宽带无线接入系统和点对点的无线传输系统。

4 高频段特性

分析高频段特性是设计和实现高频段宽带无线通信的基础，而对传播特性的认知则是关键。对于高频段传播特性，可以从两方面描述：自由空间损耗和附加损耗^[4]。对于自由空间损耗而言，路径损耗与频率变化呈平方的关系，在较短距离内会产生极大的损耗，如 60 GHz 相对于 5 GHz 高出至少 20 dB；附加损耗一般包括大气气态损失、雨衰、树叶堵塞、散射、绕射等。大气气态损耗一般是在电磁波通过大气时，由水、氧气等分子吸收造成的，具体损耗值与这些气体的谐振频率相关，通常水蒸汽的第一吸收峰值(吸收最强处)是 22.3 GHz，氧气在 60 GHz 左右，典型的大气吸收衰减曲线如图 2 所示^[5]；雨衰则是电波在雨中传播时由于雨点吸收和散射而产生的衰减，在 1~50 GHz 频带内，

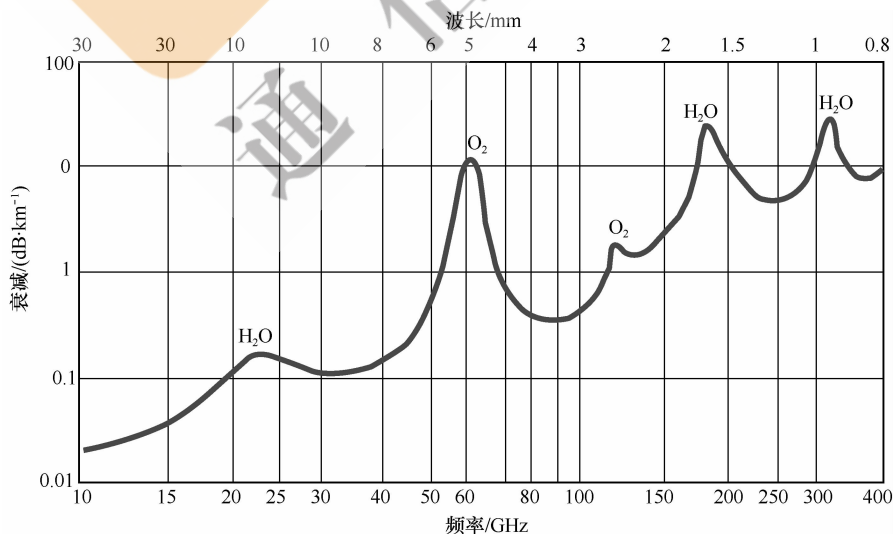


图 2 平均大气吸收特性



降雨衰减与降雨强度成正比;树木阻挡的衰减量取决于树叶和枝干的浓密度以及电波穿过树冠的路径长度;另外,随着频率增加,波长变短,反射表面更加粗糙,导致漫反射更多,而电磁波频率越高,波长越短,受建筑物阴影的衰落越大。总体来说,高频段的传播特性较为复杂,是多种因素共同决定的。

基于高频段的传播特性分析,其特点总结如下:

- 适用于短距离通信,传播损耗较大;
- 可利用的频谱范围宽,1%的相对带宽可以提供数百兆乃至吉比特可用带宽;
- 安全性高,传输路径损耗大,墙壁等障碍物的衰减很大;
- 抗干扰性好,传播损耗较大且方向性强;
- 频率复用性高,在较小区域内存在大量的微小区,可高度复用;
- 元器件的尺寸小,高频段波长较小;
- 器件加工精度要求高,成熟 CMOS 集成电路技术;
- 收发系统频偏较大,由于环境变化引起的多普勒频率扩展以及射频本振误差造成的频率偏差和相位噪声也会随着工作频率的增加而线性增加。

5 高频段无线通信面临的挑战

在无线通信系统的研究和设计方面,由于高频段所具备的诸多特性,在低频段适用的关键技术或将难以直接应用。如何既充分利用高频段的优点,同时又克服其缺点,相关工作面临着机遇和挑战。本节从频段选择、传输技术、组网技术以及射频技术等方面进行分析。

(1) 频段选择方面

随着我国工业化和信息化融合的不断加深,频谱供需矛盾日益凸显,为移动通信寻找可用频段的难度也在持续加大。虽然 6~275 GHz 频段有充足的移动业务频率资源储备,但选择出合适的频段仍需统筹规划,以充分满足各行业无线电业务的频率需求。对于将高频段用于移动通信,需要考虑以下因素。

- 合法性:要确保所选频段为《中华人民共和国无线电频率划分规定》中已划分(或以脚注形式标注)给移动业务的频段。
- 安全性:我国高频段目前多以主要业务划分给固定业务、无线定位业务、无线电导航业务以及卫星固定、卫星广播等空间业务。在使用中,存在数字微波

接力系统、航海及空中管制等雷达系统或卫星通信等重要系统,移动通信选择新频率需要充分考虑系统间的电磁兼容问题,以确保对其他系统的保护和移动通信自身系统的抗干扰能力。

- 有效性:结合高频段的传播特性,选择适合的频段确保系统的有效设计。
- 连续性:高频段的一大优势是具备连续的大宽带频谱资源,以此可确保系统获得更高的效率。
- 实现性:频段选择需要充分结合产业硬件制造能力,确保系统、终端、仪表等的可实现性。

因此,在高频段为移动通信遴选可用频段,需要进行大量的论证与支撑工作。

(2) 无线传输技术方面

高频段通信既提供了优势,也带来了挑战。例如,对于作为 4G 核心传输技术之一的多入多出(MIMO)技术,小型化的天线和设备、较高的天线增益将为未来大规模 MIMO (massive MIMO) 技术实现创造得天独厚的条件,可以极大地提升频谱效率;同时,利用自适应波束成形技术可以弥补高频段的路径损耗,增加期望用户增益,抑制干扰用户。此外,高频段通信还将为其他 5G 关键技术的研发创造条件,如无需借助基站的帮助即可实现终端间直接通信的终端直通(D2D)技术。在高频段支撑下,D2D 技术尤其适合于终端间的短距离直接通信,实现高数据速率、低时延、低功耗,且通过广泛分布的终端,还能够加强频率资源的复用性。

然而,对于 4G 的另一核心技术——正交频分复用(OFDM)技术,在高频段中,其发送功率峰均比和对频偏敏感的缺点将会被显著放大,且在功放设计、频偏补偿等方面也存在极大挑战,这些内容仍有待进一步研究。

(3) 组网技术方面

未来无线网络正朝着密集化、混合化、扁平化、异构融合化等方向演进,使用高频段组网,是实现该目标的有效手段,具体介绍如下。

- 密集化。随着各种智能终端的普及,未来数据业务将主要分布在室内和热点地区,这使得超密集网络成为实现未来 5G 的 1 000 倍流量需求的主要手段之一。超密集网络需配合高频段、大带宽,才能充分发挥其网络部署灵活和频率复用高效的特点。
- 混合化。未来网络必将是低频侧重覆盖、中高频侧重性能和容量的混合组网,高频段在混合组网的资源分布格局中扮演着重要作用。

- 扁平化。无线接入网逐渐向扁平化架构发展,扁平化能够减小系统时延、降低建网成本和维护成本,但对骨干网接入能力提出了更高的要求。微波回传链路是实现基站间互联互通、接入骨干网以及实现扁平化的重要措施,高频段通信将为微波回传链路提供更好的解决方案。
- 异构融合化。以 LTE 为代表的多制式蜂窝网和以 WLAN 为代表的宽带无线接入网将会持续共存并相互融合与补充,未来多频、多模、多标准的异构组网给无线资源管理带来了挑战。如何通过高频段使异构网络并存、互补,并逐步实现融合转化,有待进一步研究。

(4) 射频技术方面

高稳定低相噪锁相频率综合器、宽带电调振荡器、低噪声放大器、高线性功放、高性能滤波器、低插损高隔离射频开关、低损耗高隔离双工器、多天线和多通道射频收发技术以及适合高频段的电磁兼容技术,射频功能器件的集成和模块化技术等都将给产业带来挑战。

6 结束语

从未来频谱需求预测出发,指出高频段必将是未来 5G 通信的重要组成部分,分析全球高频段宽带通信的发展状况,基于高频段特性分析所面临的挑战,为未来发展提供思考。为推进国内高频段无线通信的发展,需要管理部门、标准化组织、运营企业、设备制造企业、高校、研究机构共同努力,从而在 5G 发展中占得先机。

参考文献

- 1 Global Mobile Suppliers Association. GSA Confirms over 250 LTE Networks Now Launched, Dec 2013
- 2 ITU-R Study Group 5 Circular Letter 5/LCCE/24. Regional Workshops on IMT for the Next Decade, Jan 2011
- 3 Osseiran A, Braun V, Hidekazu T, *et al.* The Foundation of the Mobile and Wireless Communications System for 2020 and Beyond Challenges, Enablers and Technology Solutions. VTC Spring 2013, Jun 2013
- 4 苗圩出席 IMT-2020 (5G) 推进组第一次会议. http://www.miit.gov.cn/n11293472/n11294447/n13941444/153_65212.html, 2013
- 5 大唐无线移动创新中心. 演进、融合与创新. 5G 白皮书, 2013
- 6 中华人民共和国无线电频率划分规定, 2014
- 7 Rappaport T S. Millimeter Wave Cellular a Road to 5G, 2013
- 8 ITU-R Study Group 5. Future Spectrum Requirements Estimate for Terrestrial IMT, 2013

- 9 ITU-R WP 5A. Reply Liaison Statement on Spectrum Requirements for Terrestrial Mobile Broadband (Excluding IMT) Related to WRC-15 Agenda Item 1.1, 2013
- 10 FCC. Code of Federal Regulation, 2014
- 11 ETSI DTR/ERM-RM-049. Electromagnetic Compatibility and Radio Spectrum Matters (ERM): System Reference Document; Technical Characteristics of Multiple Gigabit Wireless Systems in the 60 GHz Range, Mar 2006
- 12 Samimi M, Wang K, Azar Y, *et al.* 28 GHz angle of arrival and angle of departure analysis for outdoor cellular communications using steerable beam antennas in New York city. Proceedings of the 2013 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Dresden, Germany, Jun 2013
- 13 Nakamura T, Nagata S, Benjebbour A, *et al.* Trends in small cell enhancements in LTE-Advanced. Communications Magazine, IEEE, 2013, 51(2): 98~105
- 14 Huang K C. Millimeter Wave Communication Systems. Wiley, 2011
- 15 Marcus M, Pattan B. Millimeter wave propagation: spectrum management implications. IEEE Microwave Magazine, 2005, 6(2): 54~62

[作者简介]



方箭,男,现就职于国家无线电监测中心,主要从事无线电频谱规划、系统间电磁兼容分析、认知无线电等方面的研究工作,发表学术论文 20 余篇,曾获中国通信标准化协会科学技术奖一等奖、二等奖、三等奖各 1 项,获中国通信学会科学技术奖二等奖 1 项。



王坦,男,博士,现就职于国家无线电监测中心,主要从事频率规划、电磁兼容分析的研究与评估工作,已发表学术论文 20 余篇。



黄标,男,国家无线电监测中心副总工程师、频谱工程处处长,中国 IMT-2020 (5G) 推进频率组组长,主要从事系统间电磁兼容分析研究、电波测量和电磁环境保护研究以及 5G 关键技术的研究和评估工作,已发表学术论文 30 余篇,曾获中国通信学会科学技术奖一等奖 1 项、二等奖 4 项,获中国通信标准化协会科学技术奖二等奖、三等奖各 1 项。

(收稿日期:2014-01-22)