

突破无线移动通信蜂窝覆盖局限的路径探讨



Exploring Pathways to Break Through Wireless Mobile Cellular Network Coverage Limitations

李建东/Li Jiandong, 盛敏/Sheng Min, 刘俊宇/Liu Junyu

(西安电子科技大学空天地一体化综合业务网全国重点实验室, 中国 西安 710071)

(State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202602008

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20260428.1031.002>

网络出版日期: 2026-04-28

收稿日期: 2026-03-06

摘要: 无线移动通信覆盖呈现人口密集区域过覆盖、低空立体空域欠覆盖、远域远海无覆盖的非均衡格局。传统蜂窝覆盖已难以满足密集化、立体化及广域按需覆盖需求。围绕如何突破移动通信系统平面蜂窝覆盖局限, 阐述从信号覆盖到容量覆盖、从平面覆盖到立体覆盖、从固定覆盖到广域按需覆盖的技术途径, 探讨密集无线网络中的重叠覆盖干扰管控规律、多棱柱立体覆盖结构、卫星系统和地面移动网络融合的广域按需覆盖等关键技术与基本原理, 形成了广域立体密集无线移动通信覆盖体系, 最后展望了该体系进一步增强的研究方向。

关键词: 无线覆盖; 密集干扰管控; 立体覆盖结构; 融合覆盖方法

Abstract: Wireless mobile communication coverage exhibits a highly heterogeneous pattern characterized by over-coverage in densely populated regions, insufficient coverage in low-altitude airspace, and near-zero coverage in remote wide areas. Conventional cellular networks are increasingly inadequate to support the emerging demands for ultra-dense, three-dimensional, and wide-area coverage. This paper focuses on overcoming the inherent limitations of traditional two-dimensional cellular coverage. It investigates key technological pathways, including the evolution from signal-oriented coverage to capacity-oriented coverage, from two-dimensional coverage to three-dimensional coverage, and from fixed coverage to wide-area ubiquitous coverage. Furthermore, we explore the fundamental principles and enabling technologies, including interference management in dense wireless mobile networks, three-dimensional coverage structures based on multiple-prism architectures, and wide-area coverage enabled by the combination of mobile core networks and satellite systems. The wireless coverage architecture for wide 3D dense wireless mobile communication systems is established. Finally, future research directions to enhance the capability of the coverage architecture are discussed.

Keywords: wireless coverage; interference management in dense networks; three-dimensional coverage structure; integrated coverage scheme

引用格式: 李建东, 盛敏, 刘俊宇. 突破无线移动通信蜂窝覆盖局限的路径探讨 [J]. 中兴通讯技术, 2026, 32(2): 50-55. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602008

Citation: Li J D, Sheng M, Liu J Y. Exploring pathways to break through wireless mobile cellular network coverage limitations [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(2): 50-55. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602008

党的十八届五中全会提出, 实施网络强国战略和国家大数据战略, 拓展网络经济空间, 促进互联网和经济社会融合发展^[1]。无线覆盖是构筑网络空间的基石, 决定了网络经济的发展速度、辐射范围与影响程度。我们需要保证国家利益在哪里, 无线覆盖就到哪里。伴随着第6代移动通

信、人工智能、智能体互联网等战略基础设施的兴起, 20世纪由美国贝尔实验室提出并沿用至今的蜂窝覆盖体系, 已不再满足密集化、立体化、广域化的信息大动脉建设需求。为此, 本文围绕如何突破传统平面蜂窝覆盖展开探讨, 破解现有网络空间“过覆盖”“欠覆盖”“无覆盖”并存的难题。

1 移动通信无线覆盖的现状与需求分析

移动通信无线覆盖网络整体呈现出鲜明的非均衡格局, 具体表现为: 人口聚集区网络重叠部署过覆盖、低空立体空

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB2902300); 国家自然科学基金项目(62121001); 陕西省重点研发计划项目(2024CY2-GJHX-82)

域大范围欠覆盖以及远域远海等偏远区域无覆盖。本节将从地理地貌、经济发展、产业布局等多个角度对该非均衡的格局展开分析,分析改变这一格局的关键需求,为突破传统蜂窝覆盖的局限,构建广域、立体、密集的空天地一体化覆盖体系奠定基础。

1) 蜂窝基站密集部署区域,信号重叠过覆盖

在经济发达的人口聚集区(如中国胡焕庸线东南侧),通信基站部署密集,信号重叠过覆盖特征明显。这些地区以平原、沿海平缓地貌为主,地势开阔,无大面积荒漠与山地阻隔,蜂窝基站选址、部署与管线铺设难度低,为高密度蜂窝覆盖创造了基础条件。特别是发达的智慧大都市、大型交通枢纽、奥运会/全运会场馆、网红热门旅游景点,蜂窝基站高度密集部署,密度达每平方公里数百甚至到数千个。重叠覆盖引发严重的同频干扰,造成资源冗余^[2]。实测数据表明,此类超密集部署区域的用户信干噪比显著恶化,小区平均吞吐量下降40%~60%,有效覆盖性能下降50%以上,“有信号、无服务”的过覆盖问题突出。

2) 低空空域覆盖基础薄弱,立体空间欠覆盖

随着低空物流、无人机巡检、低空安防等新兴产业的快速发展,低空通信需求持续增长。传统地面蜂窝基站以下倾波束对地覆盖为主,信号能量集中于地表区域,垂直覆盖能力有限;受基站天线旁瓣辐射、地面反射与多径效应等因素的影响,立体空间信号杂乱,有效接收功率随高度增加迅速衰减,难以形成连续、可靠的垂直覆盖。实验结果表明,300 m以上中低空区域的网络覆盖率不足40%^[3]。低空覆盖能力的不足将直接导致飞行器通信中断与定位精度下降,引发偏航失控、航路冲突等安全隐患,这对低空空域覆盖的连续性与可靠性提出了远高于地面网络的要求。

3) 远域远海覆盖边界受限,移动通信无覆盖

在中国胡焕庸线西北侧的塔里木盆地、柴达木盆地,以及渤海湾海上油气等开发区域,受地面蜂窝基站覆盖距离的限制,仅能实现距公网50 km以内的近域、近岸、近海及浅滩区域的有效覆盖。离公网百公里或数百公里以外的中远海、深海远域脱离公网覆盖范围,难以满足油气勘探开发、安全生产及远洋航行的业务需求^[4]。远域远海的移动通信无覆盖已经成为制约中国油气等战略资源开发、海洋经济发展与海上安全保障的瓶颈。

针对上述无线移动通信覆盖中的过覆盖、欠覆盖以及无覆盖现状,本文以构建密集、立体、广域无线移动通信覆盖体系为目标,聚焦以下3个关键路径,以突破传统地面二维蜂窝覆盖的局限。

1) 构建弹性资源小区,消除密集重叠覆盖干扰

针对基站密集、信号重叠覆盖、资源利用率低的问题,深入分析密集覆盖场景的电波传播模型,挖掘重叠覆盖干扰与基站部署密度之间的关系,设计网络化重叠覆盖干扰协同管控技术。构建弹性资源小区(在该区域内可对干扰进行操控和抵消),消除冗余覆盖干扰,提升网络密集区域内的系统速率(单位面积传输速率),化解过覆盖带来的干扰大、成本高、资源浪费等痛点,为密集覆盖区域内每个用户提供极速通信体验。

2) 建立多棱柱立体覆盖结构,实现低空无空洞覆盖

针对当前中低空信号覆盖率不足、垂直信号弱、空地链路高动态特性导致的服务不稳定问题,需构造低重叠、无空洞的最优多棱柱立体覆盖结构。以地面非规则部署的蜂窝基站为基础,进行基站簇化分割,形成适配多场景的多层协同覆盖模式,逼近立体覆盖的最优系统容量,从而实现千米级以下空域的无空洞、连续稳定覆盖。

3) 打破蜂窝固定覆盖边界,构建远程按需移动覆盖

针对远域远海无蜂窝覆盖的难题,要突破弱信号增强关键技术,扩展公用移动通信网的覆盖边界。同时利用现有卫星系统的广域覆盖特性,研制可移动的融合基站,构建便携式移动通信网络,实现网络随身行,从而攻克远域远海无移动通信覆盖的难题,实现远域、远海的连续高速无线覆盖,建成覆盖战略资源区的信息大动脉。

下文将围绕从信号覆盖到容量覆盖、从平面覆盖到立体覆盖、从固定覆盖到广域按需覆盖这三大关键路径,梳理实现这些转变的基本原理与关键技术,阐述各类典型应用场景并归纳未来研究方向与挑战。

2 从信号覆盖到容量覆盖

早期移动通信网络的建设以消除覆盖盲区为核心目标,面向低密度用户和低速率业务场景,解决信号“从无到有”的问题,遵循“广覆盖、低承载、稳接入”的思路,保障语音通话、短信、低速网页浏览等基础通信需求。通常采用蜂窝组网架构,该架构下蜂窝小区边界固定,以宏基站为主、少量微基站为辅进行部署,实现大面积信号铺展。

随着智慧城市、工业物联网、车联网等场景的兴起,传统信号覆盖已难以满足通信需求,网络建设理念由信号覆盖向容量覆盖转变。容量覆盖在保证连续覆盖的基础上,以提升网络容量、传输速率及并发接入能力为核心。为此,网络密集化成为实现容量覆盖的关键手段,旨在通过大量部署蜂窝基站以提升资源的空域复用能力,进而提升系统容量。然而,在密集化过程中,蜂窝基站与用户之间的链路由“远距离/非视距传播”向“近距离/视距传播”转变。与此同时,

干扰信号呈现弱差异性和强相关性，致使干扰增长速度快于有用信号，引发干扰翘变现象^[5]，如图1 (a) 所示。该现象会导致系统速率塌陷，即当基站密度持续增加并超过临界基站密度时，系统速率不会增加，反而快速下降，如图1 (b) 所示。

为解决系统速率塌陷问题，需突破传统固定蜂窝小区的局限 (如图2所示)，利用网络化的干扰管控方法，以用户为中心搭建弹性资源小区覆盖结构。该结构通过整合基站资源形成统一资源池和干扰操控空间，并根据业务分布动态调整小区形态：在高负载区域分裂小区以提升频谱利用率，在低负载区域合并小区以减少干扰与资源浪费。同时，资源小区支持无缝切换，用户移动过程中无需频繁更换小区接入，实现“网随人至”的弹性覆盖^[6]。

基于资源小区结构，可采用基于“先激活后关联”的具体干扰管控方案。该方案首先根据用户分布与基站负载水平，对空载、低负载基站进行休眠，仅按需激活必要的基站

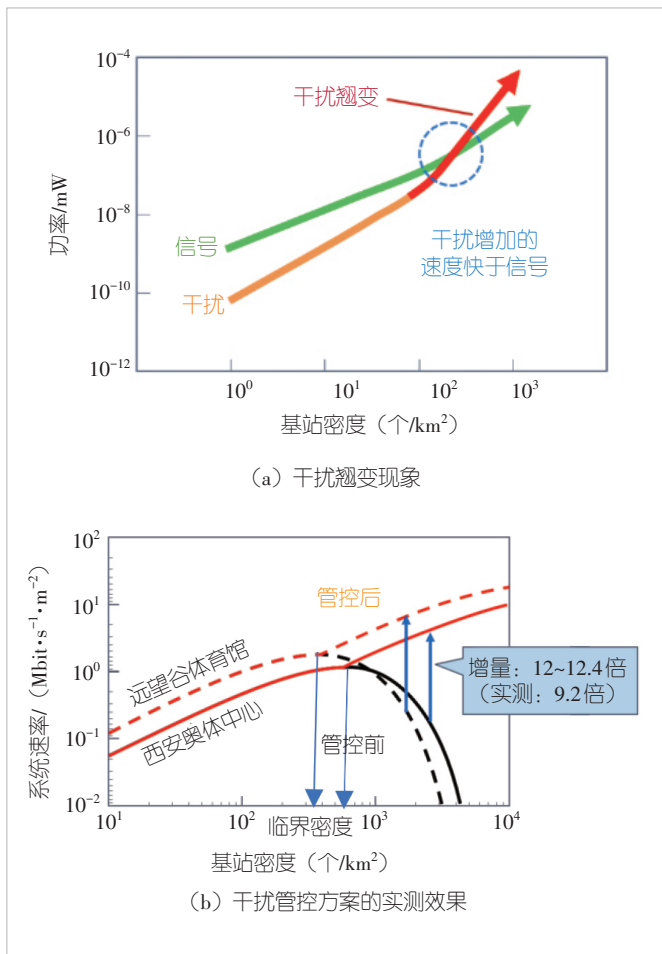


图1 密集网络中的干扰翘变现象与干扰管控效果

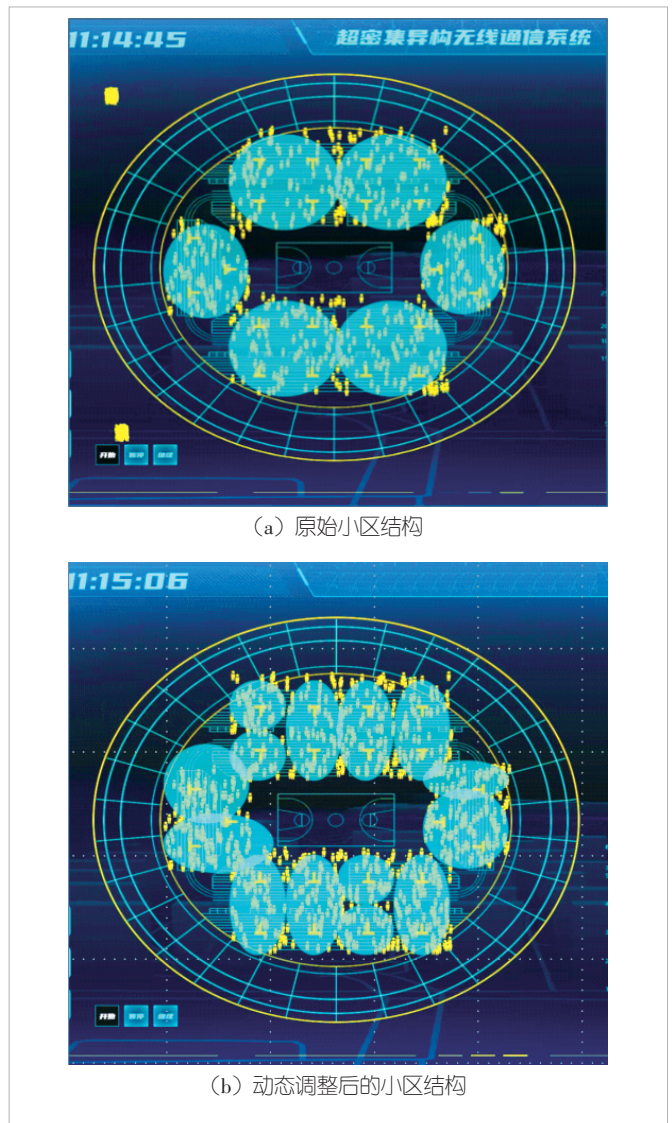


图2 弹性资源小区覆盖结构

节点，从源头减少干扰源数量，并利用干扰对齐/转移/中和等干扰操控技术，降低重叠覆盖带来的同频干扰。进一步地，对于已激活的基站，可根据基站与用户之间的信道质量与干扰水平，为用户关联干扰水平最低的基站，使有用信号强度增加的速度快于干扰信号，保障系统速率持续提升。该方案在西安奥体中心与西安远望谷内得到验证。实测结果表明，系统速率可提升9.2倍，如图1 (b) 所示。

3 从平面覆盖到立体覆盖

随着低空经济的快速发展，无人机巡检、低空物流等低空业务规模化应用，1 000 m 以下低空空域已成为新的通信主战场，无线移动通信网络必须从地面二维平面覆盖向空地一体三维立体覆盖演进。传统蜂窝平面覆盖架构面向空域延

伸存在明显短板：1) 垂直覆盖能力薄弱：传统基站天线垂直波束宽度窄、下倾角固定，难以有效指向高空，导致中高空域信号快速衰减，形成大范围覆盖空洞；2) 覆盖结构不匹配空域特性：地面六边形蜂窝向空域延伸后，波束间重叠急剧增加、干扰难以控制，造成频谱效率大幅下降；3) 无法支撑空中高速移动：空中用户移动速度快、跨区频繁，链路连续性差，无法满足低空业务稳定通信需求。由此可见，面向低空新场景，传统平面覆盖模式已无法满足需求，亟需构建适配三维空间的立体覆盖结构^[7]。

立体覆盖结构的设计理念是在保持地面蜂窝网络基本架构不变的前提下，将二维平面覆盖单元沿垂直方向扩展，形成可填充的三维多棱柱立体覆盖结构。在保证空地连续覆盖的同时，最小化空域信号重叠率，从而实现无空洞、低干扰的立体覆盖。该结构可由平面结构延伸得到三棱柱、四棱柱、六棱柱等多种多棱柱覆盖结构。分析结果表明：四棱柱与六棱柱结构在空域内波束交叉重叠区域大，邻区干扰严重；而三棱柱结构在相同覆盖条件下，空间重叠率最小，波束关系清晰，干扰水平可控^[8]。因此，三棱柱是实现地对空立体覆盖的最优基本结构，能够在实现无缝三维覆盖的同

时，最大限度地降低重叠干扰，提升空域通信容量与稳定性，如图3所示。

为实现三棱柱覆盖单元内的无空洞、低重叠覆盖，可采用分层波束填充方法，如图4所示。该方法依据天线倾角正切切分规则，将三棱柱沿高度划分为低、中、高三层。地面3个基站的扇区波束分别指向3个高度层，形成分层覆盖填充模式。通过联合优化天线倾角、水平/垂直波束的宽度/高度以及发射功率，使三层波束在满足接收信号强度门限的前提下，填满整个三棱柱空间，最大限度减少层间重叠与邻区干扰。该方法可充分复用现有基站与天线资源，在不改变地面覆盖质量的前提下，实现1 000 m以下低空空域全覆盖，实测覆盖率达99%以上，为低空通信提供稳定可靠的通信保障。

4 从固定覆盖到广域按需覆盖

随着油气等战略资源的开发和利用、应急救援与海洋经济的快速发展，无线移动通信覆盖需要向人烟稀少的盆地、边远山区、沙漠、远域远海的广域空间演进。它要突破地面固定覆盖部署的限制，攻克系统干扰情况下的弱信号增强技

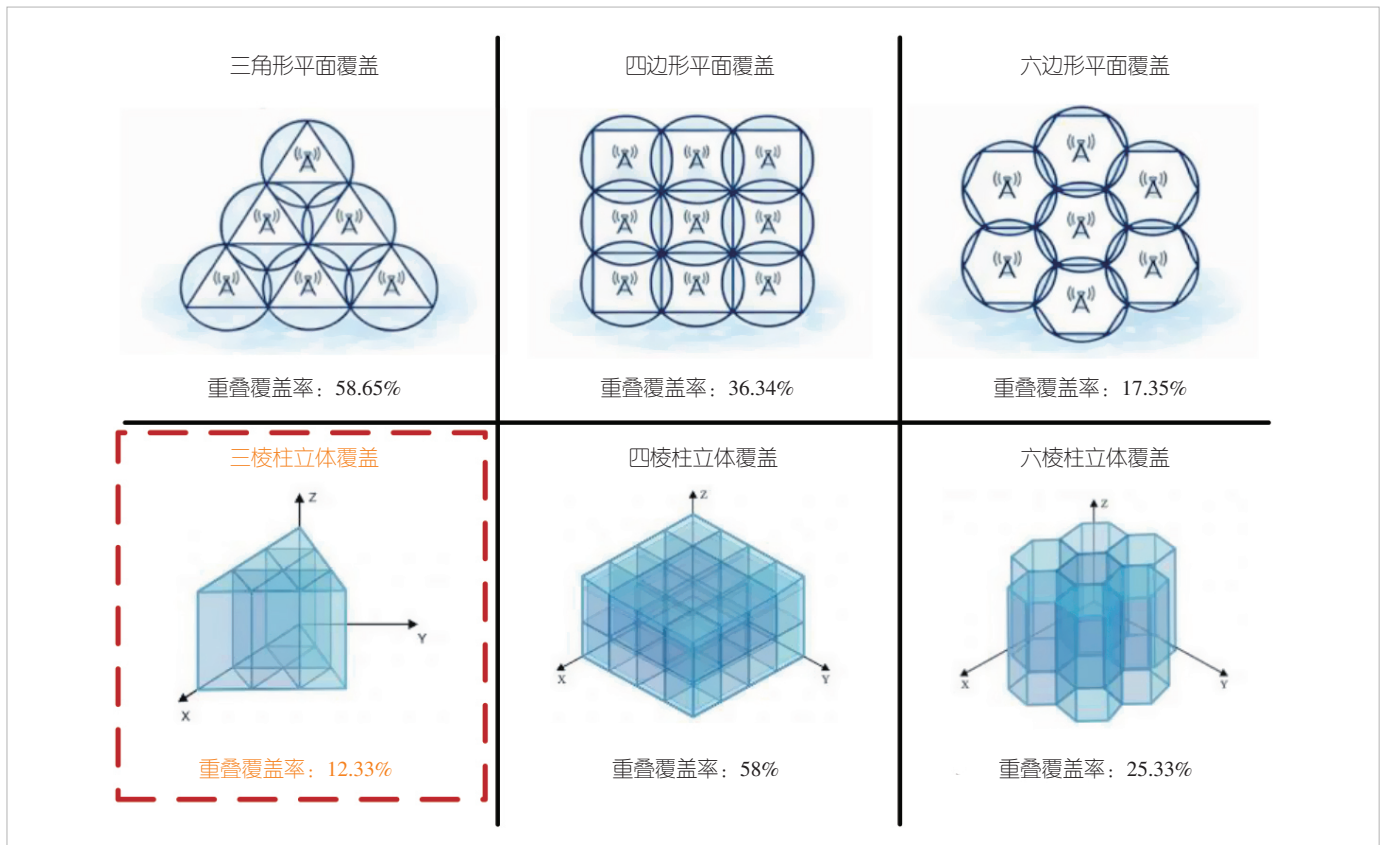


图3 平面覆盖结构与立体多棱柱覆盖结构

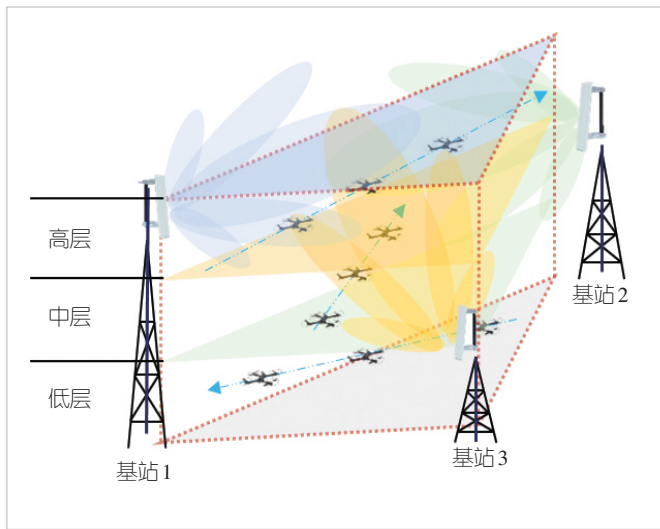


图4 三棱柱立体分层覆盖方法

术，延长公用移动通信覆盖距离，以扩展公用移动通信网的覆盖边界。同时利用现有卫星系统的广域覆盖特性，构建可移动融合基站，通过地面移动网络和卫星系统的并发传输，快速搭建高速伴随式的移动通信网络，实现“网络随身行”，解决广域按需覆盖的难题，消除生产区域的覆盖盲区，形成满足行业需求的信息大动脉^[9-10]。

按需覆盖是经济、高效地解决广域内重点/热点区域无线移动通信覆盖的方法。它要解决如下3方面的问题：1) 重点区域到公用基站的弱信号传输。重点区域（如油气田的钻井勘测点）到公网基站平均距离在百千米量级，参考信号接收功率低于门限接收电平，从而成为移动通信盲区。需采用微弱信号伴随式接力增强技术来扩展伴随式基站的回传距离。2) 多模式接续覆盖和多路并传覆盖。融合基站应当能够自动感知业务需求和传输环境，综合利用地面接续、卫星接续以及星地协同接续等覆盖模式，自动切换工作模式，确保复杂场景下信息全天候可靠回传。3) 快速部署和按需自组织覆盖。为了满足野外作业、应急部署的需求，融合基站应能够满足分钟级快速部署要求，且能够根据环境按需自组织入网，独立或联合构建满足业务需求的稳定移动通信覆盖网络。

按需覆盖的典型场景如图5所示。其中，图5(a)为油气田钻井勘探平台独立覆盖场景，图5(b)为多融合基站在应急救援区联合构建稳定覆盖。该技术可低成本、快速解决多行业、多地广域按需覆盖的需求。

5 无线移动通信覆盖的未来研究方向

面向下一代空天地海一体化通信愿景，未来移动通信系

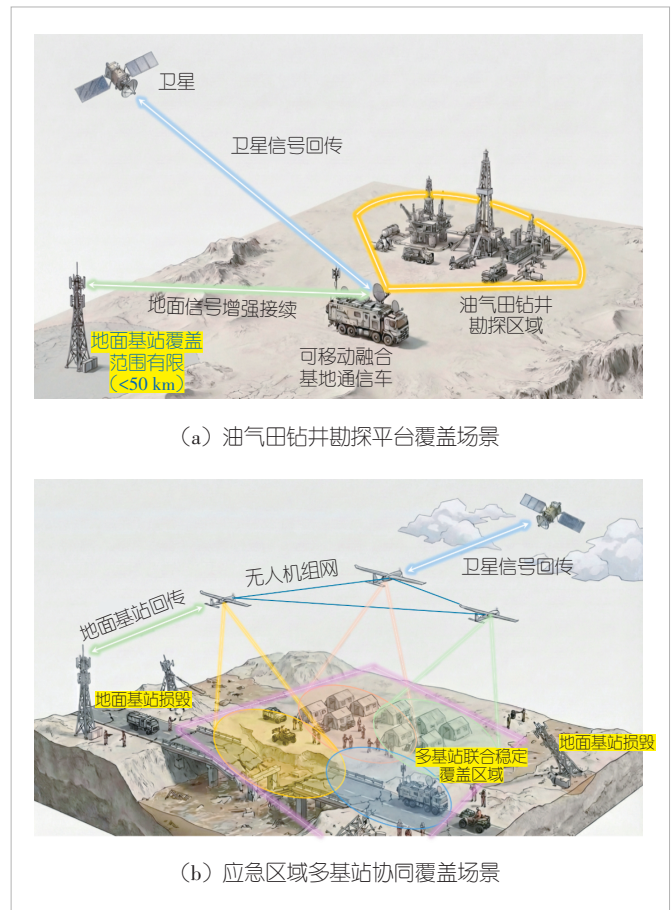


图5 按需覆盖的典型场景

统在无线广域立体密集覆盖体系上，围绕绿色低碳、智能原生、安全可控三大核心方向深度演进，强化高效能、自治化、内生安全等能力，从而进一步丰富广域立体密集无线移动通信覆盖体系。

1) 绿色低碳覆盖：可持续将成为未来全域无线覆盖的核心发展主线。以全生命周期能耗最低为目标，针对密集组网、立体延展、卫星广覆盖带来的高能耗问题，探索可再生能源供应、跨制式网络协同节能、覆盖与容量联合优化，实现全场景低碳高效运行，推动网络从性能优先向超低能耗优先转型。

2) 智能原生覆盖^[10]：随着大模型、智能体等AI技术的深度渗透，将智能原生嵌入网络覆盖规划、部署、优化与运维全流程。构建感知、决策、执行、反馈的闭环智能覆盖管控机制，使移动通信网络具备自组织、自修复、自演进能力，从而支撑覆盖结构、接入能力与业务分布更加精准匹配。

3) 安全可控覆盖：面向全域泛在连接，构建高可靠、抗干扰的内生安全体系。针对卫星链路、地空接入、远域远

海覆盖等场景存在的安全风险，重点研究空天地海一体化抗干扰安全传输、异常行为检测与入侵防御，保障低空通航、远域生产、远洋作业、边境安防等场景的通信安全。

6 结束语

本文以突破传统平面蜂窝覆盖为主题，分析了当前无线移动通信网络过覆盖、欠覆盖、无覆盖并存的深层成因，明确了：1) 构建弹性资源小区，消除密集重叠覆盖干扰；2) 建立多棱柱立体覆盖结构，实现低空无空洞覆盖；3) 打破蜂窝固定覆盖边界，构建远程按需移动覆盖的三大核心任务。围绕该任务，阐述了从信号覆盖到容量覆盖、从平面覆盖到立体覆盖、从固定覆盖到广域按需伴随覆盖的三大变革路径，形成了突破传统蜂窝覆盖的系统性理论框架与技术体系，建立了广域立体密集无线移动通信覆盖体系。最后，明确了绿色低碳、智能原生、安全可控将成为广域立体密集无线覆盖体系演进的新特征，为未来无线移动通信覆盖提供了重要参考。

参考文献

- [1] 习近平. 不断做强做优做大我国数字经济 [J]. 求是, 2022(2): 4-15
- [2] 中国联通智能城市研究院. 智慧城市统一运营白皮书 [R]. 2023
- [3] 中国信息通信研究院. 低空智联网发展研究报告 [R]. 2024
- [4] 紫金山实验室, 北京邮电大学. 卫星互联网承载网技术白皮书 [R]. 2025
- [5] Liu J Y, Sheng M, Li J D. Improving network capacity scaling law in ultra-dense small cell networks [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2018, 17(9): 6218-6230. DOI: 10.1109/TWC.2018.2856766
- [6] 尤肖虎, 王东明, 曹阳. 6G 无蜂窝大规模 MIMO 关键技术研究进展 [J]. 中兴通讯技术, 2026, 32(1): 29-37. DOI: 10.12142/ZTETJ.202601006
- [7] Huang Y H, Ding H Y, Cao L, et al. A new interference-resilient scalable networking for low altitude [J]. Science China information sciences, 2026, 69(3): 132305. DOI: 10.1007/s11432-025-4684-x
- [8] Liu J Y, Sheng M, Li J D, et al. Ground-to-air wireless coverage extension for 6G: a triangular prism structure-based approach [J]. Science China information sciences, 2024, 67(12): 224301. DOI: 10.1007/s11432-024-4221-x
- [9] Sheng M, Zhou D, Bai W G, et al. 6G service coverage with mega satellite constellations [J]. China communications, 2022, 19(1):

64-76. DOI: 10.23919/JCC.2022.01.006

- [10] Liu J J, Shi Y P, Fadlullah Z M, et al. Space-air-ground integrated network: a survey [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2018, 20(4): 2714-2741. DOI: 10.1109/COMST.2018.2841996

作者简介



李建东，西安电子科技大学教授，博士生导师，空天地一体化综合业务网全国重点实验室学术委员会副主任、首席科学家，信息与通信工程学部执行主任，国家级创新团队负责人，三秦杰出人才，国家新一代宽带无线移动通信网重大专项总体组专家，宽带无线IP技术标准工作组组长，中国电子学会会士，中国通信学会会士，IEEE Fellow；主要从事新一代无线移动通信、智能互联网络技术、智能自组织无线网络技术、空间信息网络方面的研究；先后主持“863”计划重大课题、国家自然科学基金重大项目等；获国家技术发明奖二等奖2项、省部级科技进步奖6项，主持和推动了4项无线局域网国家标准的制定和实施。



盛敏，西安电子科技大学教授、博士生导师，空天地一体化综合业务网全国重点实验室主任，科技部6G总体专家组成员，IEEE西安分会副主席，中国电子学会会士，中国通信学会会士，IEEE Fellow，国家级创新团队负责人，青年女科学家团队负责人，国家精品在线课程负责人，担任《IEEE Transactions on Wireless Communications》《China Communications》等多个期刊的编委会委员；主要从事空间信息网络、移动通信网络、异构网络融合、无线自组织网络等领域的研究工作；获国家技术发明奖二等奖2项、省部级一等奖4项。



刘俊宇，西安电子科技大学教授、博士生导师，空天地一体化综合业务网全国重点实验室成员，国家级青年人才；主要从事无线覆盖技术、异构密集无线网络容量理论及组网技术、天地一体化网络智能组网技术方面的研究；主持国家重点研发计划课题/子课题、国家自然科学基金面上项目、陕西省重点研发计划等国家级及省部级项目10余项；获省部级和全国学会级科学技术奖励6项。