

面向6G全场景的多频段协同覆盖扩展技术



Multiple Frequency Bands Cooperation Based Coverage Extension Technologies for 6G Full Scenarios

韩书君/HAN Shujun,董晴/DONG Qing,
许晓东/XU Xiaodong

(北京邮电大学, 中国 北京 100876)
(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202204007

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220722.1708.014.html>

网络出版日期: 2022-07-25

收稿日期: 2022-06-10

摘要: 未来全场景业务对6G提出了全面要求,无线覆盖能力的扩展将成为6G主要挑战之一。分析了未来6G系统中可能部署频段的无线覆盖特性,探究了多频段协同使能的全场景覆盖扩展技术。认为多频段协同部署是实现未来6G全场景覆盖的关键技术之一,需要着重关注降本节能、绿色高效、安全可信的多频段协同部署技术。

关键词: 多频段协同; 覆盖扩展; 全场景

Abstract: In the future, full scenario services will put forward comprehensive requirements for 6G, and the expansion of wireless coverage capability will become one of the major challenges of 6G. The wireless coverage characteristics of different frequency bands to be used in 6G are analyzed. In addition, the empowering technologies of multiple frequency bands collaborative for full scenarios coverage extension technologies are investigated. It is believed that multiple frequency bands cooperation deployment is one of the key technologies to realize the coverage extension of full scenarios. More attention should be paid to the technologies of multiple frequency bands collaborative deployment with cost reduction and energy saving, green and efficiency, safety and reliability.

Keywords: multiple frequency bands cooperation; coverage extension; full scenarios

随着5G商用及其在社会各个领域的渗透,移动通信已成为全球80%的用户提供移动通信服务。受限于覆盖能力和建设成本等因素,目前移动通信网络只覆盖了约20%的陆地面积、小于6%的地表面积^[1],尚未达到全球覆盖的目标。未来6G业务对覆盖能力提出了全面的需求,包括应用场景从单场景向多场景扩展,基础设施从平面到立体、从局部到全球、从中低频段向更高频段扩展等。无线覆盖能力的扩展成为6G的主要挑战之一。为了满足6G系统的多样化需求,有效地重新利用低、中、高频段频谱资源至关重要。针对如何在6G网络时空尺度跨度大、全场景业务质量差异大、超密集覆盖能耗大等关键挑战下实现容量和能效约束下的覆盖能力扩展,我们从面向全场景的多频段协同覆盖扩展技术角度展开研究。

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB1806900); 国家自然科学基金(61871045); 中国博士后基金(2021M690470)

1 6G愿景及无线覆盖扩展需求

1.1 6G愿景及典型应用场景

目前,虽然业界对6G移动通信的相关研究正处于百家争鸣的预研阶段,但已有了大概的愿景,可概括为:物理世界、数字世界、生物世界和泛在智能的融合,即“万物智联、数字孪生”。基于信息、通信与数据融合技术构建的软硬件基础设施,未来6G网络业务将呈现数字化、智能化、精准化、情景化、个性化、沉浸化等全新发展趋势。相比于5G时代典型的三大应用场景,增强型移动宽带(eMBB)、高可靠低时延通信(URLLC)和大规模机器类型通信(mMTC),6G典型应用场景更加多样化(如图1所示),涵盖沉浸式云扩展现实(XR)、全息通信、感官互联、智慧交互、通信感知、普惠智能、数字孪生、全域覆盖八大业务应用场景^[2]。6G应用场景对通信网络的体系架构、覆盖、速率、带宽、时延等提出了新需求^[3]。

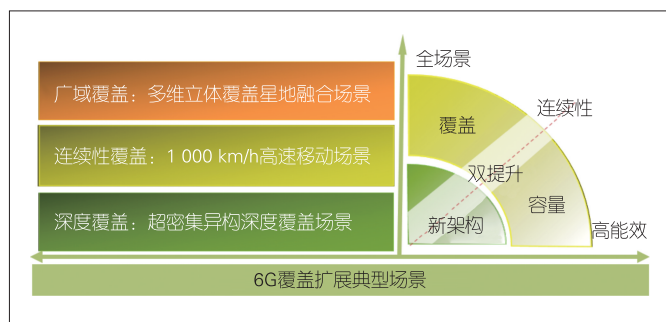


▲图1 网络需支撑的潜在全场景业务^[2]

1.2 6G 无线覆盖扩展需求

覆盖是移动通信基础指标，频谱是无线通信的核心资源。覆盖、频谱、容量和能效之间存在着互相约束的复杂关系。我们可以从6G全场景覆盖扩展的角度来提炼这些应用场景的网络覆盖能力需求，具体包括移动宽带在空间、地面的服务能力，在热点区域提供的超高容量，以及针对垂直行业与物联网连接特性等服务能力的拓展^[4]。我们可以将这些需求总结概括为广域覆盖、连续覆盖以及深度覆盖，如图2所示。未来6G在高速率、低时延、高可靠、高密度、广覆盖等方面同步扩展无线覆盖时面临着巨大挑战。因此，我们需要进一步考虑扩展且具有业务针对性的覆盖能力，以有效地支撑新服务新业务所需覆盖，保障通信以及新功能。5G重点关注了流量密度和连接密度等覆盖指标。随着6G的演进，如何在时空尺度跨度大、全场景业务质量差异大、超密集覆盖能耗大等关键挑战下实现容量和能效约束下的覆盖能力扩展成为6G无线覆盖的核心难题。

为了有效地支撑更为宽广的新服务与新场景所需的覆盖，未来6G网络将在极致低时延高可靠、泛在海量连接、



▲图2 6G全场景覆盖扩展需求

感知与定位等关键挑战下，基于无线覆盖扩展新架构，支持全场景业务。这样可以实现广度覆盖能力与深度覆盖能力按需覆盖、全场景与大动态业务质量一致性保障、高容量与高能效组网需求有机融合，以及空天地立体协同、全频段高效利用和通信计算融合基础上的6G网络无缝覆盖。特别地，需要针对6G全场景业务有针对性地扩展6G无线网络的覆盖能力，包括容量与覆盖能力的双提升、服务与业务质量的连续性以及双提升基础上的高能效。

2 多频段协同覆盖特点

传统移动通信主要针对人口密集区域提供网络覆盖，且覆盖半径有限，而6G将支持天地融合全域覆盖，大幅提升小区覆盖，预计将实现Tbit/s的传输速率，这意味着将需要大量的频谱资源。作为“最后一米”的侧行链路，短距通信将利用毫米波、太赫兹等高频段提供极致无线连接，重点满足短距通信超高吞吐、超低时延和超低功耗的系统需求。沉浸式云XR、全息通信、全新的元宇宙接口等业务场景，都可以通过短距通信实现从有线到无线的跃迁，实现自由移动以及真正的沉浸式体验。因此，未来6G无线网络将充分利用低中高全频谱资源。其中，中低频段将提供基础覆盖，毫米波、太赫兹和可见光等高频段按需高效利用，主要应用于高容量、高速率场景中。多频段协同融合覆盖技术可以实现空天地一体化的全球无缝覆盖，随时随地满足安全可靠的“人机物”无限连接需求。

2.1 中低频段：Sub-6 GHz

Sub-6 GHz频段主要是指工作频率在450~6 000 MHz以下的6 GHz以下频段，用于提供广域覆盖和深度覆盖。根据第3代合作伙伴计划（3GPP）的划分，5G新空口（NR）主要包括两大频谱范围：Sub-6 GHz频段和毫米波频段。2.1 GHz和3.5 GHz频段的协同组网是5G网络覆盖容量双提升的重要手段。然而，随着移动通信赋能数字产业化和产业数字化的发展，面向企业（ToB）业务的大上行、端到端服务保障需求使得其对上行吞吐量的要求越来越高。美国联邦通信委员会建议6G频段应考虑高于5G，如95 GHz~3 THz，但是高频段意味着高成本。因此，如何重耕低频段并重新审视低频段的使用方法，利用中低频段与毫米波频段协同组网，实现6G网络覆盖和容量的双提升，是一个亟待解决的问题。

2.2 毫米波

5G NR高频段的频率范围为24.25~52.6 GHz。与Sub-6 GHz频段相比，毫米波虽然具有较高的穿透和路径损耗

(每千米的路径损耗为数十分贝)等缺点,但是可提供数百倍的带宽,满足下行高速传输的需求。大规模阵列天线及数字+模拟方式的波束赋形技术,可降低高频密集组网的蜂窝系统小区间干扰^[5]。为了实现更好的网络性能,我们可利用毫米波频段进行微小区按需灵活部署。这不仅可以与低频段混合组网,提供大带宽和高速率的公网服务,还可以将部分频点单独规划,满足行业专网大带宽、低时延和安全可靠的网络需求。但利用毫米波频段难以实现连续覆盖组网。如何利用智能有源中继器或有/无源智能反射面,扩展毫米波通信的传输距离和覆盖范围,仍待进一步研究。

2.3 太赫兹

太赫兹作为6G技术候选频段之一,频段在0.1~10 THz范围内。相比于现有的通信技术手段,太赫兹通信技术除了具有丰富的频谱资源和高速数据传输能力以外,在空间组网通信中具有更强的跟踪捕获能力,更强的抗干扰、抗截获能力。另外,其具备的克服临近空间通信黑障能力,可以为临近空间高速飞行器提供测控通信手段^[6]。然而,太赫兹覆盖范围受限,更适用于短距离通信,如地面超高速无线移动场景、高速无线回传场景、无线数据中心场景、短距离保密无线通信、空间无线通信等特定应用场景。因此,6G需要从软硬件角度综合考虑,进一步设计低成本、低功耗、低复杂度的太赫兹通信系统和高频通信组网策略,进而提升太赫兹通信效率和覆盖性能。

2.4 可见光

可见光无线通信的工作频段范围在400~800 THz。与目前的移动通信网络相比,可见光通信具有宽带高速、泛在覆盖、安全兼容、融合包容、绿色节能五大独特优势,其在室内环境中更是先天具有广覆盖的优势。可见光通信技术的应用横跨空天地海立体网络,这导致其传输信道异常复杂,信号在经过传输的过程中会受到线性与非线性效应的影响。特别是在复杂信道与高功率的情况下,非线性损伤将成为制约可见光通信系统性能的主要瓶颈问题。如何在可见光传输收发芯片与模块等领域实现突破,已成为实现超高速率、高可靠可见光通信系统所面临的挑战^[7]。

3 多频段协同使能全场景覆盖扩展

随着移动数据流量呈指数式增长,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。太赫兹通信与可见光引入移动通信网络后,需统筹考虑Sub-6 GHz、毫米波、太赫兹等全频谱的协同融合组网(如图3所示),实现各个频段的动态互补,进而提升全场景网络覆盖性能。

3.1 多频段协同组网

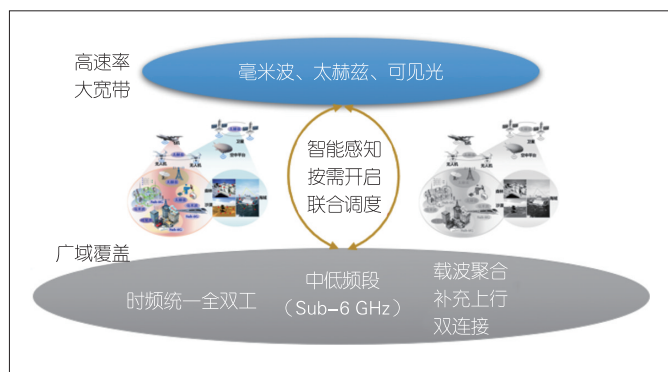
目前,3GPP在5G NR系统中引入了载波聚合、补充上行和双连接3种高低频协同技术,在保障基础覆盖的基础上,可以提高峰值速率,更好地满足大带宽业务需求^[8]。在6G时代,基于毫米波、太赫兹通信的各类技术,将成为提升6G网络覆盖性能,促进6G新场景、新业务部署的关键使能动力。6G需要充分地适配高频毫米波通信的各种特点。针对其覆盖范围受限的情况,我们需要研究如何通过多频段协同组网来高效利用各层资源,满足6G全场景异构用户的覆盖需求,如图4所示。在动态复杂的无线环境下,针对6G全场景多频段共存问题,利用人工智能、数字孪生等技术构建智能化频谱资源管理架构,研究多频段资源智能感知、信息交互与联合调度,可实现多频段资源的随需可达、按需分配等,满足6G多维立体全场景的泛在接入和无缝覆盖。

3.2 多频段协作感知

6G将会综合利用不同频段的优势和特点,提供丰富的感知服务。在相同频段同时提供通信功能与感知功能,可

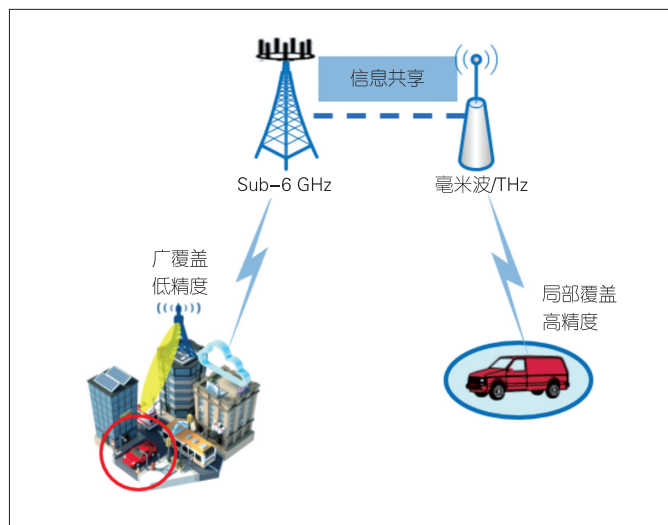


▲图3 多频段协同使能全场景覆盖扩展



▲图4 多频段协同组网

以实现频谱利用率的提升。由于天然的物理性质的约束，不同频段电磁波所能提供的感知功能和业务能力是不同的。理论上，频段越高，波长越短，频带越宽，提供的感知精度和时频分辨率就会越高；但是，由于无线信号的衰减或遮挡，感知有效作用的距离会越短，范围会越小。通常，低频通感融合信号可以做大轮廓的粗浅感知应用，而高频通感融合信号可以做更精细的感知应用。例如，在环境监测场景下，如图5所示，可以综合利用Sub-6 GHz基



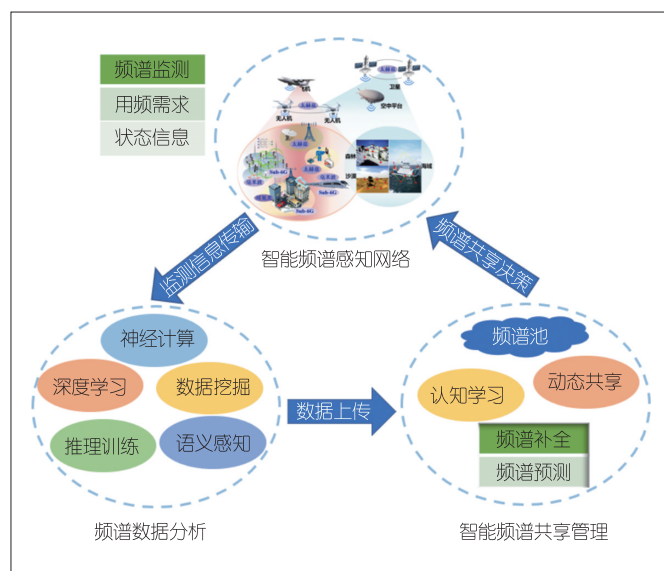
▲图5 高低频协作环境感知

站的穿墙效果好、广覆盖特性做低精度的环境检测，同时，利用毫米波基站或太赫兹基站在重点区域做高精度、小范围的环境检测。工作在不同频段的基站需要相互协作以进行信息共享，通过对特定用户或区域进行联合感知，优化传输或提供丰富的感知服务，降低高频段通信开销。

3.3 多频段智能共享

频谱资源紧缺及利用效率低等问题驱动着智能频谱共享

技术的研究^[9]。频谱资源是制约星地融合的主要瓶颈之一。在星地网络中，频谱资源的使用存在着卫星网络频谱利用率较低、地面网络频谱资源稀缺性严重的问题。为了建立星地统一的频谱资源分配机制，我们需要利用卫星网络和地面网络在通信覆盖方面互补的特性，针对每个子系统对频谱资源不断变化的使用需求，将智能引入基站，从而建立一套智能频谱共享管理体系，如图6所示。该系统可以使各子系统协调使用受限的频谱资源。智能频谱共享技术就是利用认知智能理论和技术实现动态频谱管理。具体地，基于神经计算、深度学习、数据挖掘、推理训练等人工智能（AI）新技术，设计智能频谱共享机制，提出基于数据驱动型和模型驱动型空间频谱环境快速感知、基于AI的空闲频谱精准预测与智能调度，实现动态频谱管理。然而，卫星通信系统与地面通信系统共享频率时，双方都会受到对方同频干扰的影响。我们需要针对不同频段、不同场景，考虑不同的干扰抑制方案。此外，研究基于区块链的分布式且高效的干扰避免或缓解技术，能够实现6G应用中的大规模连接与系统性能增强。



▲图6 面向6G的智能频谱共享管理体系架构

4 未来研究展望

4.1 智能反射面辅助的高频段通信技术

智能反射面是解决高频段毫米波和太赫兹传输时路径损耗大、覆盖能力弱的一项有前景的低功耗、低成本技术。在终端和基站之间部署智能反射面，可以对无线信号进行智能调控与波束赋形^[10]，实现无线传播环境的重构，进而解决信号强度较弱或视距通信不可达的小区边缘或盲区覆盖问题，

按需动态建立非视距通信链路,提高 6G 无线网络覆盖深度性能。为了进一步提高 6G 无线覆盖扩展能力,业界亟待探讨如何将具有波束赋形能力的智能反射面与传统通信系统融合,以及如何实现基站处智能反射面参数与信道环境中的智能反射面参数联合设计。

4.2 绿色高效的高频段通信技术

更高的通信频段使巨量设备接入无线网络,这为移动通信系统实现绿色节能带来了挑战。更高的频段意味着更大的传输损耗,因此如何通过密集部署高频段基站来保证无线覆盖的连续性,成为亟待解决的问题。然而,密集的小区部署使用户面临更频繁的小区切换,这给网络负载和终端能耗带来新的挑战。此外,基于毫米波和太赫兹的基站,其射频、功放等电能消耗巨大。据运营商官方统计,5G 基站的最大功耗约是 4G 的 3~4 倍,因此急需一种低成本、低能耗、高效能的高频段通信技术来支撑绿色 6G 无线网络覆盖扩展的连续性。我们还可以从多频段协同组网的终端能力出发,通过多学科融合和系统性设计,提升终端射频模块传输能力,降低射频模块功耗。

4.3 安全可信的动态频谱共享技术

针对集中式的频谱管理模式面临的频谱资源利用效率低、安全性威胁强和维护费用高等问题,全球相关机构开展了动态频谱共享技术研究。然而,未来 6G 网络是一个多子系统多业务共存共建的全场景网络系统,不同实体之间存在频谱感知误差。而且,不同实体在信息共享中可能实施虚假欺骗行为,潜在的分布式多频段系统组网方式将会带来更多的管控盲点和更隐蔽的攻击风险点。因此,如何建立一个具有可用性、可信性、安全性、公平性和高效性的“动态频谱共享”和“网络共建共享”体系架构,是实现 6G 无线网络覆盖扩展的重要保证。

5 结束语

随着新场景、新业务的出现及垂直行业的发展,探索基于多频段协同的覆盖扩展技术变得日益重要。学术界及产业界正考虑如何通过多频段协同覆盖扩展技术,支撑时空尺度跨度大、业务质量差异大的全场景业务,从而实现 6G 容量与覆盖的双提升、多维立体星地融合场景下的服务与业务质量连续性、1 000 km/h 的超高速移动场景,以及绿色超密集异构深度覆盖场景中的关键业务。

参考文献

- [1] CHEN S Z, LIANG Y C, SUN S H, et al. Vision, requirements, and technology trend of 6G: how to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed [J]. IEEE wireless communications, 2020, 27(2): 218–228. DOI: 10.1109/MWC.001.1900333
- [2] IMT-2030(6G)推进组. 6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书 [R]. 2021
- [3] YOU X H, WANG C X, HUANG J, et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts [J]. Science China information sciences, 2020, 64(1): 1–74. DOI: 10.1007/s11432-020-2955-6
- [4] 信科移动. 全域覆盖 场景智联—6G 场景、能力与技术引擎白皮书 [R]. 2021
- [5] HAN S F, I C L, XU Z K, et al. Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave 5G [J]. IEEE communications magazine, 2015, 53(1): 186–194. DOI: 10.1109/MCOM.2015.7010533
- [6] 陈智, 张雅鑫, 李少谦. 发展中国太赫兹高速通信技术与应用的思考 [J]. 中兴通讯技术, 2018, 24(3): 43–47. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2018.03.008
- [7] 魏克军, 赵洋, 徐晓燕. 6G 愿景及潜在关键技术分析 [J]. 移动通信, 2020, 44(6): 17–21. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.2020.06.003
- [8] 曹丽芳, 江天明, 邓伟, 等. 5G 频段间协同技术 [J]. 电信科学, 2021, 37(8): 148–154
- [9] QIN Z J, ZHOU X W, ZHANG L, et al. 20 years of evolution from cognitive to intelligent communications [J]. IEEE transactions on cognitive communications and networking, 2020, 6(1): 6–20. DOI: 10.1109/TCCN.2019.2949279
- [10] DI RENZO M, ZAPPONE A, DEBBAH M, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: how it works, state of research, and the road ahead [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(11): 2450–2525. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3007211

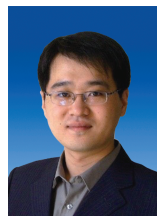
作者简介



韩书君, 北京邮电大学博士后; 主要研究方向为面向 B5G/6G 的新一代移动通信理论与技术; 主持和参加项目 10 余项, 获得 1 项科研成果奖; 发表论文 20 余篇, 申请专利 60 余项。



董晴, 北京邮电大学在读硕士研究生; 主要研究领域为面向星地融合的覆盖扩展技术; 申请专利 2 项。



许晓东, 北京邮电大学教授; 主要领域为无线组网及覆盖扩展技术; 作为负责人完成多项国家级项目, 获北京市科学技术奖二等奖、中国通信学会科学技术奖一等奖, 专著获得“中国出版政府奖”; 近 5 年发表重要期刊论文 50 余篇, 申请专利 80 余项。