

低空通信组网技术研究

Research on Low-Altitude Communication Networking Technology

王贞凯¹,朱文聪¹,崔翔²,罗安宁²,黄伟程²,王晓军²(1. 中国电信股份有限公司浙江分公司,浙江 杭州 310005;2. 华信咨询设计研究院有限公司,浙江 杭州 310052)

Wang Zhenkai¹,Zhu Wencong¹,Cui Xiang²,Luo Anning²,Huang Weicheng²,Wang Xiaojun²(1. China Telecom Co.,Ltd. Zhejiang Branch, Hangzhou 310005, China; 2. Huaxin Consulting Co.,Ltd., Hangzhou 310052, China)

摘要:

随着近些年低空经济的飞速发展,低空应用的通信问题逐渐成为业界关注的焦点。现有5G网络在低空覆盖仍存在局限性,具体表现为低空无信号覆盖或信号较杂乱,无稳定覆盖小区,导致低空应用无法稳定开展。为解决这一问题,某运营商提出3.5 GHz双载波地空基站组网模式,采用SSB波束垂直分层、SSB虚拟分频等技术,分别覆盖地面和低空,实现地面通信与低空通信的协同。

关键词:

低空通信;SSB;虚拟分频

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2026.05.003

文章编号:1007-3043(2026)05-0014-05

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:

With the rapid development of low-altitude economy in recent years, the communication problem of low-altitude applications has gradually become the focus of attention. The existing 5G network still has limitations in low-altitude coverage, specifically manifested as no signal coverage or disordered signals at low-altitudes, and no stable coverage cells, resulting in the inability to carry out low-altitude applications stably. To solve this problem, an operator proposes a 3.5 GHz dual-carrier ground-to-air base station networking model, using SSB beam vertical layering, SSB virtual frequency division and other technologies to cover both ground and low-altitude areas, achieving coordination between ground and low-altitude communications.

Keywords:

Low-altitude communication;SSB;Virtual frequency division

引用格式:王贞凯,朱文聪,崔翔,等.低空通信组网技术研究[J].邮电设计技术,2026(5):14-18.

0 引言

5G技术的快速发展为低空通信网的建设提供了坚实的基础。在高速率、大容量和低延迟的网络条件下,支持海量设备的接入和高效的数据传输,在低空通信领域具有巨大的应用潜力。通过建设低空网络,实现低空应用场景中地面网络信号向数百米高度的覆盖,满足无人机、低空飞行器等设备的通信需求,满足低空物流、低空出行、空域监管等方面的需求^[1]。

中国电信的低空通信组网主要针对300 m以下低空空域的通信需求,推动低空行业应用的发展。

1 技术概述

5G-A网络部署为低空通信网的形成提供强有力的支持。5G-A网络不仅具备更高的带宽和更低的延迟,还具备更强的可靠性和安全性,能够满足低空应用场景中复杂多变的通信需求。

1.1 低空通信组网需求

低空通信的主要应用场景是物流、通航、巡检、安防、救援等,表1给出了这些业务的通信需求,它们对上行视频回传通信需求高^[2-3]。其中,视频回传对上行

通讯作者:王晓军, wangxj.hx@chinaccs.cn

收稿日期:2026-03-16

边缘速率的要求达 25 Mbit/s,对下行边缘速率要求为 1 Mbit/s,对端到端时延的要求为 60~120 ms。对于低空通信组网,如果需满足大部分需求(即 300 m 以下无人机通信需求),需制定专门对空覆盖方案。

表 1 典型低空业务通信需求

应用场景	业务	上行边缘速率/(Mbit/s)	下行边缘速率/(kbit/s)	高度/m	覆盖范围
物流、通航	通航业务:视频回传	25	300	300~600	城区
	eVTOL:视频回传	10	300	300	城区
	物流:基于高清视频的人工接管	5@95%	300	60~300	城区
巡检、安防、救援	视频回传 4K	25	300	200~300	巡检覆盖基础设施,安防覆盖城市

1.2 低空通信组网技术

结合中国电信现有 5G 网络频谱,现有 5G 网络仅为对地覆盖,可采用空地一体通信组网技术,充分利用现有 5G 基站资源,节约建网成本^[4]。

空地一体通信组网技术分为 2 种情况。

a) 异频组网。在低空通信网络中,不同的频点被用于主导覆盖地面和低空区域,通过分配不同的频点,可以有效避免地面和低空之间的信号干扰。其优势在于可以资源共享,低空和地面共享小区容量,能够充分利用网络资源;网络优化简单,地面网络需要的优化调整较少,降低了网络部署和维护的复杂度;由于使用不同的频点,小区间的干扰较小,特别是小区边缘的干扰问题得到较好解决。异频组网适用于低空网络覆盖需求明确,地面和低空业务相对独立的场景,例如在城市环境中,地面通信需求和低空无人机通信需求可以分别通过不同频点进行覆盖。

b) 同频组网。地面和低空使用相同的频点进行通信。这种方式可以充分利用频谱资源,但需要解决空地同频干扰的问题。其优势在于频谱利用率高:能够更高效地利用有限的频谱资源,特别适合频谱资源紧张的情况;在网络设计、建设、扩容时,频率规划简单,是一种经济高效的组网方式;覆盖连续性好,通过特殊的设计,如虚拟分频技术,可以实现地面与低空的无缝覆盖。同频组网适用于对频谱资源利用效率要求较高、需要实现地面与低空无缝覆盖的场景。

中国电信的低空通信组网技术,可通过虚拟分频技术,实现空地同频组网。采用虚拟分频专网方案,利旧现网 3.5 GHz 载波,配置 2 个独立的逻辑小区分别

覆盖地面和低空。

2 低空通信组网技术研究

根据中国电信和中国联通现有 5G 频谱,建设低空通信网,应保障高速率及高容量需求,因此优先选择高频段大带宽的频谱,本文主要以中国电信 5G 主要频段 3.5 GHz 开通低空通信为例,探讨中国电信低空组网技术。

2.1 低空载波频率组网

3.5 GHz 频段是中国电信 5G 的主要频段,其优点是带宽大,与中国联通共建共享后双载波可达到 200 MHz,其中第 1 载波为 3 400~3 500 MHz,第 2 载波为 3 500~3 600 MHz。地面网络使用 3.5 GHz 的第 1 载波和第 2 载波,低空网络优先使用 3.5 GHz 第 2 载波。本文主要研究 3.5 GHz 地面基站与低空覆盖基站的组网关系,主要有以下几种方案^[4~5]。

a) 3.5 GHz 单载波地空异频组网。对地基站只部署第 1 载波;对空基站只部署第 2 载波,空地同时覆盖。

b) 3.5 GHz 双载波地空异频组网。对地基站只部署第 1 载波;对空基站共 AAU 部署双载波,第 1 载波覆盖地面,第 2 载波空地同时覆盖,对空基站的对空载波与对地基站的对地载波异频。

c) 3.5 GHz 双载波地空同频组网。对地基站已部署双载波;对空基站共 AAU 部署双载波,第 1 载波覆盖地面,第 2 载波空地同时覆盖,对空基站的对空载波与对地基站的对地载波同频。

考虑 5G-A 网络中,3.5 GHz 频段需要全面升级为双载波用于地面覆盖,中国电信低空通信组网最佳方案为第 3 种“3.5 GHz 双载波地空同频组网”,但应采取措施来规避同频干扰,如 SSB 错频、虚拟分频等技术。

2.2 SSB 频点配置研究

3.5 GHz 双载波基站对空和对地小区可以配置不同的 SSB 频点(配置不同的 GSCN 对应不同 SSB 频域位置)。下面均以 3.5 GHz 第 2 载波为例进行说明(地面站第 1 载波覆盖地面,低空站第 2 载波同时覆盖地面和空中)。

a) 单 SSB 错频。如图 1 所示,每个载波小区只配置一个 SSB,通过 GSCN 的不同配置,实现低空小区与地面小区的异频组网。

b) 双 SSB 虚拟分频。如图 2 所示,对低空站第 2 载波小区进行虚拟分配,配置 2 个 SSB 频点。既可以

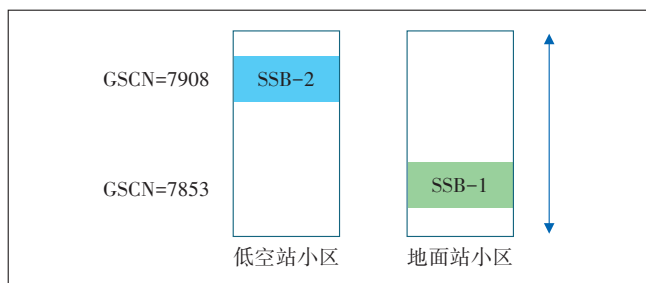


图1 单SSB错频示意

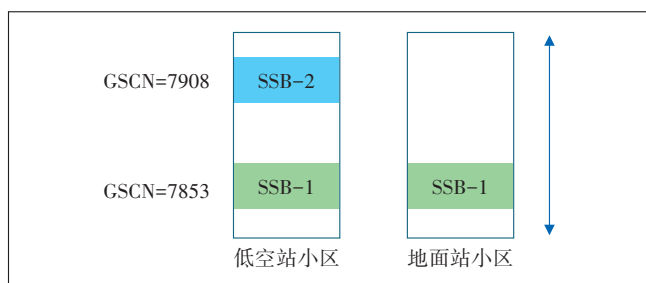


图2 双SSB虚拟分频示意

实现地面网的同频组网,又可以实现低空网与地面网异频组网。同时,地面与低空虚拟分频,可独立配置低空策略,地面网和低空网可分别配置邻区,降低优化难度。

2.3 SSB波束分层研究

SSB波束是5G中用于同步和小区搜索的信号。SSB波束的数量与覆盖能力有关,SSB波束越多,波束越窄,覆盖能力越强。对于3.5 GHz频段,在时域上,每个SSB由4个连续的OFDM符号组成,在2.5 ms单/双周期帧结构中,最多支持7个SSB波束发送。如图3所示,在2.5 ms双周期帧结构中,DDDS时隙共配置7个SSB^[6]。

目前地面网AAU设备基本配置为水平7个SSB波束,每个波束垂直6°,为了实现低空覆盖,提高垂直覆盖能力,应配置垂直多层的SSB波束。

2.3.1 垂直波束分层模式

为了同时覆盖地面和低空,需要对SSB的7个波束进行垂直的分层配置,一般有2种模式:垂直双层

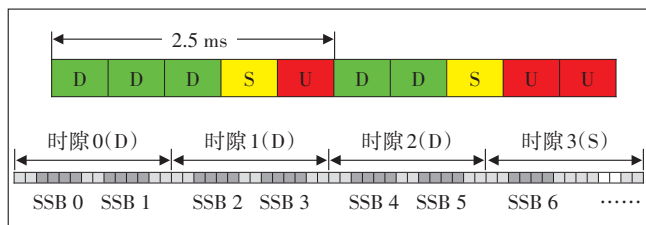


图3 3.5 GHz频段帧结构及SSB占用时隙示意

(4+3)SSB波束、垂直3层(3+2+2)SSB波束(见图4)。

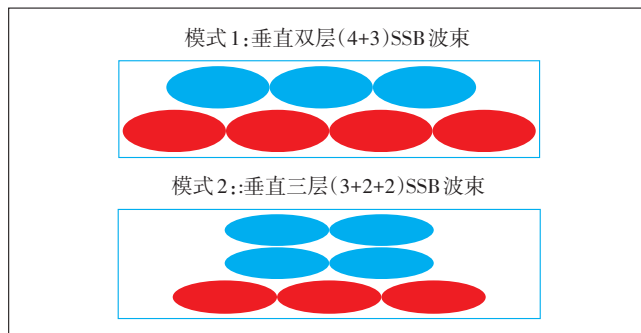


图4 SSB波束模式

模式1:垂直双层(4+3)SSB波束模式。下层SSB 4波束指向地面,用于覆盖地面用户;上层SSB 3波束指向空中,用于覆盖低空用户。

模式2:垂直3层(3+2+2)SSB波束模式。下层SSB 3波束指向地面,用于覆盖地面用户;中层和上层SSB 2波束指向空中,用于覆盖低空用户。

通过配置2种SSB波束模式每一层波束的垂直倾角,实现低空和地面的同时覆盖。关于SSB波束垂直倾角设置,上述SSB波束模式的最上层SSB波束下倾角度配置为覆盖空中可配置区间的最大角度,最下层SSB波束下倾角度需兼顾地面话务吸收,以及综合考虑对空基站原有地面覆盖区域、原有倾角、载波发射功率等因素来进行配置。

2.3.2 垂直波束分层模式分析

为验证SSB不同波束的优劣,在同一区域内,低空基站选用2种SSB波束配置模式(4+3和3+2+2)进行重复测试。测试区域内通过单SSB错频技术,实现低空小区与地面小区的异频组网。主要比较不同模式不同高度(100/200/300 m)下的平均RSRP、SINR、上行速率等,测试结果如表2所示。

从表2可以看出,在不同的飞行高度下,从覆盖性能来分析,4+3波束在RSRP和SINR性能方面均优于3+2+2波束。从业务速率来分析,2种波束上行平均速率均大于25 Mbit/s,满足低空高清视频回传需求,而且

表2 测试结果

飞行高度/m	RSRP/dBm		SINR/dB		上行速率/(Mbit/s)	
	4+3波束	3+3+2波束	4+3波束	3+3+2波束	4+3波束	3+3+2波束
300	-87.47	-87.64	0.59	0.33	78.17	64.58
200	-85.50	-86.05	3.24	3.56	89.80	82.86
100	-83.03	-84.36	7.51	7.52	98.69	80.34

4+3 波束上行速率更快,相比 3+2+2 波束平均提升 10% 以上。从波束特征来分析,在对空波束水平宽度尺度上,4+3 波束比 3+2+2 波束更窄,波束能量更集中,波束增益更大;在垂直分层尺度上,4+3 波束垂直方向分 2 层,比 3+2+2 模式(3 层)少 1 层,可以减少空中信号分层,有利于网络优化。

因此综合考虑低空覆盖率、性能等指标,以及波束特征,SSB 4+3 波束优于 3+2+2 波束,优先推荐配置 4+3 波束模式。

2.3.3 SSB 虚拟分频波束分析

根据前面分析,垂直双层(4+3)SSB 波束模式优于垂直三层(3+2+2)SSB 波束模式,因此单 SSB 波束建议配置为垂直双层(4+3)波束(见图 5)。

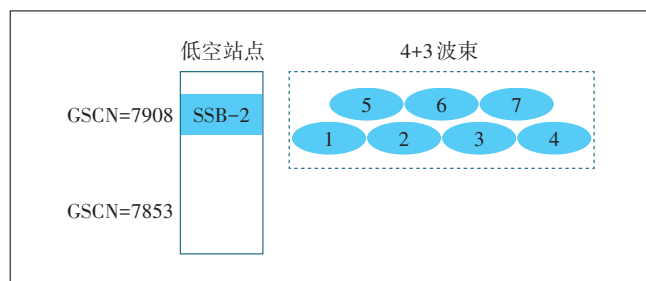


图5 单SSB波束模式

在双 SSB 虚拟分频模式下,如图 6 所示,同小区的 2 个 SSB 波束可以独立配置,SSB1 配置为 4 个波束(可配置为 4~7 个),用于覆盖地面;SSB2 配置为 4+3 垂直波束分层,其中 4 个波束覆盖地面,3 个波束覆盖低空。

为研究 SSB 虚拟分频的优势,在同一区域内,低空基站选用单 SSB 4+3 波束和双 SSB 4+[4+3]波束模式进行重复测试。测试区域内通过单 SSB 错频技术,实现低空小区与地面小区的异频组网;通过双 SSB 虚拟分频技术,既可以实现地面网的同频组网,又可以实现低空网与地面网异频组网。主要比较不同模式不同高度(100/200/300 m)下的平均 RSRP、SINR、下行速率、上行速率、低空占比、覆盖率、切换次数等,测试结果如表 3 所示。

表3 不同模式不同高度下的 RSRP、SINR、速率、低空占比、覆盖率、切换次数、切换失败次数、异常事件总次数对比

飞行高度/m	RSRP/dBm		SINR/dB		下行速率/(Mbit/s)		上行速率/(Mbit/s)		低空占比/%		覆盖率/%		切换次数		切换失败次数		异常事件总次数	
	4+3 波束	4+[4+3]波束	4+3 波束	4+[4+3]波束	4+3 波束	4+[4+3]波束	4+3 波束	4+[4+3]波束	4+3 波束	4+[4+3]波束	4+3 波束	4+[4+3]波束	4+3 波束	4+[4+3]波束	4+3 波束	4+[4+3]波束	4+3 波束	4+[4+3]波束
300	-77.54	-81.34	-3.26	-1.52	100.32	103.16	58.74	71.08	3.40	49.10	47.04	61.93	204	141	3	2	12	3
200	-74.56	-80.54	-2.67	0.68	109.80	110.78	66.78	83.02	4.80	73.20	50.84	81.74	273	98	2	1	5	1
100	-72.00	-77.19	-0.30	3.36	122.16	128.70	72.13	93.09	11.70	89.90	70.19	91.30	223	58	4	0	4	0

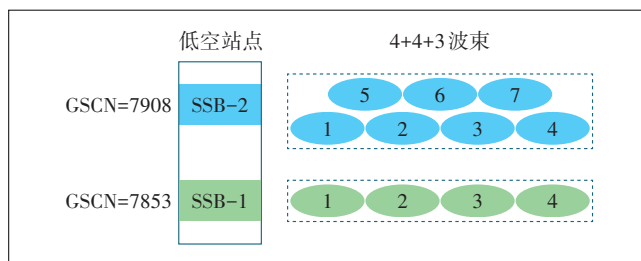


图6 双SSB虚拟分频波束模式

从表 3 可以看出,在不同飞行低空高度下,双 SSB 4+[4+3]比单 SSB 4+3 平均 RSRP 低 4~5 dB;双 SSB 4+[4+3]比单 SSB 4+3 平均 SINR 高 2~3 dB;双 SSB 4+[4+3]下行速率均值和单 SSB 4+3 基本持平,但上行速率明显高于单 SSB 4+3;双 SSB 4+[4+3]和地面频点属于异频切换,只有满足异频切换门限才会切出至地面,因此低空小区占比高于单 SSB 4+3;双 SSB 4+[4+3]覆盖率比单 SSB 4+3 配置约高 20 个百分点,主要原因是 SINR 小于 -3 dB 的比例明显降低,覆盖率明显提高;双 SSB 4+[4+3]的切换次数减少 40% 以上,切换成功率提升;双 SSB 4+[4+3]配置相比单 SSB 4+3 配置的异常事件次数减少 50% 以上。

2.4 低空基站下倾角设置

空中信号的下倾角计算方法如图 7 所示,下倾角 $\alpha = \arctan[(\text{行高度 } H - \text{天线挂高 } h) / \text{水平距离 } d] + \text{机械下倾角} + \text{电子倾角} + \text{SSB 数字下倾角} - 0.5 \times \text{天线垂直波瓣角}$ 。

下倾角对不同信道的影响如表 4 所示。

调整 SSB 波束,可影响控制信道的 RSRP 和 SINR,在 RSRP 弱或 SINR 差的区域,可调整小区 SSB 波束下倾角及波束宽度,使上行速率和下行速率满足高清视频回传要求的 25 Mbit/s。调整基站机械下倾角会改变业务信道覆盖,在地面业务和空中业务之间做好平衡,如在上传或下载速率低的区域,调整机械下倾角增强低空业务信道信号来提升速率。

2.5 总结

低空覆盖的主要挑战是无信号覆盖或信号较杂乱、无稳定覆盖小区,需要开通双载波并调整 SSB 波束

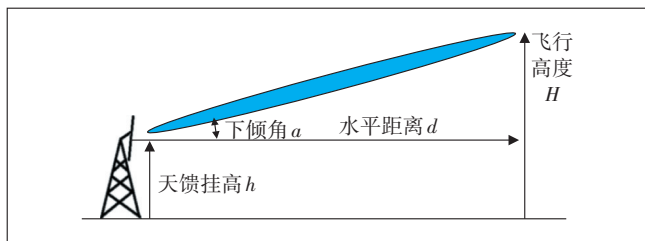


图7 空中信号倾角计算示意

表4 下倾角与信道的关系

下倾类型	业务信道	广播信道	是否可调
机械下倾角	同时影响业务信道和广播信道,可用于控制上行干扰		是
预制电下倾	影响业务包络最大增益指向	影响权值下倾角调整范围和最大增益	否
可调电下倾	影响业务信道,可用于控制上行干扰	-	是
权值下倾角	无影响	仅影响SSB下倾	是

方向做到地面和低空覆盖兼顾,优化低空网络质量,提升感知。随着中国电信5G-A能力的提升,室外3.5 GHz基站将逐步实现双载波连片,最终实现地面站双载波连片、低空站双载波插花或连片的形式,地面基站第2载波与低空站对空载波都为同一载波。

3.5 GHz低空基站的第2载波,由于同时对地又对空覆盖,需要从SSB波束模式上进行调整。采用单SSB错频和双SSB虚拟分频技术都可避免同频干扰,但单SSB错频方案因和地面基站异频会导致切换不如双SSB虚拟分频。实测使用双SSB虚拟分频技术,独立配置SSB波束后,切换成功率和低空小区占比均优于单SSB方案,平均RSRP和SINR较好,上行速率较高。建议双载波组网后,低空基站使用双SSB虚拟分频,SSB波束根据需求进行垂直分层设置,后期可根据低空业务量调整低空波束的数量。

3 结束语

中国电信3.5 GHz低空通信组网,使用7个SSB波束分层覆盖,而在毫米波频段,可支持多达64个SSB波束,极大地提升了低空覆盖能力。低空通信未来将叠加到毫米波频段上实现,并且随着感知技术的发展,实现通信感知一体组网模式^[7]。

低空通信网的建设将推动低空经济的快速发展,为各行各业带来全新的应用场景和商业模式^[8]。例如,在医疗急救领域,无人机可以更快地传递血液样本和医疗物资,提高急救效率;在低空出行领域,无人

机载人飞行和空中出租车等新型交通工具将改变人们的出行方式,提高出行效率;在空域监管领域,低空通信网将为空域管理提供实时、准确的数据支持,提高空域管理水平和安全性。

一张覆盖广泛、高效可靠的低空通信网络,将为低空经济的快速发展提供强有力的支撑,推动各行各业向数字化、智能化、网联化方向发展。同时,随着技术的不断进步和应用场景的不断拓展,低空通信网将不断升级和完善,进一步提升安全性和可靠性,为低空经济的可持续发展奠定坚实基础。

参考文献:

- [1] 广东省通信学会,中国信息通信研究院,中国联合网络通信有限公司广东省分公司. 低空智联网发展研究报告[R/OL]. [2025-02-28]. <https://www.baogaobox.com/insights/241225000004985.html>.
- [2] IMT-2020(5G)推进组. 5G-Advanced场景需求与关键技术[R/OL]. [2025-02-28]. <https://www.digitalelite.cn/h-nd-5439.html>.
- [3] 中国电信集团有限公司,爱立信,诺基亚,等. 通感一体低空网络白皮书[R/OL]. [2025-02-28]. https://www.zte.com.cn/content/dam/zte-site/res-www-zte-com-cn/mediares/zte/%E6%97%A0%E7%BA%BF%E6%8E%A5%E5%85%A5/%E7%99%BD%E7%9A%AE%E4%B9%A6/Low_altitude_network_by_ISAC_CN.pdf.
- [4] 中国电信股份有限公司研究院. 中国电信-空地一体5G增强低空网络白皮书2024[R/OL]. [2025-02-28]. https://www.sohu.com/a/791019726_121615308.
- [5] 于金杨,张吉,李晶,等. 空地一体通信网络构筑低空经济底座[J]. 信息通信技术与政策,2024,50(11):11-17.
- [6] 吴俊卿,张智群,李保罡,等. 5G系统技术原理与实现[M]. 北京:人民邮电出版社,2021.
- [7] IMT-2020(5G)推进组. 5G-Advanced通感融合场景需求研究报告[R/OL]. [2025-02-28]. <https://www.digitalelite.cn/h-nd-5201.html>.
- [8] 赛迪顾问股份有限公司,智能装备产业研究中心. 中国低空经济发展研究报告(2024)[R/OL]. [2025-02-28]. <https://www.waitang.com/report/59301827.html>.

作者简介:

王贞凯,高级工程师,学士,主要从事移动通信无线网新技术的研究工作;朱文聪,高级工程师,学士,主要从事移动通信无线网新技术的研究工作;崔翔,工程师,学士,主要从事移动通信无线网新技术的研究工作;罗安宁,高级工程师,学士,主要从事移动通信无线网新技术的研究工作;黄伟程,高级工程师,学士,主要从事移动通信无线网新技术的研究工作;王晓军,高级工程师,学士,主要从事移动通信无线网新技术的研究工作。