

面向6G典型场景的高能效立体覆盖技术研究



High Energy-Efficiency Three-Dimensional Coverage Technology for 6G Typical Scenarios

张吉发/ZHANG Jifa, 黄香港/HUANG Xianggang, 赵楠/ZHAO Nan

(大连理工大学, 中国 大连 116024;
(Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202501007

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20250310.1730.004.html>

网络出版日期: 2025-03-11

收稿日期: 2024-12-20

摘要: 针对无人区监测、全域应急通信和超大规模机器类通信场景, 基于无人机通信等技术, 提出了高能效多维立体资源分配方案。通过构建考虑环境约束和无人机机动特性的系统模型, 在保障用户服务质量的前提下, 最大化通信网络的能量效率。仿真实验验证了该方案在能效提升方面的有效性, 为高能效多维立体覆盖通信网络的实现提供了理论依据和实践指导。

关键词: 能效; 非正交多址接入; 立体覆盖; 无人机

Abstract: Aiming at scenarios such as unmanned area monitoring, whole-area emergency communication, and ultra-large-scale machine-type communication, a high-energy-efficiency multi-dimensional resource allocation scheme has been proposed based on technologies including unmanned aerial vehicle (UAV) communication. By constructing a system model that considers environmental constraints and the mobility characteristics of UAVs, the scheme maximizes the energy efficiency of the communication network while ensuring the quality of service for users. Simulation experiments have validated the effectiveness in enhancing energy efficiency, providing a theoretical foundation and practical guidance for the realization of high-energy-efficiency multi-dimensional coverage communication networks.

Keywords: energy efficiency; non-orthogonal multiple access; three-dimensional coverage; unmanned aerial vehicle

引用格式: 张吉发, 黄香港, 赵楠. 面向6G典型场景的高能效立体覆盖技术研究 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(1): 39-47. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501007

Citation: ZHANG J F, HUANG X G, ZHAO N. High energy-efficiency three-dimensional coverage technology for 6G typical scenarios [J]. ZTE technology journal, 2025, 31(1): 39-47. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501007

随着物联网等新一代信息通信技术的普及, 接入设备和传输数据量激增, 这对下一代6G网络提出了更高的要求。6G网络需要在传输速率、可靠性、连接密度、频谱效率和能量效率等方面实现显著提升。基于5G的三大应用场景——增强移动宽带、超大规模机器类通信和超高可靠超低时延通信, 6G将通过持续的技术创新来提升性能并优化用户体验^[1]。其中, 超大规模机器类通信凭借其超大网络容量, 能够支持海量设备连接, 实现人与机器、机器与机器之间的无缝通信, 从而推动大规模物联网的快速发展^[2]。

随着物联网等技术的快速发展, 用户对随时随地高速无线接入的需求日益增长, 这对移动通信网络的覆盖范围和容量提出了更高要求。传统移动蜂窝网络主要基于二维平面部署, 导致单位面积内的频谱效率受到明显限制。与此同时, 城市化进程加速, 城市空间逐渐向立体化发展, 单位面积内的用户密度持续增加, 多元化的通信业务显著提升了单位面积网络总容量的需求。仅依靠物理层传输技术的改进和平面蜂窝网络架构的优化, 已难以满足城市化发展的需求。因此, 随着6G技术的兴起, 基于无人机的多维立体覆盖技术作为一种新型网络架构被纳入白皮书, 并受到全球专家学者的广泛关注。

无人机作为一种新兴技术, 在军事和民用领域具有广泛

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFB1807002)

的应用前景。随着技术的不断进步,无人机在通信领域的应用也日益增多,主要体现在以下3个方面:一是作为辅助基站,分担负载或替代损坏的基站为用户提供服务;二是为缺乏可靠直通链路的用户提供中继支持;三是用于信息传播和数据收集^[3]。无人机基站的优势在于其部署灵活、成本低廉,能够有效满足动态变化的通信需求。与传统地面基站相比,无人机基站具备独特的优势。通过调整飞行高度和轨迹,无人机能够避开障碍物,增加与地面用户建立视距通信链路的可能性,从而减少信号衰减和阻塞效应,提供更高质量的通信服务。然而,无人机基站的续航能力受限于机载能量,这些能量主要用于信号处理和飞行推进。因此,如何优化飞行轨迹以提高能量效率,延长无人机的续航时间,成为当前亟待解决的关键问题。

本文深入研究了基于无人机通信的高能效立体覆盖技术,重点探讨了无人机在该领域中的关键作用。首先,系统梳理了空地立体覆盖技术的现状与发展趋势。随后,针对6G通信中的三大典型应用场景——无人区实时监测、全域应急通信和大规模机器类通信,提出了创新的无人机高能效立体覆盖解决方案,并通过仿真实验验证了方案的有效性。在此基础上,进一步探讨了该技术的未来研究方向。最后,对研究成果进行了全面总结。

1 基于无人机通信的空地立体覆盖技术

随着移动通信技术的不断发展,用户对于网络覆盖的需求也日益多样化,立体覆盖技术应运而生,成为满足用户需求的重要手段之一。该技术通过优化网络架构和信号传输方式,将移动通信网络的覆盖范围从传统的二维平面扩展至三维空间,从而实现更全面、更高效的网络覆盖。本章将详细介绍立体覆盖技术中的无人机通信、非正交多址接入(NOMA)等关键技术,并对现有研究成果进行总结。

1.1 无人机通信技术

无人机通信通过将无人机作为空中信息处理和分发中心,实现了对地面基站的立体扩展和动态补充。得益于其低功耗、易部署的特性以及良好的视距(LoS)信道条件,无人机基站能够显著降低通信成本。因此,这一技术受到了全球专家学者的广泛关注。

陈新颖等在文献[4]中讨论了6G中无人机的应用场景与功能,例如辅助地面移动通信、无人机中继网络、无人机数据采集等,并且阐述了6G无人机通信中太赫兹、超大规模天线阵列等技术。LYU等在文献[5]中提出了一种创新的混合网络架构,通过引入无人机作为空中移动基站,实现了小

区边缘用户数据流量的智能卸载。该架构采用无人机沿小区边缘动态巡航的策略,并结合无人机轨迹优化、带宽资源分配和用户分区管理的联合优化机制。与传统的小型蜂窝卸载方案相比,该架构显著提升了系统通信吞吐量,为解决小区边缘用户服务质量问题提供了有效方案。HU等在文献[6]中研究了无人机辅助的移动边缘计算问题,在通信链路严重阻塞的情况下,利用无人机灵活部署的特点实现视距传输,并通过联合优化计算资源调度、带宽分配和无人机轨迹降低无人机和用户的能耗。在文献[7]中,SAMIR等研究了无人机应用于物联网设备数据采集的问题,根据物联网设备不同的服务质量需求,优化无人机的轨迹和资源分配并最大限度地增加服务物联网设备的数量。

然而,由于无人机机载能量有限,无人机基站的能量主要用于信号处理以及飞行推进,因此,如何合理地规划飞行轨迹,提高无人机基站的能量效率,延长无人机的续航能力,是一个亟待解决的问题。为此,ZENG等在文献[8]中建立了固定翼无人机的能量消耗模型,并基于该模型对无人机飞行轨迹进行了优化研究,具体包括以下3种情况:能量最小化、固定圆形轨迹下的能效最大化以及一般轨迹情况下的能效最大化问题。EOM等在文献[9]中对无人机上行通信链路进行了研究,通过优化无人机飞行轨迹提高了系统能量效率。

1.2 基于NOMA的空地立体覆盖技术

NOMA技术通过允许用户间共享时频资源,显著提高了频谱效率和系统接入设备数量,因此受到了全球学术界的广泛关注。ISLAM等在文献[10]中对NOMA中的关键技术进行了深入探讨,并分析了其与协同通信、波束成形等无线通信技术结合时的性能表现。此外,FANG等在文献[11]中通过优化子信道分配和功率分配策略,进一步提高了下行NOMA网络的能量效率。他们还提出了一种针对子信道分配问题的创新算法,并通过与正交频分多址(OFDMA)方案的对比实验,验证了所提出资源分配方法的优越性能。这些研究为NOMA技术的实际应用奠定了重要基础。

6G网络中的超大规模机器类通信场景对网络接入数量和功耗提出了更高要求,需要支持海量设备接入并实现低功耗运行。为提升频谱效率并降低能耗,基于NOMA技术的无人机辅助网络被视为解决这些挑战的有效方案。已有研究从多个角度验证了该技术的优势:LIU等在文献[12]中通过构建性能评估框架,深入研究了NOMA无人机网络的用户配对问题,提出了3种优化配对方案,并创新性地采用机器学习方法解决了无人机部署位置和移动轨迹优化问题;NASIR等

在文献[13]中从系统性能优化角度出发,在满足发射功率和天线波束宽度等约束条件下,针对最大最小速率优化问题提出了一种高效的路径跟踪算法,通过理论分析和实验验证,证实了NOMA技术在无人机通信场景中相较于传统正交多址接入技术的显著性能优势。

1.3 空基接入点应急通信中绿色立体覆盖技术

随着无人机技术的不断进步,无人机可以被当作中继或基站来建立应急通信系统。灾后地区可能因高流量负载导致通信拥堵和资源需求激增,这对网络容量和能效构成严峻挑战,进而影响整体通信性能。

MERWADAY等在文献[14]中使用遗传算法来获取无人机的最佳位置,从而提高了网络吞吐量。ZHAO等为无人机辅助的灾难应急网络建立了一个框架^[15]。在考虑到自然环境和无人机能耗限制的情况下,HUANG等针对紧急场景下的用户信息采集与传输问题,提出了一种基于凸优化方法的路径优化方案^[16],该方案重点解决了悬停点选择与移动性规划等关键技术问题。

尽管已有部分研究探讨了无人机辅助的高能效覆盖技术,但针对6G典型场景的高能效立体覆盖技术研究仍较为匮乏。为此,本文聚焦无人区实时监测、全域应急通信和大规模机器类通信三大6G典型应用场景,提出了一种无人机高能效立体覆盖方案,并通过实验验证了该方案的有效性,填补了这一领域的研究空白。

2 面向6G网络的无人区实时监测能效提升技术

6G技术预计到2030年将实现“泛在覆盖”,成为网络的主要形态。这一技术将完成在深山、深海等“无人区”的网络部署,实现空、天、地、海全域覆盖,从而推动社会治理的便捷化、精细化和智能化。然而,在无人区建造和监控基站将耗费大量人力和财力,费效比较低。在此背景下,空基接入点基站相较于传统地面基站具有显著优势,尤其是对环境变化的适应能力更强。因此,部署空基接入点基站于无人区,用于实时监测,将是一种更为高效和经济的解决方案。

2.1 模型构建

如图1所示,本研究采用空基接入点对无人区进行实时监测。该空基接入点搭载基站,在监测区域上空以盘旋方式运行,实现立体化、广域化和移动化的网络覆盖。基于此架构,本研究提出了一种联合优化方案,通过协同优化空基接入点的飞行中心点位置、飞行半径和功率分配,显著提升系统能量效率,实现绿色节能的立体覆盖。

为便于分析,本研究设定监测区域为半径2 km的圆形蜂窝小区,区域内分布有 K 个接入设备,这些设备在0~300 m的垂直空间内呈立体分布。空基接入点在高度 H 处以圆形轨迹飞行,飞行周期为 T ,需确保与 K 个设备保持实时通信并满足预设的速率要求。所提出的优化方案通过系统地调整飞行中心点、飞行半径和功率分配参数,实现了小区能量效率的显著提升。

为验证所提方案的有效性,本研究设计了一种基准方案作为对比。该基准方案采用以下策略:空基接入点以小区中心为飞行中心点,采用平均功率分配方式,并选择使推进功率最小的飞行速度 $V_{op} = (C_1/3C_2)^{1/4}$ m/s。

2.2 仿真结果

我们设置空基接入点的飞行周期为 $T=100$ s,飞行高度 $H=1$ km, $V_{min}=10$ m/s, $V_{max}=100$ m/s, $a_{max}=10$ m/s²。用户数 K 设置为200,每个用户的带宽设置为 $B=360$ kHz,门限设置为 $R_{th}=26.0$ Mbit/s。载波频率为4.9 GHz,空中基站固定消耗功率为160 W,最大发射功率设置为5 W。空地信道均采用LoS信道。蜂窝小区半径为2 000 m。除非特别说明,以上参数为默认参数。

图2为不同方案下空基轨迹对比。相较于基准方案,优化方案能根据用户分布灵活选取空中基站圆形轨迹中心,并优化轨迹半径。优化方案的能效为15.03 Mbit/J,基准方案的能效为14.60 Mbit/J,仿真结果验证优化方案的有效性。

图3展示了不同发射功率下的多种空基轨迹半径能量效率对比。我们以小区中心为飞行中心点,选取了360 m、

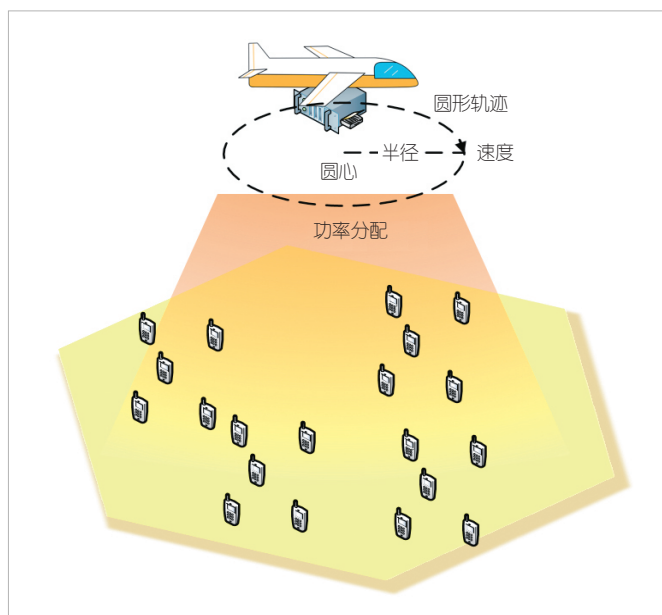


图1 空基接入点实时监测无人区

460 m和560 m这三种半径进行对比。结果显示，随着发射功率的增加，3种方案均能满足更大的用户信息量需求，因此能量效率均有所提升。当半径为460 m时，空基接入点的飞行速度接近 V_{op} ，此时能量效率达到较高水平；若速度低于或高于该值，能量效率均会下降。本文提出的优化方案在发射功率增加时，能量效率也持续上升，并且在每种发射功率下均表现出最高的能量效率。这表明优化方案不受发射功率变化的影响，能够持续有效地提升能量效率。

图4展示了用户数递增时，优化方案和基准方案在一个周期内的信息量、能耗和能量效率的变化趋势。如图所示，随着用户数的增加，信息量和能量效率均呈现上升趋势，而

能耗则有所增加。尽管优化方案的能耗高于基准方案，但由于其传输的信息量显著增加，因此优化方案的能量效率优于基准方案。

3 全域应急通信下高效绿色立体覆盖技术

凭借其卓越的灵活性和机动性，无人机能够实现快速部署和精准轨迹巡航，有效支持复杂环境下的临时通信网络构建，在全域应急通信等6G典型应用场景中具有广泛的应用前景。

3.1 方案设计

针对全域应急通信场景，我们提出了一种基于大载荷固定翼无人机的通信解决方案。该方案通过无人机搭载4G/5G蜂窝通信设备，利用卫星链路将信号回传至地面站，并进一步传输至移动4G/5G核心网，实现通信链路的建立。为提升受灾区域的通信覆盖效率，无人机侧面安装了定向天线，重点为人口密集区域提供临时、高能效的通信服务。该方案能够在灾后快速部署，为灾区用户提供具有阶段性延时的应急通信接入服务，有效满足灾区的紧急通信需求。

通常情况下，5G的载波带宽在Sub6G频谱下最高可以为100 MHz，采用30 kHz的子载波间隔，每12个子载波构成一个标准资源块。除去保护带宽后，100 MHz的载波带宽可最多分为273个资源块。如图5所示，一个正六边形蜂窝小区被均分为4个面积相近的子区域，每个子区域容纳200个用户，因此整个小区共有800个用户。为了降低用户间的同频干扰，假设每个用户独占一个资源块。由于用户数量多且分

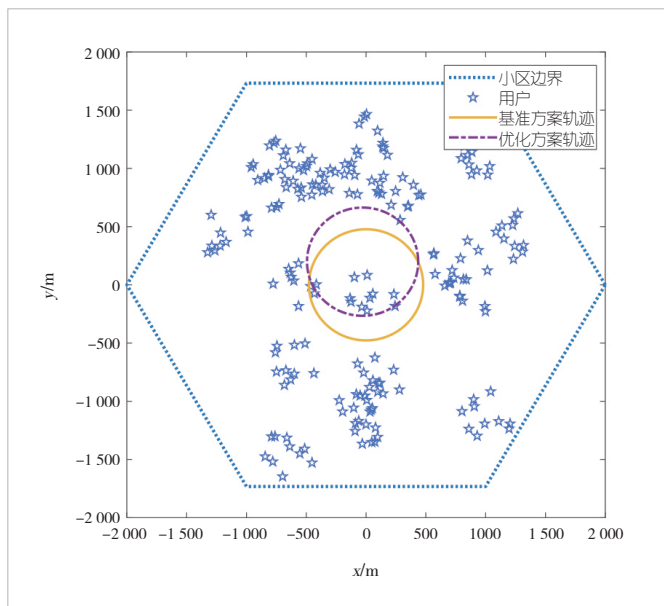


图2 优化方案与基准方案空基轨迹对比

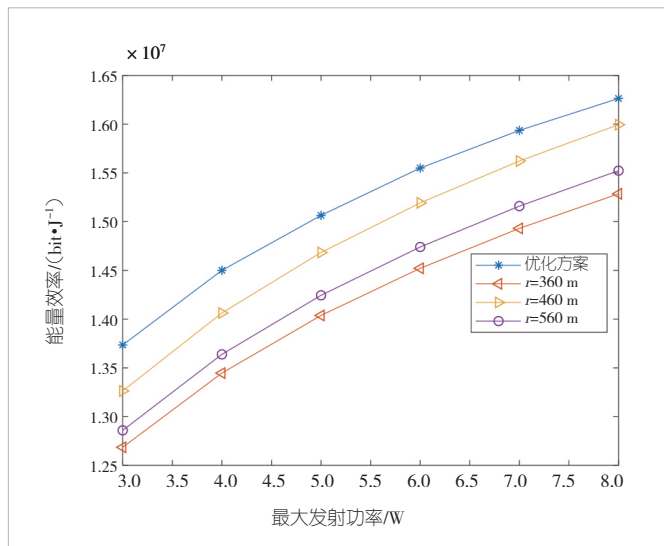


图3 不同发射功率下的多种空基轨迹半径能量效率对比

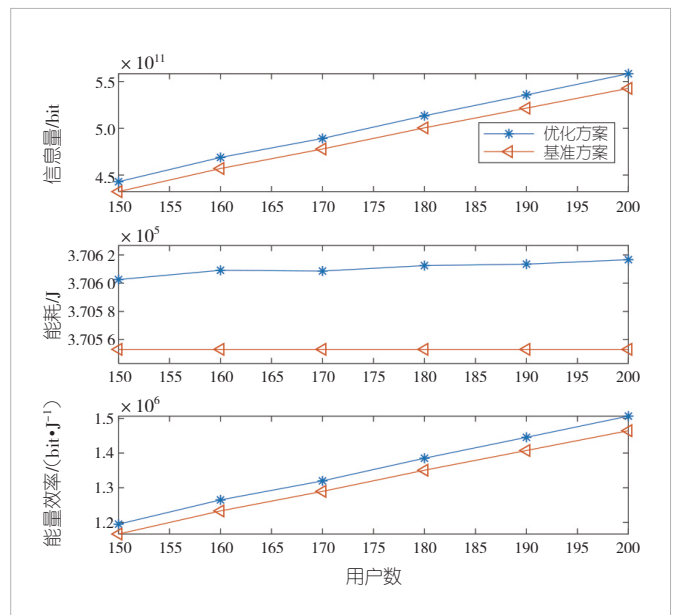


图4 不同用户数下的优化方案和基准方案性能对比

布密集，空基接入点无法实现全域同时覆盖，因此需要采用频谱资源复用策略，即每个子区域轮流占用频谱资源，其他子区域的用户在此期间处于等待连接状态。这种设计通过牺牲接入延迟来提升覆盖密度，特别适用于人口密集的应急通信场景。

基于此模型本文中我们提出了一个联合优化区域调度、空基接入点飞行轨迹和发射功率的设计方法。该方法能够根据模型参数规划最优的飞行轨迹并最大化能量效率，从而实现系统的高效绿色覆盖。

3.2 地面基站能效对比方案

为了验证空基接入点方案能效提升，本文中我们采用地面基站代替空中基站进行建模优化。与空中基站采用的多址方式相同，地面基站仍采用时分多址接入，信道采取瑞利衰落信道进行仿真。

3.3 仿真结果

在该模型中，我们将一个边长为2 000 m的正六边形蜂窝区域按地理位置均匀划分为 $M=4$ 个子区域，每个子区域包含 $K=200$ 个用户，总用户数为800个。由于受灾地区多位于偏远山区，信道差异需考虑海拔高度的影响。用户位置采用三维笛卡尔坐标系来表示，即任意子区域 $m \in M$ 中的任意用户 $k \in K$ 的位置表示为 $\mathbf{w}_{m,k} \in \mathbb{R}^3 \times 1$ 。用户分布采用集群均匀复合式分布：集群性体现在部分受灾用户可能聚集等待救援，而均匀性则表现为每个聚集群落内的用户位置服从均匀随机分布。空基接入点的飞行高度固定为距地面 $H=1\ 000$ m。

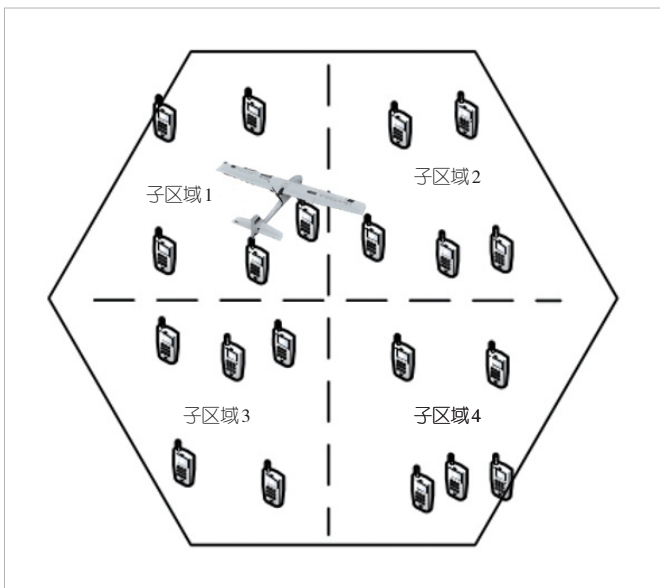


图5 全域应急通信系统模型

载波频率 $f=4.9$ GHz，光速 $c=3 \times 10^8$ m/s，噪声功率谱密度 $\sigma_0^2=10^{-20.4}$ W/Hz，空基接入点信号发射功率为5 W，与空基接入点相关的参数 $c_1=1.84 \times 10^{-3}$ ， $c_2=4\ 500$ ，无人机基站的固定功耗 $P_{BASE}=160$ W，空基接入点的最大飞行速度 $V_{max}=100$ m/s，最小飞行速度 $V_{min}=3$ m/s，最大飞行加速度 $a_{max}=5$ m/s²，重力加速度 $g=9.8$ m/s²。设置基站发射峰值功率 $P=2\ 000$ W，基站固定电路消耗功率 $P_{cir}=270$ W。假设空基接入点使用多天线，设定多天线增益系数为10。空地信道采取LoS信道。

图6从立体和俯视两个角度展示了 $T=200$ s时优化的无人机轨迹，并与传输速率最大方案的无人机轨迹进行了对比。在能效最大方案中，空基接入点的飞行速度保持相对稳定，轨迹近似为一个圆形。对于飞行器而言，直线飞行和圆形绕飞是最节能的飞行方式，因为频繁的加减速会显著增加能量消耗。这也解释了为何在对比方案中，当能量不受限时，空基接入点的坐标会集中在子区域中心。从数学极限来

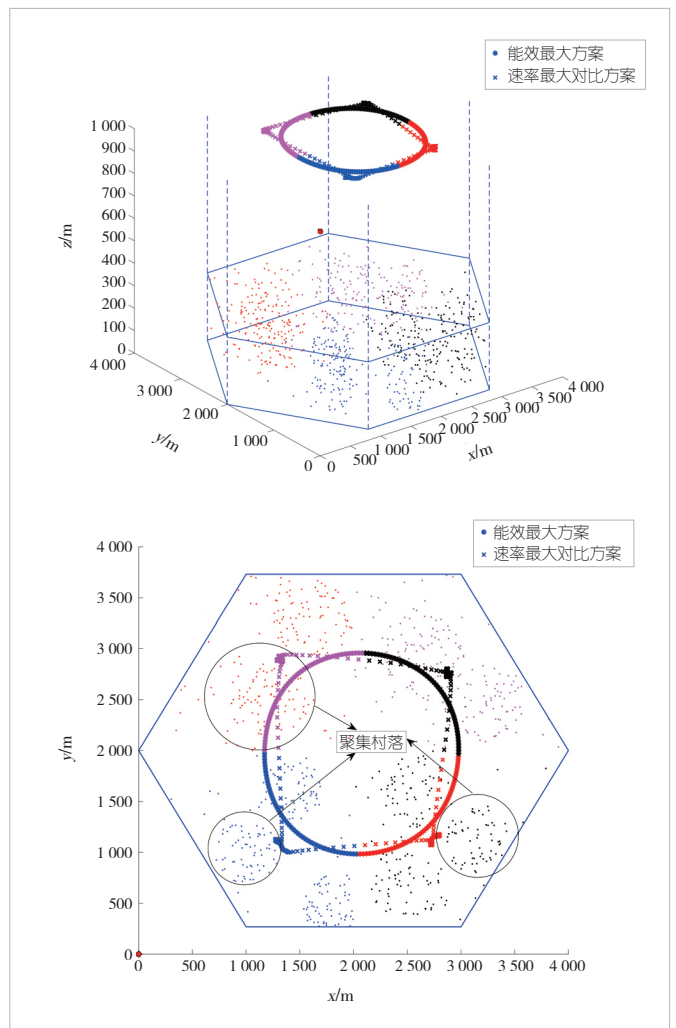


图6 飞行周期为200 s时的能效最优与速率最优的轨迹图

看, 该方案对覆盖性能的提升是显而易见的: 在周长相同的情况下, 圆的面积大于任何多边形。

图7展示了飞行周期为100 s、飞行时刻为10 s的用户收到信号功率辐射图。此时左下角的子区域全体用户接入通信网络, 而其他子区域的用户均处于服务等待阶段。这种周期循环机制的优点在于能够高效利用有限的带宽和资源, 从而服务更多用户; 其缺点是可能导致较长的延迟。然而, 在应急通信等特殊场景下, 以延迟换取更大的连接容量是可接受的。

图8展示了3种方案的总平均传输速率随飞行周期 T 的增加而增长的趋势。这一现象主要归因于空基接入点的机动性: 随着 T 的增大, 空基接入点能够在用户群落附近停留更长时间, 从而提升传输效率。理论分析表明, 当 T 足够大时, 空基接入点在节点间的飞行时间可以忽略不计, 此时平均传输速率将达到饱和状态。

图9可以看出, 本方案兼顾了应急信号覆盖传输和系统能量消耗, 因此其能量效率最大。相对于基站方案来说, 在达到相同性能的先决条件下, 本方案所消耗的能量较小。

4 基于非正交资源分配与空基接入点辅助的大规模机器类通信

超大规模机器类通信作为6G典型应用场景之一, 侧重于人与物之间的信息交换, 着眼于万物互联。为了解决接入规模、成本消耗等问题, 可采用空基接入点搭载基站的方式, 辅助地面基站为小区边缘设备提供服务。这一方案不仅能避免超高密度地面基站的部署, 还可降低成本和提升能量效率, 从而实现高密度广域覆盖。

4.1 基于非正交资源分配与空基接入点辅助的大规模机器类通信模型

为了实现致密覆盖连接且避免部署超高密度地面基站, 可采用空基接入点搭载基站的方式, 服务小区边缘用户。系统模型如图10所示, 将等效的4个地面基站与2个空基接入点覆盖的六边形区域看作一个整体, 相当于4个小区。通过上述方法可以计算得到, 这4个地面基站与2个空基接入点服务的六边形区域覆盖的用户数为2 400个用户($4 \times 400 + 2 \times 400 = 2\ 400$), 每个小区可覆盖600个用户, 其中地面基站服务中心400个用户, 空基接入点服务200个边缘用户。

采用的资源块子载波间隔为15 kB, 为经典值的一半。选取两个50 MHz带宽的载波, 共可容纳 $270 \times 2 = 540$ 个资源

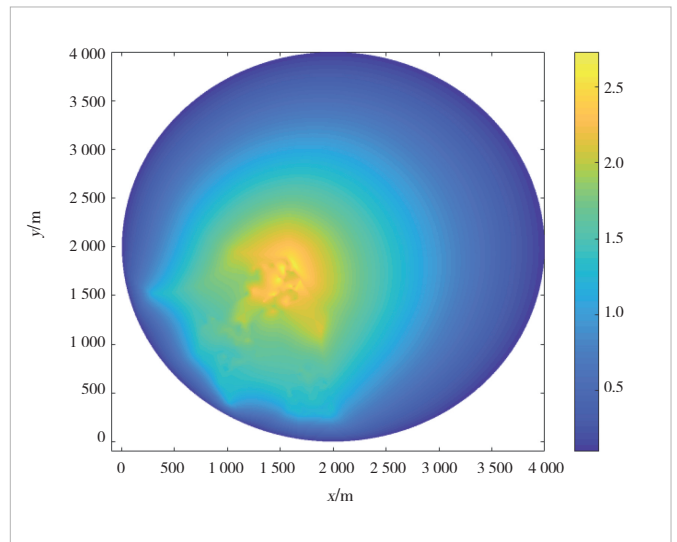


图7 飞行周期为100 s、飞行时刻为10 s的用户收到的信号功率辐射图

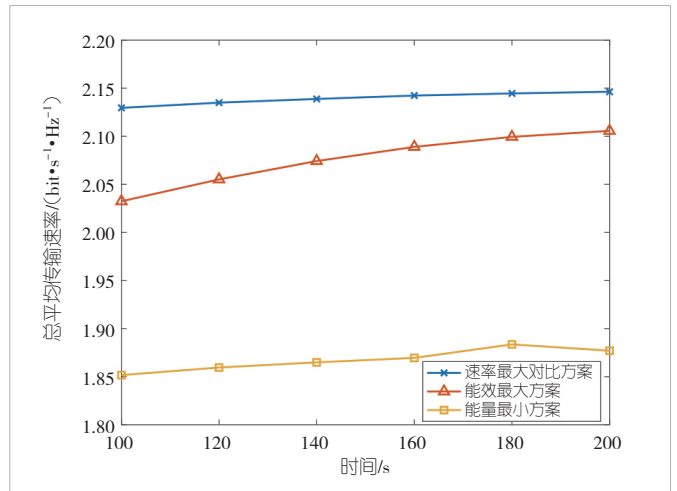


图8 不同方案的总平均传输速率随周期变化的对比

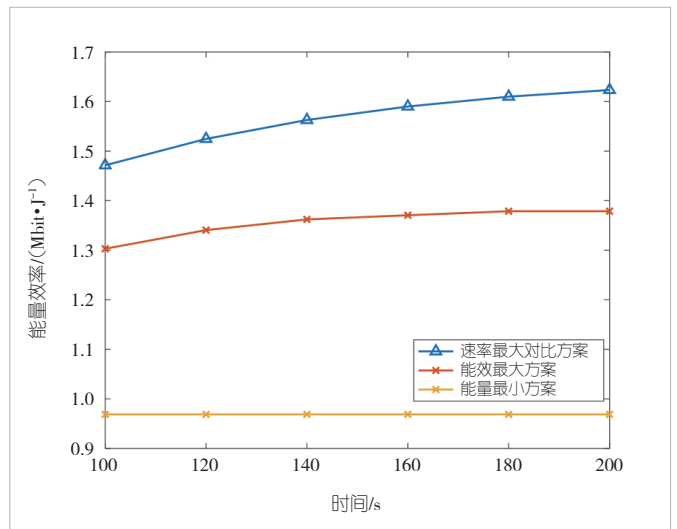


图9 不同方案能量效率周期特性对比

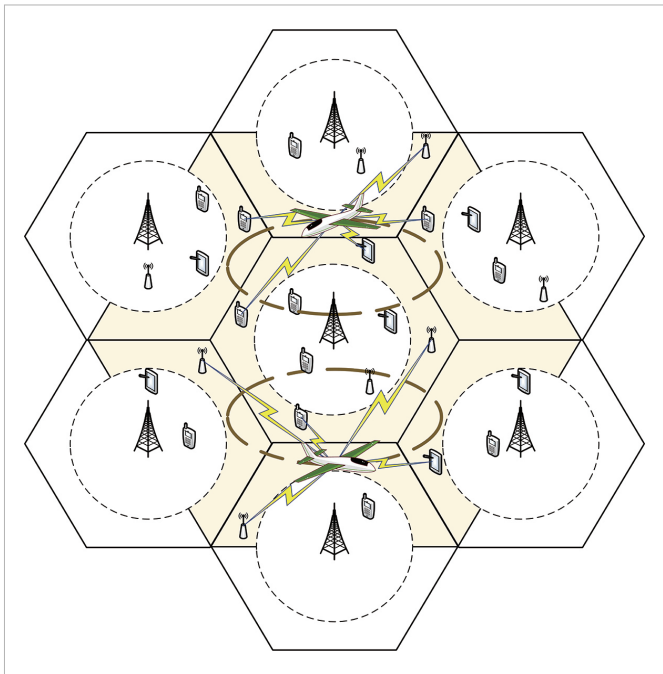


图10 基于非正交资源分配与空基接入点辅助的超大规模机器类模型

块。小区中心用户采用地面基站提供服务，小区边缘用户采用空基接入点搭载基站提供服务。地面基站使用200个资源块，采用NOMA技术，两个用户共用一个资源块，因此一个地面基站在满载时可以服务400个用户。每个人空基接入点同样使用200个资源块，采用NOMA技术，满载时可服务400个用户。在总共540个资源块中，地面基站占用200个，两个空基接入点占用剩余的340个。地面基站用户通过使用不同子载波频率来规避用户间干扰。对于两个空基接入点占用的340个资源块，每个空基接入点独占140个正交资源块，剩余的60个资源块由两个空基接入点共享，从而使每个空基接入点占用200个资源块。为了避免60个共享资源块中的干扰，将同一子载波频率的资源块分配给两个空基接入点服务的、相互距离较远的用户对，并通过场景化波束控制和飞行控制来规避干扰。这样，540个资源块得以合理使用，有效避免了地面基站与空基接入点基站用户之间的干扰。此外，空对地信道建模为LoS信道，地对地信道建模为瑞利信道。

4.2 基于非正交资源分配的空基接入点基站能量效率优化

为满足超大规模机器类通信对低成本、低功耗的需求，本研究通过联合优化空基接入点的飞行轨迹与功率分配策略，以及地面基站的功率配置，以实现系统能量效率的最大化。

假设空基接入点在运行过程中服务的用户保持不变。设

$U1$ 和 $U2$ 分别为该接入点服务的第 i 个资源块中的第1个和第2个用户。由于空基接入点的位置随时间变化，在其飞行一周的过程中，可能会出现同一资源块中的两个用户与接入点的距离发生远近切换的情况。为了简化系统模型，我们固定了解码顺序：无论两个用户与接入点的距离如何变化，始终优先解码 $U2$ 的信息，再解码 $U1$ 的信息。具体而言，系统会为 $U2$ 分配更大的发射功率，并将 $U1$ 的信号视为干扰来解码 $U2$ 的信号。通过优化空基接入点飞行轨迹与功率分配，最大化空基接入点能量效率并满足用户通信速率约束、功率分配约束和无人机轨迹约束的要求。

为确保小区中心区域用户获得与空基接入点用户相当的服务质量，同时降低地面基站的发射功率，需对地面基站的吞吐量进行限制，并最小化其发射功率。

4.3 只采用地面基站的等效对比方案

在服务用户数量和服务范围相同的情况下，若仅采用地面基站服务用户，可将模型简化为6个满载基站（每个基站通过NOMA技术服务400个用户），总计服务2400个用户，且服务范围与4个等效小区的整体面积相同。因此，对比方案中每个小区的覆盖半径应为：

$$r' = \sqrt{\frac{2}{3}} R \quad (1)$$

4.4 仿真结果

图11展示了无人机基站的能效在不同发射功率下随迭代次数的收敛情况。随着迭代次数的不断增加，无人机基站的能量效率逐步提升，并在4次迭代后趋于稳定。此外，当发射功率 P_{\max} 从5W增加到20W时，在不考虑多天线增益的情况下，能效可以从823 kbit/J提升至979 kbit/J，增幅可达19%。

图12展示了轨迹优化与配对方案在能效方面的对比结果。研究表明，当飞行周期为 T 时，通过计算圆形轨迹的半径可实现无人机推进功率的最小化。随着发射功率的增加，能量效率呈现上升趋势，这主要归因于无人机基站的能量消耗主要来自推进系统而非信号处理。与传统的圆形轨迹相比，本文提出的轨迹优化方案在能效和信息传输量方面均有显著提升。同时，相较于随机配对模式，本文提出的配对策略能够有效提高系统的能量利用效率。

图13展示了服务区内用户分布与空基接入点轨迹。如图所示，无人机采用圆形飞行轨迹，主要服务于小区边缘用户。服务区域呈六边形结构，具备按需扩展的灵活性。

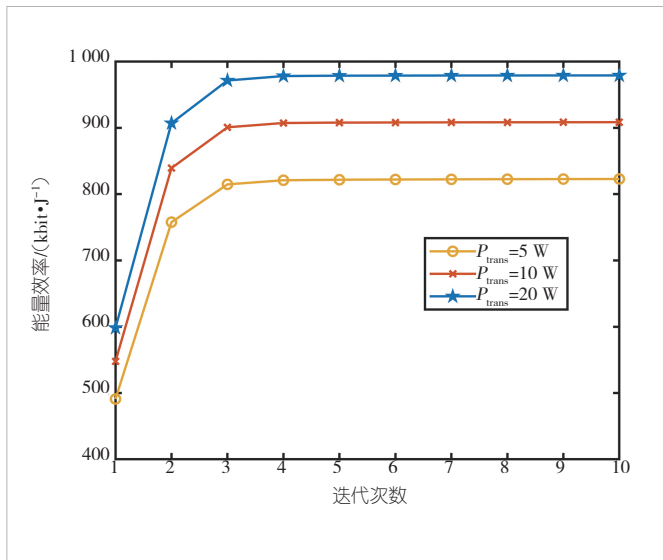


图11 空基接入点辅助方案算法的收敛性

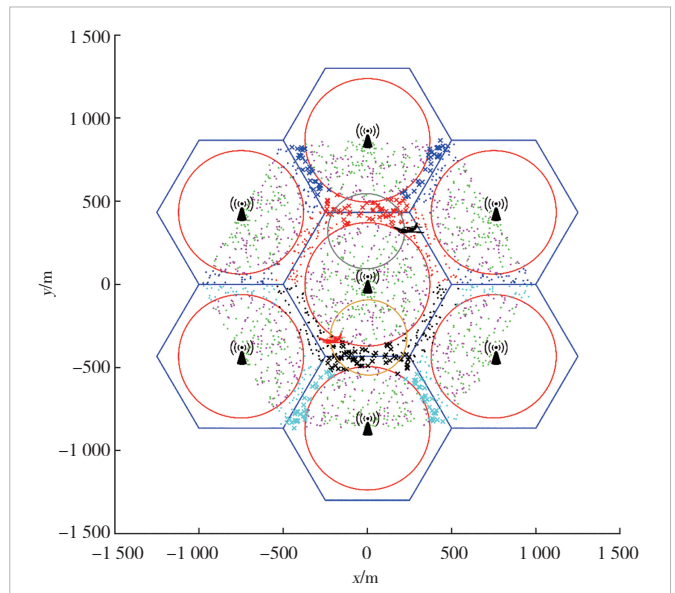


图13 六边形小区服务区用户分布与空基接入点轨迹

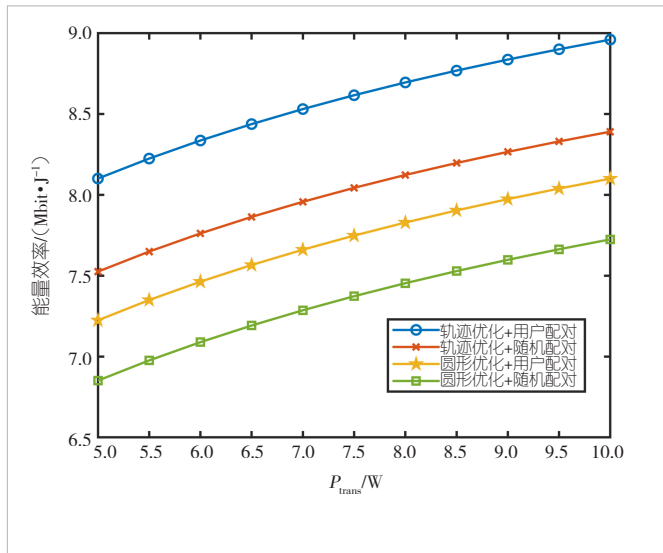


图12 轨迹优化和配对方案的能效对比

5 无人机高能效立体覆盖的未来研究方向

上述研究验证了无人机在通信立体覆盖和能效提升方面的有效性。为了促进无人机在更多6G通信场景中的应用，本章中我们讨论一些亟待解决的问题和未来研究方向。

5.1 人工智能辅助的无人机高能效立体覆盖

本文所提出的无人机高能效立体覆盖技术基于凸/非凸优化算法，但在实际应用中面临计算复杂度高、环境适应性不足等问题。近年来，随着人工智能技术的快速发展，深度强化学习在无人机轨迹优化领域展现出显著优势，其强大的动态决策能力和优异的泛化性能为技术突破提供了新思路。通过将人工智能深度融入空地协同通信系统，有望构建高

效、灵活且智能化的立体覆盖网络，从而为经济社会发展提供强有力的技术支撑和创新动能。

5.2 通感一体化场景下无人机高能效立体覆盖

通感一体化是6G通信中的一项关键技术，具备高谱效、低成本、低功耗和低干扰等优势，在车联网、智能家居等新兴应用场景中展现出广阔前景。随着6G通信从单一功能向多功能系统演进，未来将实现无处不在的泛在通信与感知能力。然而，通感一体化场景对系统模型和资源优化提出了更高要求。无人机凭借其部署灵活、易于建立视距链路等特点，能够有效支持立体通信覆盖与环境感知，为通感一体化的实现提供了重要技术支撑。

5.3 无人机通信与卫星通信技术相结合

卫星链路主要在大气层以上的宇宙空间中运行，传输损耗小且电波传播稳定。通常采用微波波段，具有宽广的频率范围，能够提供中高速的数据传输通道。这使得卫星通信能够在各种复杂环境下保持稳定，为无人机提供可靠的通信保障，确保其在恶劣环境中的安全飞行和高效作业。与固定通信设备相比，无人机部署速度更快，能够在紧急情况下迅速抵达指定区域，并通过卫星通信技术快速建立通信链路，为应急通信、灾害监测等任务提供及时支持。

5.4 无人机通信与智能反射面相结合

智能反射面（IRS）利用其大量无源反射元件，能够智能调控入射信号的相位、频率、振幅和偏振，从而实现精确的波束赋形。在无人机与目标用户无法直接通信的场景下，

IRS可作为高效的中继或反射装置,协助建立可靠的通信链路。通过IRS的反射特性,无人机通信网络能够更高效地利用频谱资源,并实现动态网络优化。此外,IRS还能通过调节反射信号的相位和幅度,实现信号的定向传输,有效降低信号泄露和窃听风险,显著提升通信安全性。

6 结束语

无人机通信作为一种新兴技术,通过将无人机作为空中信息处理和分发中心,在覆盖补盲、网络扩容、速率提升及立体扩展等领域展现出广泛的应用前景。本文首先概述了无人机通信技术及其在多维立体覆盖方面的应用,然后提出了3种利用多维立体覆盖技术提升系统能效的创新方案,并通过实验验证了这些方案在性能上的显著优势,最后讨论了无人机高能效立体覆盖的开放问题和未来的研究方向。

参考文献

- [1] 张平, 张建华. 6G 愿景及技术挑战专题导读 [J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(2): 1. DOI: 10.12142/ZTETJ.202102001
- [2] 杨峰义, 刘洋, 杨皓. 6G网络的一些思考 [J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(2): 2-5. DOI: 10.12142/ZTETJ.202102002
- [3] ZENG Y, ZHANG R, LIM T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges [J]. IEEE communications magazine, 2016, 54(5): 36-42. DOI: 10.1109/MCOM.2016.7470933
- [4] 陈新颖, 盛敏, 李博, 等. 面向6G的无人机通信综述 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44(3): 781-789. DOI: 10.11999/JEIT210789
- [5] LYU J B, ZENG Y, ZHANG R. UAV-aided offloading for cellular hotspot [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2018, 17(6): 3988-4001. DOI: 10.1109/TWC.2018.2818734
- [6] HU X Y, WONG K K, YANG K, et al. UAV-assisted relaying and edge computing: scheduling and trajectory optimization [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2019, 18(10): 4738-4752. DOI: 10.1109/TWC.2019.2928539
- [7] SAMIR M, SHARAFEDDINE S, ASSI C M, et al. UAV trajectory planning for data collection from time-constrained IoT devices [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2020, 19(1): 34-46. DOI: 10.1109/TWC.2019.2940447
- [8] ZENG Y, ZHANG R. Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2017, 16(6): 3747-3760. DOI: 10.1109/TWC.2017.2688328
- [9] EOM S, LEE H, PARK J, et al. UAV-aided wireless communication designs with propulsion energy limitations [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2019, 69(1): 651-662. DOI: 10.1109/TVT.2019.2952883
- [10] ISLAM R S M, AVAZOV N, DOBRE O A, et al. Power-domain non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: potentials and challenges [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2017, 19(2): 721-742. DOI: 10.1109/COMST.2016.2621116

- [11] FANG F, ZHANG H J, CHENG J L, et al. Energy-efficient resource allocation for downlink non-orthogonal multiple access network [J]. IEEE transactions on communications, 2016, 64(9): 3722-3732. DOI: 10.1109/TCOMM.2016.2594759
- [12] LIU Y W, QIN Z J, CAI Y L, et al. UAV communications based on non-orthogonal multiple access [J]. IEEE wireless communications, 2019, 26(1): 52-57. DOI: 10.1109/MWC.2018.1800196
- [13] NASIR A A, TUAN H D, DUONG T Q, et al. UAV-enabled communication using NOMA [J]. IEEE transactions on communications, 2019(7): 5126-5128. DOI: 10.1109/TCOMM.2019.2906622
- [14] MERWADAY A, TUNCER A, KUMBHAR A, et al. Improved throughput coverage in natural disasters: unmanned aerial base stations for public-safety communications [J]. IEEE vehicular technology magazine, 2016, 11(4): 53-60. DOI: 10.1109/MVT.2016.2589970
- [15] ZHAO N, LU W D, SHENG M, et al. UAV-assisted emergency networks in disasters [J]. IEEE wireless communications, 2019, 26(1): 45-51. DOI: 10.1109/MWC.2018.1800160
- [16] HUANG Z R, CHEN C C, PAN M X. Multiobjective UAV path planning for emergency information collection and transmission [J]. IEEE Internet of Things journal, 2020, 7(8): 6993-7009. DOI: 10.1109/JIOT.2020.2979521

作者简介



张吉发, 大连理工大学在读博士研究生; 主要研究方向为智能无线通信、通感一体化。



黄香港, 大连理工大学在读硕士研究生; 主要研究方向为智能反射面、非正交多址接入、无人机通信。



赵楠, 大连理工大学教授; 研究方向为通感一体化、无人机通信、绿色通信。