

面向低空立体网络的组网架构

Exploration and Analysis of Networking Architecture for
Low-Altitude Stereoscopic Networks

探索与分析

南作用¹,钟志刚¹,由志远¹,李海军²,孙语瞳¹,王 亚¹,陈鑫淼¹(1. 中讯邮电咨询设计院有限公司,北京 100048;2. 北京电信规划设计院有限公司,北京 100047)

Nan Zuoyong¹,Zhong Zhigang¹,You Zhiyuan¹,Li Haijun²,Sun Yutong¹,Wang Ya¹,Chen Xinmiao¹(1. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd., Beijing 100048, China;2. Beijing Telecom Planning & Designing Institute Co., Ltd., Beijing 100047, China)

摘要:

面向低空经济与低空通信网络,结合低空场景测试问题,深入分析现有网络组网框架与模式,基于低空立体多层高跨度无线传播特性,面向低空工业级网络规划模式,提出一种面向低空立体三维空间、解决覆盖与干扰矛盾、提升网络用户价值的组网架构模式与体系,并通过网络仿真组网推演的方法,为低空和未来空天地网络组网规划提供参考。

关键词:

低空;5G;组网结构;仿真

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2026.05.001

文章编号:1007-3043(2026)05-0001-07

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

Focusing on low-altitude economy and low-altitude communication networks, combined with low-altitude scenario testing problems, it deeply analyzes existing network frameworks and modes. Based on the characteristics of low-altitude three-dimensional multi-layer and large-span wireless propagation, it proposes a networking architecture model and system for low-altitude industrial level network planning mode, which is oriented towards low-altitude three-dimensional space, solves the contradiction between coverage and interference, and enhances network user value. Through network simulation and network deduction methods, it provides references for low-altitude and future aerospace network planning.

Keywords:

Low-altitude networks; 5G; Networking architecture; Simulation

引用格式:南作用,钟志刚,由志远,等. 面向低空立体网络的组网架构探索与分析[J]. 邮电设计技术,2026(5):1-7.

1 概述

2024年12月,国家发展改革委成立“低空经济发展司”,这标志着低空经济正式上升为国家战略。根据文献[1],2023年中国低空经济规模超5 000亿元,预计到2026年底将突破1万亿元,2030年有望达到2万亿元,2035年可能达3.5万亿元。低空经济的发展使低空飞行器数量快速增加,用户业务要求更高,应

用场景更加丰富多样。进而对低空网络覆盖和性能提出更高要求,从而促使运营商加大在低空通信网络、感知网络、导航网络等方面的基础网络建设投入,拓展网络覆盖范围,提升网络质量和容量。并催生对通感一体、高精度定位、5G MassiveMIMO、网络安全技术等的需求,推动网络技术的创新和升级。低空经济的特殊应用场景和网络需求,为网络技术研发提供方向和动力。为满足飞行器在低空移动复杂环境下的网络需求,即在确保网络覆盖的基础上,优化干扰恶化的问题,为确保低空环境通信业务质量,推动网络

收稿日期:2026-04-02

架构、频谱资源等技术进行探索和实践。

低空通信网络是低空经济支撑网络,低空智联网络是在低空空域,依托地面移动通信网络、低轨卫星网络、多种空基平台等基础设施所构建的适合低空业务运营的实体网络(见图1)。本文重点讨论基于地面移动通信网络构建低空网络。常规地面移动网络通常重点关注地面室外覆盖,而面向低空服务的网络将覆盖50~600 m,乃至更高的区域。在该高度下,网络覆盖和干扰呈现出与地面网络相异的特性,且网络方案在终端高度层面满足全空间3D立体覆盖,这给低空网络规划带来极大的挑战。

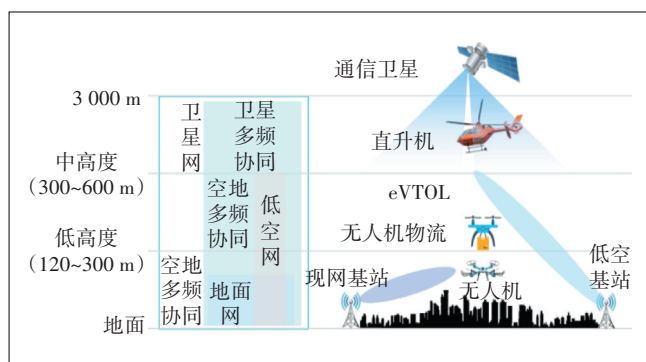


图1 全空间低空网络场景及网络拓扑示意

本文面向低空经济与低空通信网络,深入分析现有移动网络组网框架与模式,基于立体多层高跨度无线传播特性,面向工业级网络规划模式,提出一种面向低空立体三维空间、解决覆盖与干扰矛盾、提升网络用户价值的组网架构模式与体系,以更好地应对全

空间立体覆盖的工业网络新范式架构。

2 低空网络覆盖存在的问题

面向低空覆盖的移动通信网络,其覆盖高度范围目前多集中在50~600 m高度。该空间内,如采用现有5G网络对低空场景进行覆盖,以现网某地测试为例,沿着航线或“弓”字形进行测试,结果如图2所示。

从图2可以看出:SS RSRP整体覆盖电平强度水平降低,SS RSRP ≥ -80 dBm区间几乎没有样本点分布,主要样本点分布在 $[-80$ dBm, -100 dBm], RSRP ≥ -105 dBm的比例大于97.87%,覆盖良好。随着测试无人机高度从100 m提升至300 m,SS RSRP在 $[-80$ dBm, -100 dBm]范围内的信号呈现降低趋势。SS SINR ≥ -3 dB的比例均未达到90%,随测试无人机高度从100 m提升至300 m,SS SINR呈现恶化趋势,200 m、300 m偏差幅度降低,覆盖率在55%以内,数据业务速率将受到明显影响。

对于400 m以上低空场景,SS SINR几乎全部小于0 dB,很多测点小于-10 dB。这表明低空场景随着覆盖高度的抬升,其SS SINR恶化更为严重。

通过以上分析可以看出,低空网络覆盖场景具有如下特点。

a) 电磁传播主要以视距传输为主。低空通常指距离地面垂直高度50~600 m的空域范围,低空终端与地面基站间遮挡少,信号主要通过视距传输到达低空飞行器,电磁传播环境较地面覆盖基站优越^[2]。

b) 传播覆盖及组网特征差异。图3所示为典型

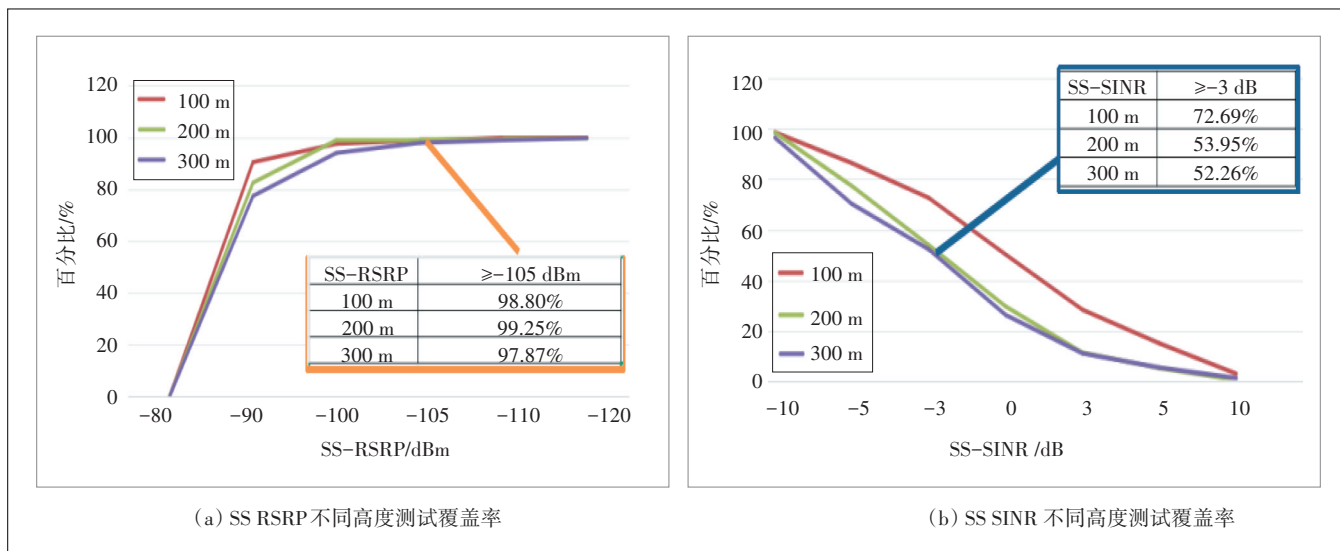


图2 某区域现网覆盖100~300 m低空场景测试数据

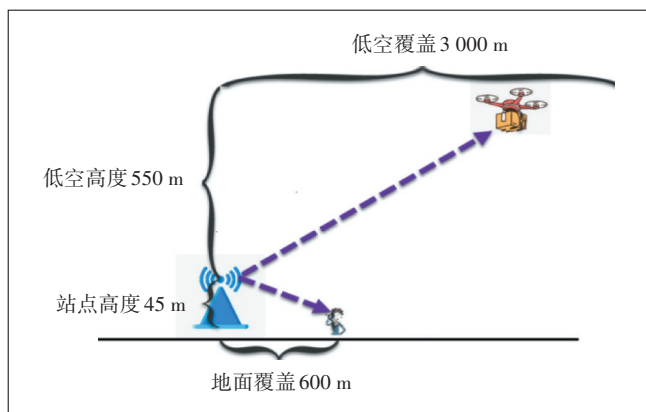


图3 低空网络覆盖场景示意

的地面站点覆盖地面和低空的网络示意,其中站点高度为45 m,一般覆盖地面用户。而低空在垂直面延伸至50~600 m空间,覆盖半径多在2~3 km。在该模式下,低空覆盖网络在垂直面距离上几乎已经达到地面水平面的覆盖半径。同时,与地面移动网络相比,不存在建筑物的阻挡及室内穿透损耗,低空场景覆盖网络的小区数将是地面网络的5倍以上。

c) 低空呈现立体覆盖特征。常规的地面网络通常重点覆盖距离地面1.5 m高度的二维平面,确切而言,低空网络的覆盖面可扩展到50~600 m空间,该空间内任何高度、位置均有可能进行低空业务。网络覆盖面从原来的二维平面拓展至三维立体空间,且垂直面覆盖跨度大^[3],这给低空网络组网带来极大的挑战^[4]。

d) 越区覆盖现象较普遍。基站对地覆盖的信号经地面及建筑物反射,可在几千米外的低空中形成较强覆盖。不同类型天线旁瓣增益有差异,在不同站高、倾角配置下,也易覆盖到较远距离的空域,导致无人机飞行时可能受几层基站以外站点的越区覆盖^[5-6]。

e) 信道污染严重。在常规的地面网络覆盖中,导频污染已经是非常严重的问题,而针对低空网络覆盖场景,将出现大量的弱覆盖小区,在低空场景,信道污染将更为严重^[7]。

f) 低空业务模式。低空业务主要沿着低空航道进行网络部署,如存在不同高度与范围的低空业务需求,也多以航道“线”覆盖的方式展开,这也是与地面1.5 m二维全空间覆盖的差异。

基于以上诸因素,低空网络规划需从结构上进一步剖析现在的组网结构与模式,必须从网络组网结构上予以优化,才能真正构建满足低空网络的组网及业

务需求。

3 低空网络覆盖方案

针对低空网络组网,目前主要有2种主流结构。

a) “蜂窝”组网。与地面蜂窝网络结构类似,针对低空网络,核算组网覆盖半径,以“蜂窝”为主体结构,拓展网络覆盖。

b) “鱼鳞”组网。严格意义来讲,“鱼鳞”组网是“蜂窝”组网的另一种形态,即在“蜂窝”组网主体结构下,每个站点只配置一个扇区,沿着同一方向覆盖,形成类似“鱼鳞”组网拓展覆盖^[8]。

从以上结构演变可以看出,“鱼鳞”结构已经在向降低网络无效覆盖小区的方向推进,但整体结构仍以“蜂窝”组网为主,且在保证同等覆盖情况下,将增加网络站点数量,也存在越区切换等问题,效率也将降低。针对低空网络的特点,需要在现有结构的基础上,构建面向立体、在高度上大跨度、航线级低空场景的更加有效的组网结构^[9]。基于此,本文提出面向低空全空间立体网络的一种组网模式——“汉堡”架构(见图4),该模式主要具有以下技术特征。

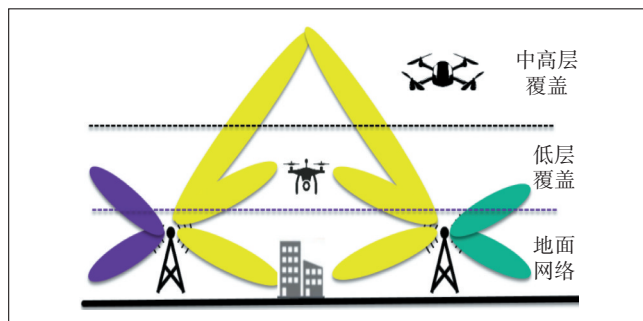


图4 低空“汉堡”组网结构示意图

a) 背打。针对航空主要航线的覆盖特点,考虑站点以两扇区为主,覆盖主要航线场景,如覆盖其他航线或周边高层区域,则以三扇区为补充,即在站点上实现小区“背打”,以尽可能控制切换边界,解决越区切换等问题。

b) 并区。根据容量要求,初期采用同一覆盖区域内小区合并(含立体多层),后续根据容量增长,逐渐分裂,并尽可能提升网络质量。从而有效减少覆盖小区数量,提升整体信号载干比。

c) 分层。针对立体覆盖的50~600 m高度,利用天线等关键设备,在“单层背打并区”的基础上构筑多层立体覆盖网络(如全空间),不同的分层采用不同的

组网结构和策略,如:地面移动通信网络采用蜂窝结构,100 m高度的覆盖采用该结构,100~500 m高度作为低层网络,500 m以上作为中高层网络。

在图4中,同一颜色波束为同一小区,在站点实现“并区”和背打。其中在方格区域内,均使用同一小区的信号覆盖,在站点上进行小区背打,以尽可能确保切换区整齐,形似多层十字切开的立体“汉堡”。

基于“汉堡”网络架构,假定覆盖300 m高度航线,可按照如下的模型对覆盖进行预测:

$$L_f = 32.44 + 20 \times \lg d_0 + 20 \times \lg f \quad (1)$$

其中, L_f 为自由空间损耗(假定300 m低空以视距

方式传播), d_0 为立体传播距离, f 为载波频率,常数32.44是根据低空传播特征及阻挡进行适当的修正。如计算有效覆盖半径,需考虑覆盖高度 h_0 ,则:

$$d_s = \sqrt{d_0^2 - h_0^2} \quad (2)$$

根据式(1)和式(2)计算3.5 GHz频段典型区域单扇区的覆盖半径 d_s 为2.8 km,如按照“鱼鳞”组网,其站距可按照式(3)计算:

$$D_y = d_s \times k_y \quad (3)$$

其中, D_y 为站距, k_y 为站距与覆盖半径有效系数。

“蜂窝”和“鱼鳞”结构示意图如图5所示^[10]。

从图5可知,如达到与“蜂窝”同等覆盖效果,汉堡

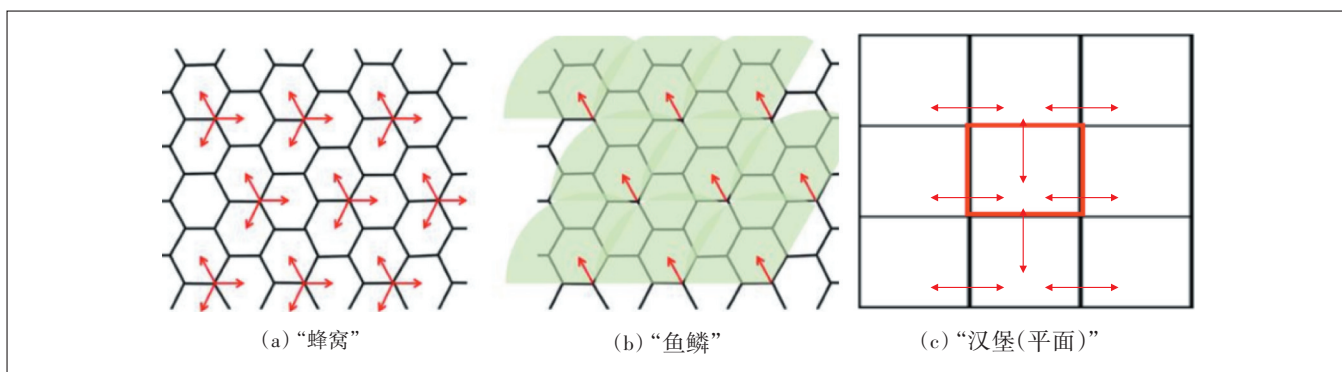


图5 低空“蜂窝”“鱼鳞”“汉堡(平面)”组网结构示意图

与鱼鳞 k 系数比为 $k_f:k_y=1:1.5$ 。如针对同一区域全空间立体覆盖,其规模站数之比与站距或覆盖半径有如下关系:

$$N_{\text{site}} = S_t / (\pi \times (d_s p)^2) \quad (4)$$

其中, N_{site} 为特定区域立体覆盖的站点数量, p 为站点半径与面积计算的开销系数。如全空间立体覆盖,根据式(4)可知,汉堡与鱼鳞站点规模比为1:2.25。

针对某航线而言,其站点规模可采用式(5)计算:

$$N_{\text{site}} = l_i / D_y \quad (5)$$

其中, l_i 为航线总的覆盖长度,汉堡与鱼鳞站点规模比为1:1.5。

通过网络结构与组网形态可知,针对低空以航线为主的应用场景,“汉堡”结构中两扇区背打效率最佳,而如有其他空间的覆盖或容量需求,则可扩展为三扇区覆盖,确保了整体结构的灵活与拓展升级能力。在背打中,采用小区合并的方式可以在确保覆盖的同时降低低空场景弱小区覆盖的数量,从结构上确保低空网络在立体环境下覆盖、干扰与业务容量和质量之间的平衡。

4 “汉堡”结构组网仿真效果

本文网络推演以理想地面网络部署为基础,以当前低空网络发展较快的南方城市为例,选择其城区、郊区环境2种典型低空网络通信场景^[9],其配置重点参数如表1所示。

基于表1中的参数^[11-13],构建不同低空网络结构下的组网场景,对“蜂窝”“鱼鳞”“汉堡”网络结构下SS RSRP、SS SINR以及同步信道污染等关键组网指标^[14]进行仿真,评估其在低空立体覆盖场景下的网络性能。

4.1 SS RSRP

衡量5G网络覆盖水平通常采用SS RSRP指标。终端测量SS RSRP指标,并根据该进行小区选择、重选、功率控制和波束管理。SS RSRP是5G网络规划的核心指标。图6所示为3种组网结构下该指标的仿真预测情况^[11]。

从图6可以看出,“蜂窝”组网结构因部署3个小区,整体SS RSRP覆盖较强,其次为“汉堡”结构。覆盖

表1 “汉堡”结构组网仿真网络基本信息

序号	参数名称	参数值	备注
1	低空无线场景	城区/郊区	
2	技术体制	5G/5G-A	
3	频段	3.5 GHz	
4	组网结构	低空区域立体覆盖	兼顾低空航线覆盖
5	重点考察高度	300 m	仿真建模按照单层评估效果
6	站点规模	10站	
7	天线配置	典型的低空3.5 GHz 64T64R(4+3)天线	
8	SS RSRP发射功率	17.89 dBm	
9	电磁传播模型	校正后的三维射线跟踪模型	使用低空测试数据训练校正
10	PCI	根据不同的网络结构规划配置	

明显较弱的为“鱼鳞”结构,在RSRP $\geq$ -95 dBm时,“汉堡”比“鱼鳞”的覆盖率提升达6%以上。

4.2 SS SINR

SS SINR代表的是接收信号强度与噪声及干扰的比值,它是反映无线通信质量的一个重要指标。其数值越高,则代表该用户接收到的有用信号与干扰和噪声的比值越大。其直接影响5G网络用户数据业务的

速率等级。简而言之,SINR是5G、4G等以数据业务为主要承载网络的核心指标,其直接决定网络数据业务的组网水平和服务质量。图7所示为3种组网结构下该指标的仿真预测情况。

从图7可以看出,分层“汉堡”组网的高SINR区域(SINR $\geq$ 3 dB)性能提升显著,SINR $\geq$ 9 dB的覆盖率仍接近100%，“汉堡”组网从结构与模式上确保网络载干比最优,远超“蜂窝”结构,且在针对低空航线覆盖上具有明显的优势。

4.3 同步信道污染

该指标源于3G导频信道污染,5G则重点采用同步信道来衡量,即在某位置接收到的最强信号为有用信号,其余信号将被作为干扰。因此降低干扰小区的数量和强度,则一定程度上将增强SINR^[15],有利于提升5G网络数据业务的速率和网络的质量。图8所示为3种组网结构下同步信道污染情况的仿真结果。

从图8可以看出,“汉堡”结构能够提升主小区接收电平,降低干扰小区数量与干扰电平,同时具有清晰的组网切换边界,有利于提升低空组网下切换漫游性能。以3小区为例,汉堡结构干扰小区数量降低30%以上。“汉堡”结构从组网结构上尽可能降低网络

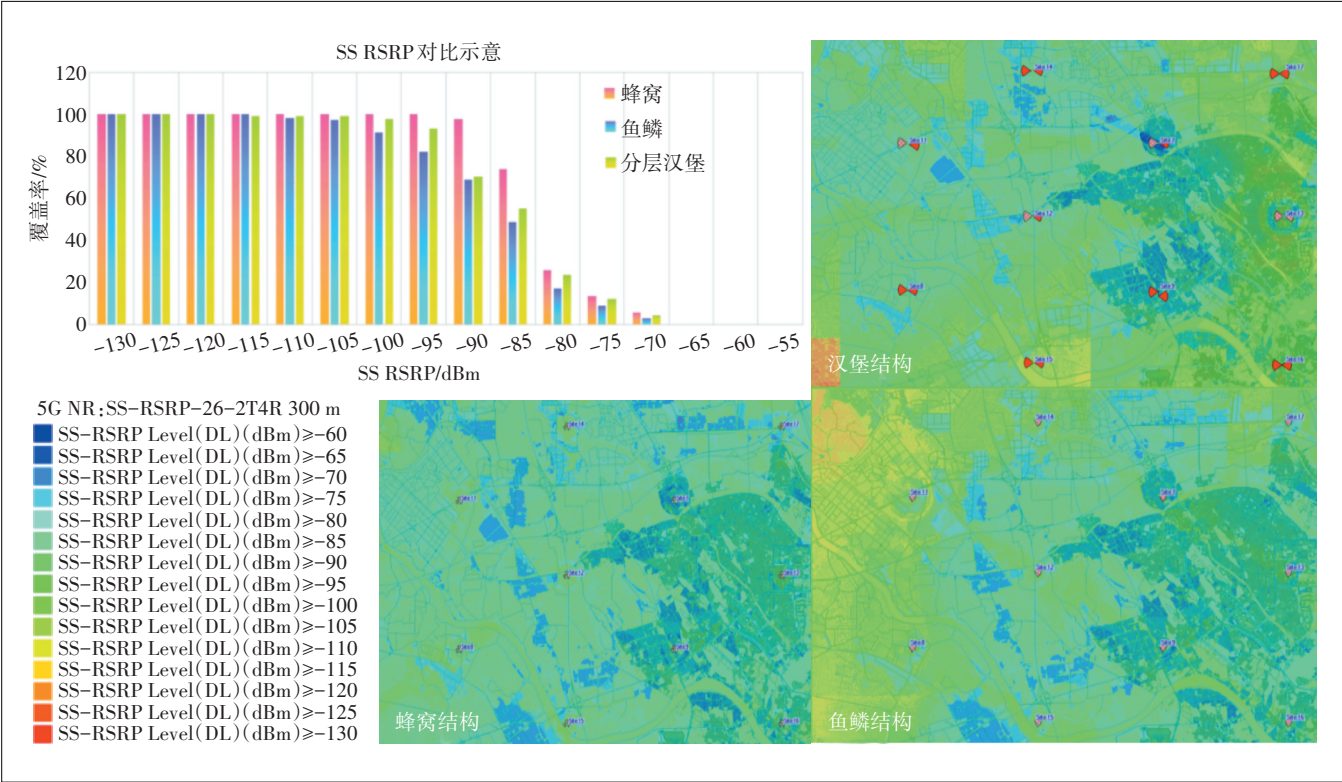


图6 3种组网结构下SS RSRP的仿真结果

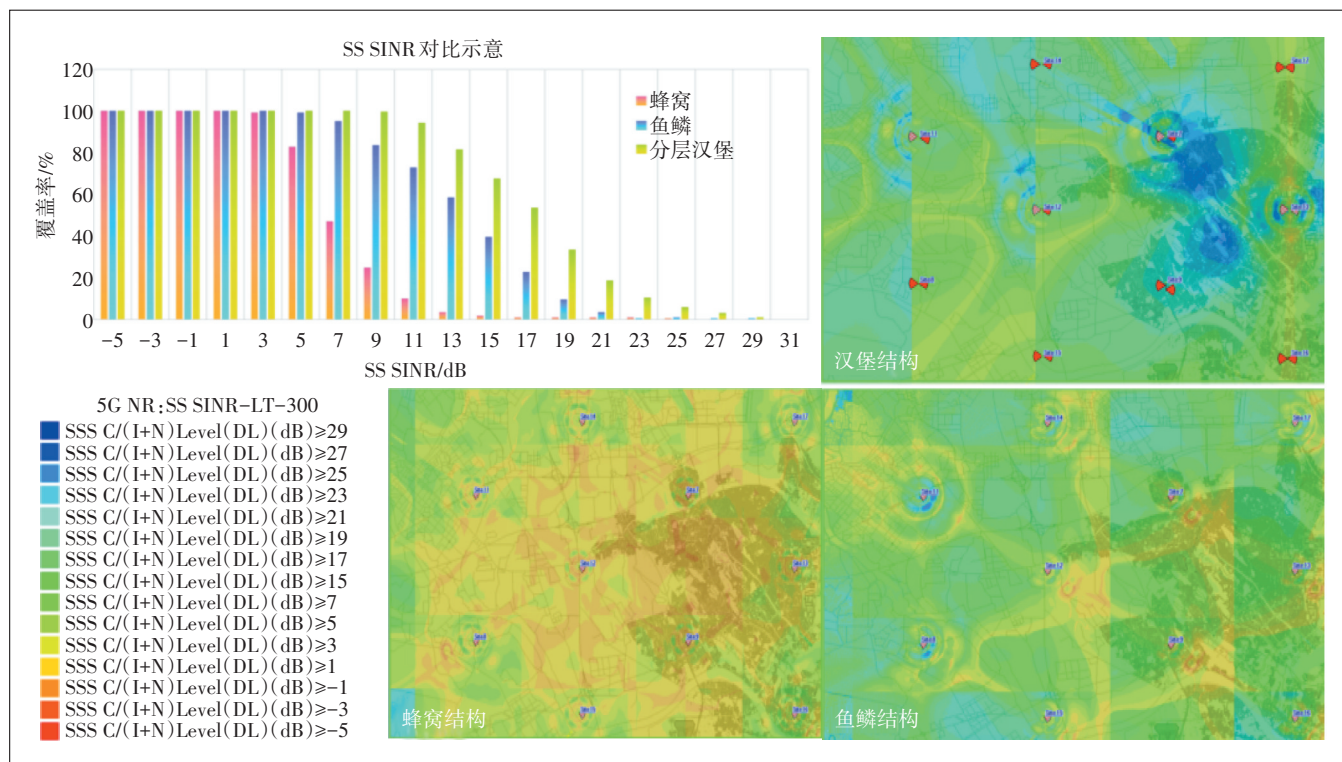


图7 3种组网结构下 SS SINR 的仿真结果

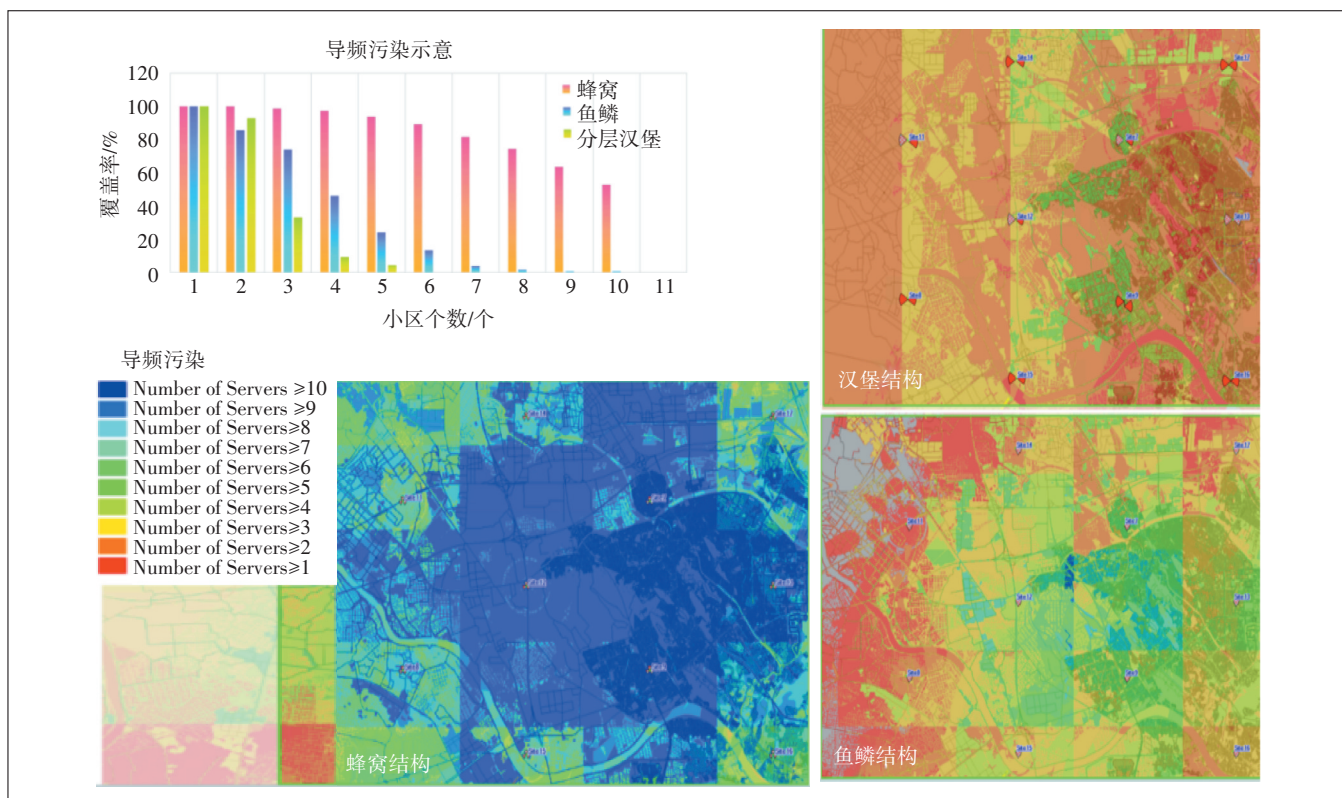


图8 3种组网结构下同步信道污染情况的仿真结果

小区数量, 从而提升网络服务质量。

表2给出3种组网架构的分析对比。

表2 不同组网模式分析对比

对比项目	蜂窝	鱼鳞	汉堡
机理	针对地面移动通信网络给出一种平面网络拓展部署结构	面向低空网络,基于蜂窝移动通信网络,提供一种平面网络部署的“异形”结构	面向低空网络,基于低空立体网络面临的新问题,提出一种面向立体组网的全新网络结构
站点规模比(在覆盖质量相同情况下对比)	1	1.5~2.25	1
扇区规模比(在覆盖质量相同情况下对比)	3	1	2~3(航线以2扇区为主,低空区域覆盖3扇区)
重点应用场景	移动通信地面网络	低空航线级网络部署	针对低空三维空间下,区域及航线网络规划
网络覆盖/容量性能	针对低空,干扰增强,航线的针对性不足	针对低空,重点考虑航线级覆盖,降低干扰,切换边界更复杂,容量降低	针对低空,采用针对性结构,降低干扰,优化航线网络性能
实施复杂度	低	低	较复杂,实施中存在扇区拉远、参数设置等问题

“汉堡”结构是面向未来多维立体空间网络覆盖架构的探索,其在覆盖、干扰控制等方面具有较好的性能表现。针对低空网络,引入立体分层的思路,为低空及未来工业互联网等领域提供针对性、专业化的方案。而在部署实施层面也更加专业、精细。同时,“汉堡”组网模式对天线波束模式、半功率角、倾角、增益等均有新的要求,这将随着低空或空天地一体网络建设的推进逐步发展完善。

5 总结

低空网络是地面移动网络向低空的延伸,是未来空天地网络的基础。而低空网络出现的新的无线覆盖传播、干扰等特性也带来技术挑战。本文基于低空网络的新问题与技术特征,分析了现有“蜂窝”组网及低空组网存在的问题,综合当前网络规划的重点技术和方法,探索新的面向全空间立体组网下的结构与模式——“汉堡”组网架构,并经过理论分析、网络仿真评估,验证了其性能,为高质量的低空网络规划提供参考。同时,针对新的网络结构对组网设备等方面的要求也在研究中,该组网模式也将进一步在试验网或工程中进行验证,希望能给未来低空与空天地协同组网带来新的启示。

参考文献:

[1] 张晓兰. 低空经济发展前景可期[EB/OL]. [2026-01-25]. https://www.ndrc.gov.cn/wsdwhfz/202411/t20241129_1394729_ext.html.
[2] 南作用. 基于三维射线跟踪模型的无线网络仿真研究[J]. 邮电设计技术, 2015(2): 47-51.
[3] 刘光海,李福昌,肖天,等. 低空移动通信网络组网方案研究[J]. 邮电设计技术, 2025(1): 14-20.
[4] 曾勇,周睿,唐军,等. 全网应急通信无人机系统设计及对地覆盖策略[J]. 电讯技术, 2024, 64(7): 995-1004.
[5] 李海军,南作用,王珏,等. 应急无人机架构和资源约束优化研究

[J]. 航天控制, 2025, 43(4): 1-7.
[6] 李海军,马振东,安少赓,等. 基于无人机的通信系统间干扰分析和解决方案研究[J]. 邮电设计技术, 2025(6): 40-44.
[7] 姚昌华,巫刚,李家强,等. 面向异构传输需求的多无人机通信协同抗干扰决策方法[J]. 电讯技术, 2024, 64(7): 1015 - 1024.
[8] 到底什么是鱼鳞组网?[EB/OL]. [2026-01-25]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1805241095016509863&wfr=spider&for=pc>.
[9] 钟志刚,陈任翔,南作用. 基于 5G 数字网络模型的室内外一体化覆盖规划方法研究[J]. 邮电设计技术, 2021(6): 7.
[10] 中华人民共和国工业和信息化部. 5G 数字蜂窝移动通信网 6GHz 以下频段基站设备数字要求(第一阶段): YD/T 3929-2021[S]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2021.
[11] Forsk. Technical Reference Guide Radio 3.4.1[EB/OL]. [2026-01-25]. <https://downloads.forsk.com/atoll-34.html>.
[12] Forsk. Technical Reference Guide Microwave 3.4.1[EB/OL]. [2026-01-25]. <https://downloads.forsk.com/atoll-34.html>.
[13] Forsk. SPM Model Calibration[EB/OL]. [2026-01-25]. <https://downloads.forsk.com/technotes>.
[14] Forsk. Atoll User Manual Radio 3.4.1 [EB/OL]. [2026-01-25]. <https://downloads.forsk.com/atoll-34.html>.
[15] 李海军,钟志刚,南作用,等. 低空网络跨系统干扰与通感不平衡解决方案[J/OL]. [2026-01-17]. <https://doi.org/10.20079/j.issn.1001-893x.250507002>.

作者简介:

南作用,正高级工程师,主要研究方向为移动通信网络建模仿真及基础研究、卫星通信、微波/短波等无线通信技术规划咨询等;钟志刚,中讯邮电咨询设计院有限公司总工程师,教授级高级工程师,主要从事移动通信领域相关工程咨询、规划、设计等研究及管理工
作;由志远,中讯邮电咨询设计院有限公司数字孪生与人工智能研究院副总经理,高级工程师,主要从事网络技术与数智化技术融合创新研究及应用研发和推广工作;李海军,高级工程师,硕士,主要从事移动通信和信息化工程咨询、规划、设计、行业标准编制工作;孙语瞳,工程师,博士,主要从事移动通信和信息化工程咨询、规划、孪生、仿真等工作;王亚,工程师,硕士,主要从事移动通信和信息化工程咨询、规划、孪生、仿真等工作;陈鑫淼,工程师,硕士,主要从事移动通信和信息化工程咨询、规划、孪生、仿真等工作。