

白皮书
2018-09



5G 无人机应用

目录

引言	P1
无人机应用场景和通信需求	P2
4G网络能力	P12
5G网络能力	P17
网联无人机终端通信能力	P24
5G应用案例	P26
无人机安全飞行	P36
标准进展	P39
趋势，总结和展望	P45
贡献单位	P47

引言

无人驾驶航空器（Unmanned Aerial Vehicle, 以下简称UAV）简称为无人机，其全球市场在过去十年中大幅增长，现在已经成为商业、政府和消费应用的重要工具。无人机能够支持诸多领域的解决方案，可以广泛应用于建筑、石油、天然气、能源、公用事业和农业等领域。当前，无人机技术正在朝军民融合的方向高速发展，无人机产业已经是国际航空航天最具活力的新兴市场，成了各国经济增长的亮点。

无线通信在过去20年经历了突飞猛进的发展，从以话音为主的2G时代，发展到以数据为主的3G和4G时代，目前正在步入万物互联的5G时代。移动网络在继续丰富人们的沟通和生活的同时，也向全行业数字化转型提供能力，提高各行业的运作效率和服务质量。5G以全新的网络架构，提供10Gbps以上的带宽、毫秒级时延、超高密度连接，实现网络性能新的跃升。ITU定义了5G三大场景：增强移动带宽（Enhanced Mobile Broadband,以下简称eMBB）、超可靠低时延通信（Ultra-Reliable Low-latency

Communications，以下简称uRLLC）、大规模机器类通信（Massive Machine-Type Communications，以下简称mMTC）。

无人机行业高速发展的同时，也对无人机通信链路提出了新需求，呈现出与蜂窝移动通信技术紧密结合的发展趋势，形成“网联无人机”。业界预测，无人机与移动通信的结合，将给产业界带来10倍的商业机会。移动运营商经过几十年的发展覆盖了全球70%的陆地及90%的人口。以往无线信号主要覆盖地面的人和物，没有专门为无人机设计空中覆盖，低空数字化是一块有待开发的宝藏。在即将到来的5G时代，5G蜂窝移动通信技术与无人机的结合使得这些原本难以想象的想法成为可能。

本文将给出网联无人机应用场景和通信需求、4G现网及未来5G网络对无人机需求的满足度，5G网络下网联无人机的应用案例，无人机终端通信能力，安全飞行相关法规与通信需求，标准进展，并对网联无人机的未来进行展望。

注：无人机有多种分类方法(飞行高度、重量、用途、动力、活动半径)
本文中的无人机是作业高度300m以下民用无人机

无人机应用场景和通信需求

1. 应用场景综述

无人机是利用无线遥控和程序控制的不载人飞机。它涉及传感器技术、通信技术、信息处理技术、智能控制技术以及航空动力推进技术等，是信息时代高技术含量的产物。无人机价值在于形成空中平台，结合其他部件扩展应用，替代人类完成空中作业。目前以消费类无人机占据更多的市场份额，但行业无人机也正在被看好。今年6月结束的2018世界无人机大会预测，未来5年，全球行业无人机行业将保持迅猛发展，到2022年市场总值将达到150亿美元，为2016年的近12倍；其出货量将突破62万架，是2016年的6倍。

目前，在中国乃至世界各地，诸多领域已显现出“无人机+行业应用”的蓬勃发展势头。无人机在农林植保、电力及石油管线巡查、应急通信、气象监视、农林作业、海洋水文监测、矿产勘探等领域应用的技术效果和经济效益非常显著。此外，无人机在灾害评估、生化探测及污染

采样、遥感测绘、缉毒缉私、边境巡逻、治安反恐、野生动物保护等方面也有着广阔的应用前景。深圳市无人机行业协会提供的统计数字显示，截至2017年12月31日，2017年中国国内民用无人机产量达到290万架，同比增长67%；其中深圳的民用无人机产值已达300亿元人民币，占据全球民用无人机市场份额的70%。

接入低空移动通信网络的网联无人机，可以实现设备的监视和管理、航线的规范、效率的提升，促进空域的合理利用，从而极大延展无人机的应用领域，产生巨大经济价值。基于新一代蜂窝移动通信网络5G为网联无人机赋予的实时超高清图传、远程低时延控制、永远在线等重要能力，全球将形成一个数以千万计的无人机智能网络，7x24小时不间断地提供航拍、送货、勘探等各种各样的个人及行业服务，进而构成一个全新的、丰富多彩的“网联天空”。



图2-1 数字网联天空

1.1 物流

1.1.1 业务场景描述

对比传统物流行业，无人机物流优势明显。

规避拥堵，运输快速高效：相对于地面运输，无人机物流具有方便快捷的优点，在山区较多的省份，陆路运输所耗费的时间和成本较平原地区高很多，采用无人机则可能以同样的成本实现更高的物流效率。在拥堵的城市和偏远的山区运送急需物品，则可能比陆运节省80%的时间，而且按照发达国家经验，高层建筑势必会越来越多地配备直升机停机坪，也能够方便无人机起降。

应对小批量任务，解放人力：无人机物流可以有效节省人力资源的消耗，将复杂环境下和大批量的投递任务交给人和地面车辆，而将简单场景下的小批量的投递任务交给无人机，则可以更充分地发挥人力的灵活应变能力，减少体力消耗。

摆脱地形限制，应对极端条件：在极端条件下，无人机可以轻松抵达地面车辆无法到达的区

域，例如在应急救援物资的投送任务中，无人机配合直升机可以大大提高投送效率。

1.1.2 发展趋势和特点

物流配送进入无人机时代，打开了国内、外物流运输的新战场。

物流快递是极具潜力的无人机应用领域之一。2017全球智慧物流峰会数据显示，2016年智慧物流市场规模达到2000亿元，到2025年将超过10000亿元。

近年来，我国逐渐重视并鼓励无人机在物流等专业领域的应用。2018年1月，国务院出台《关于推进电子商务与快递物流协同发展的意见》，明确指出要提高科技应用水平，鼓励快递物流企业采用先进适用技术和设备，提升快递物流装备自动化、专业化水平。今年全国邮政管理工作会议还提出，要促进科技创新，推广应用无人机、无人车、无人仓库等技术。

1.1.3 通信能力需求

实现无人机物流配送包括运营调度中心、无人机配送站、物流终端（即无人机）三个实体。

在配送过程中涉及配送任务的下发、配送任务执行、无人机状态上报等环节，无人机物流当前对通信的需求包括：飞行状态上报以及RTK高精度

定位信息的下发，出于飞行安全和紧急情况处理考虑，物流无人机也需要具备视频回传实时操控能力，在必要的时候由人工接管。

表2-1 无人机物流场景网络指标

时间\指标	业务属性	上行速率	下行速率	业务端到端时延	控制端到端时延	定位	覆盖高度	覆盖范围
2018	自动飞行	UL 200Kbp	DL 300Kbps	<500ms	100ms	<1m	100m	城区、城郊、农村
	基于视频的人工接管	UL 6Mbps						
2020	自动飞行	UL 200Kbp		<200ms	20ms	<0.5m	100m	
	基于高清视频的人工接管	UL 25Mbps						

2.3 农业植保

2.3.1 业务场景描述

植保机械化是实现农业种植机械化、现代化的关键一环。相对于有人驾驶飞机喷洒而言，无人机植保具有作业效率高、单位面积施药液量小、无需专用起降机场、机动性好等优点，其在日本等国家发展已十分成熟。无人机植保包括喷洒农药种子、巡逻监视、病虫害监察等应用。

无人机植保作业与传统人工植保相比，具有精准高效、安全环保、智能化、操作简单等特点，在农业领域，植保无人机在不断证明着它的突出优势。

一是提高植保效率，节约资源成本。无人机植保作业强度高，可同时代替多人的劳动力；采用喷雾喷洒方式至少可以节约50%的农药使用量，节约90%的用水量，这将很大程度地降低资源成

本;与传统植保机械相比,植保无人机还具有折旧率低、单位作业人工成本低、易保养等特点。

二是防治效果好,减少污染并提高产量。无人机植保具有作业高度低、飘移少、可空中悬停等特点,喷洒农药时旋翼产生的向下气流有助于增加气流对农作物的穿透性,减少农药损失,且其覆盖率优于人工操作,防治效果好,可有效减少农药对土壤的污染并助产增收。

三是作业安全性高,降低中毒风险。无人机操作规范,远距离操控避免了作业人员暴露于农药下的危险,提高了作业的安全性。解决了传统人工植保方式中经常出现的中毒、中暑以及踩踏作物等问题。

2.3.2 发展趋势和特点

近10多年来,农业植保无人机在我国迅猛发展。至2017年9月,不完全统计,全国植保无人飞机装机量达到近万架,已经在包括水稻、小麦、玉米、甘蔗、果树、棉花等多种作物上进行了病虫害防治作业,实际效果证明已经达到实用水

平,正处于迅速发展阶段。

无人机测绘先行,测绘除了土地信息外,也包括气候采集如风速、天气,温度、湿度以及大气压力的数据实时观测。高效、快捷的测绘可用于路径规划和精准作业,即测即洒是未来植保无人机发展的方向。

未来无人机农业植保将成为一种服务,互联网农业服务平台公司一端连接种植户,一端连接专门提供无人机喷洒农药服务的队伍,搭建了一套农业生产服务平台,种植户无需购买无人机,只需要订购农事服务。

2.3.3 通信能力需求

植保无人机当前经营模式通常由植保队操作,飞行状态数据实时通过蜂窝网络上报云端用于计费和管理,高精度定位信息通过短距通信或蜂窝网络下发给无人机。土地勘测图片数据量大,目前以存在SD卡上为主,未来希望网络提供实时传输。

表2-2 无人机农业植保场景网络指标

时间\指标	业务属性	上行速率	下行速率	业务端到端时延	控制端到端时延	定位	覆盖高度	覆盖范围
2018	喷洒农药	UL 300kbps	300Kbps	<500ms	<100ms	<0.5m	10m	农村
2020	农业土地勘测	UL 20Mbps		<200ms	<20ms	<0.1m	200m	

2.4 巡检、安防、救援

2.4.1 业务场景描述

无人机在公共安全领域应用众多，如边防监控、消防监控、环境保护、刑侦反恐、治安巡逻等。突发事件中，无人机可以代替警力及时赶往现场，利用可见光视频及热成像设备等，把实时情况回传给地面设备，为指挥人员决策提供依据。在公共安全作业中，无人机典型网络需求包括：实时视频传输（多路）、飞行状态监控、远程操控以及网络定位

我国领土由于地理环境和气候的多样性，各种自然灾害时有发生，每年因自然灾害、事故灾害造成的经济损失高达数千亿，灾后救援工作尤为重要。无人机在展开救援作业中可实现快速响应，在第一时间到达现场，迅速展开作业；采集现场数据，迅速将现场的视、音频信息传送到指挥中心，供指挥者进行评估和决策；能够实现通信中继功能，快速恢复现场局部通信；跟踪事件的发展态势，帮助指挥中心实施不间断指挥处理。

基础设施巡检是指对输电线路、输油管道、基站塔台、桥梁、风力发电机等基础设施的巡视检查或状态监测。其作业内容具体包括对基础设施本身的监测、对周边环境的勘探、基础设施的日常周期维护以及简单的故障排查、处理等。传统的人工巡检方案受环境及天气等影响，工作量大、工作效率较低、成本较高，且存在一定的人

身安全风险。无人机以成本低、灵活性强、安全性高、受自然环境及地形影响较小、视角更优等特点，越来越广泛地应用于基础设施巡检领域。

电力设备中输电线路一般位于崇山峻岭、无人区居多，人工巡视检查设备缺陷的效率较低，因蛇、虫、蚁等小动物咬伤员工的事件也屡见不鲜；另外，输电铁塔、导线、绝缘子等设备位处高空，应用无人机巡查，既能避免高空爬塔作业的安全风险，亦可以360°全视角查看设备细节情况，提高巡视质量。从作业安全、作业效率、作业质量等多个方面出发，无人机逐渐替代人工巡视，是电力行业解决老大难问题，推行智能巡检技术的必然选择。随着电网快速发展，电力行业机巡作业市场规模不断增加，除输电线路巡检外，在规划设计、基建工程、物资配送、安全监督等领域也提出了无人机作业需求，同时在风电发电、光伏发电、铁塔公司等其它能源行业市场，潜在需求量巨大。

2.4.2 发展趋势和特点

公共安全监控市场需求巨大。根据预测，美国公共安全领域的无人机约占商业无人机总量的10%，预计到2020年市场规模约为51 亿元；按照中美未来公共安全支出比例估算，保守预计2020年中国国内公共安全市场空间约70 亿元。而无人机因为零人员伤亡、恶劣环境作业、强机动、易操作等突出优点，使其成为公共安全监控领域的

新星，市场潜力巨大。通过智能无人机飞行平台以及5G蜂窝网络能力的有效引入，促进了传统安防产业向天地一体化协同作战的方向转型以及多场景安防能力的智慧升级，必将作为一种新型的安防解决方案模式得到更加广泛的应用，从而促进传统安防服务商的智慧升级，带动整个产业的发展。

无人机应用在基础设施巡检领域包括：建筑外墙巡检、电力巡检、基站巡检、石油管线巡检以及河道巡检等。电力塔、通信基站、石油管线等公共设施往往架设在郊区或城区楼顶等区域且分布较为分散，挂载变焦摄像头的网联无人机，可按照指定的任务点执行诸如，检测螺丝松动、标签等动作，结合图像识别还可完成天线挂高、倾角的计算等工作，并生成巡检记录和巡检报告。

未来随着无人机续航能力的增强，以及5G通信模组的成熟，结合边缘计算（Mobile Edge Computing,以下简称MEC）的应用，5G综合承载

无人机飞控、图像、视频等信息将成为可能。无人机与控制台均与就近的5G基站连接，在5G基站侧部署边缘计算服务，实现视频、图片、控制信息的本地卸载，直接回传至控制台，保障通信时延迟在毫秒级，通信带宽在10Mbps以上。同时还可利用5G高速移动切换的特性，使无人机在相邻基站快速切换时保障业务的连续性，从而扩大巡线范围到数公里范围以外，极大提升巡线效率。

2.4.3 通信能力需求

在巡检，安防，救援场景中，无人机需要具有优良的飞行稳定性、较快的反应能力、不间断地进行现场的实时跟踪，同时可以实时回传高清视频用于人眼或计算机AI的分析识别。具体来说，无人机此类业务的典型网络需求包括：实时视频传输（多路）、飞行状态监控、远程操控以及网络定位。

表2-3 无人机巡检、安防、救援场景网络指标

时间\指标	业务属性	上行速率	下行速率	业务端到端时延	控制端到端时延	定位	覆盖高度	覆盖范围
2018	1080p 回传	UL 6Mbps	300Kbps	<500ms	<100ms	<1m	100m	巡检覆盖基础设施
2020	4K 视频回传	UL 25Mbps		<200ms	<20ms	<0.5m	100m	安防覆盖城市

2.5 测绘

2.5.1 业务场景描述

无人机测绘领域中，通过无人机抓取数据制作实时实景地图的技术方案，可以实现在不同的应用场景基于地图的数据挖掘，在抢险、科研、教育、智慧农业、智慧城市、勘察、场景巡检等领域，提供强大的扩展空间，让行业应用人员根据需求定制理想的飞行平台。

无人机倾斜摄影技术的诞生，颠覆了传统测绘的作业方式，该技术通过无人机低空多位镜头摄影获取高清晰立体影像数据，自动生成三维地理信息模型，快速实现地理信息的获取，具有效率高、成本低、数据精确、操作灵活、侧面信息可用等特点，满足测绘行业的不同需求。极大有助于测绘行业内、外的协同工作，解决了由于天

气等外因造成的工作延误，把原本大量的业外工作转变成业内工作，极大的解放了测绘人员的劳动时间和减少劳动强度。

2.5.2 发展趋势和特点

网联无人机可以毫秒级速度制作实景矢量地图，相对传统做一张地图需要数天、数周甚至数月的更新时间，无人机完成了从地图数据的抓取、传输、拼接、纠偏、上传至云端更新最新地图的完整流程，并提高了数百倍效率。

2.5.3 通信能力需求

测绘场景下，除了典型的飞行状态监控、远程操控以及网络定位业务需求，在需要实时构建测绘模型场景下，实时图像传输、图像处理对网络大带宽需求尤为迫切。

表2-4 无人机测绘场景网络指标

时间\指标	业务属性	上行速率	下行速率	业务端到端时延	控制端到端时延	定位	覆盖高度	覆盖范围
2018	图像回传	UL 6Mbps	300Kbps	<500ms	<100ms	<1m	100m	城市，农村
2020	激光测绘	UL 100Mbps		<200ms	<20ms	<0.1m	200m	

2.6 直播

2.6.1 业务场景描述

无人机可以将视野带入高空，以上帝视角俯瞰。无人机全景虚拟现实VR(Virtual Reality，以下简称VR)直播将带来更为震撼的身临其境的直播感受。通过无人机挂载360度全景镜头进行

视频拍摄，全景相机完成视频采集、拼接处理与视频流处理，通过连入5G网络上行链路将4K/8K全景视频传输到核心网侧视频服务器，再通过下行链路传输给多位用户。而用户只要戴上VR眼镜，就都可以随时随地无延迟的体验激动人心的现场。

5G无人机VR直播在未来将会广泛用于体育赛事、演艺活动等大型活动极致体验直播以及广告、新闻、电影等商业活动拍摄中。随时随地都能通过VR全景直播获取比现场更好的体验，将指日可待。

2.6.2 发展趋势和特点

2017年我国网络表演（直播）市场营收达到304.5亿元，相比2016年的218.5亿元，同比增长39%。网络表演（直播）已经成为网络文化内容供应、技术创新、商业模式创新的代表，成为网络文化市场重要组成部分。航拍娱乐是大众对无人机最熟悉的应用领域，未来无人机在该领域的

市场规模将有望到达300亿。目前主流直播平台清晰度以1080P为主，最高为2K，随着在线直播业务的兴起与终端设备的更新换代，直播玩家对体验要求不断升级，催生大量4K/8K视频影像实时直播业务需求。

2.6.3 通信能力需求

在直播业务中，无人机需要网络稳定高速保障实现高清实时视频传输，当前业界能力可以实现4K实时直播，未来为获得更清晰的画面更好体验，需要升级到8K视频回传。同时直播场景也需要飞行状态监控、远程操控、网络定位能力，具体网络指标如下：

表2-5 无人机直播业务网络指标

时间\指标	图传分辨率	视频回传速率	远程操控速率	业务端到端时延	控制端到端时延	定位	覆盖高度	覆盖广度
2018	1080P	UL 6Mbps	DL 300Kbps	500ms	100ms	1m	<100m	城市、旅游景点
	4K	UL 25Mbps				1m		
2020	4K	UL 25Mbps	DL 600Kbps	200ms	20ms	0.5m		
	8K	UL 100Mbps				0.5m		

2.7 编队飞行

2.7.1 业务场景描述

目前无人机除了单机应用外，多机编队也开始出现，当前多机编队主要应用于表演领域。无人机编队表演需要解决授时、导航、抗干扰、路径协调等多个难题，多架无人机协同运动需要

精确的定位也需要精确同步的时间，酷炫的编队还需要规划合理的路线，同时要应对相互间的干扰。

多无人机协同编队飞行可以扩大任务范围、提高任务执行效率和完成质量。其中涉及的多无人机状态感知和数据融合、任务分配和航迹规

划、编队控制都需要通信技术的配合。

2.7.2 发展趋势和特点

2017年12月，1180架无人机编队“科技舞蹈”表达了对2017广州《财富》全球论坛的欢迎；2018年2月，平昌冬奥会的开幕式演出中，1218架无人机组成一名单板滑雪运动员的形象；2018年5月在西安，则有1374架无人机进行表演，编队飞行的数量呈增多的趋势。

无人机编队飞行在其他领域也有较好的发展前景，不仅能够应用在无人机编队飞行表演中，在未来，这种大规模协同工作方式，将大大提高搜索效率和探测精度，在提供准确数据的同时，

为农林防护提升效率，为搜索救援赢得宝贵时间。

2.7.3 通信能力需求

无人机编队飞行也叫无人机蜂群表演，有两种交互方式，通过地面基站给每一台无人机发布指令，或者无人机之间进行点对点的交互。前者对通信可靠性、时延、连接数提出了高要求。编队飞行对时延有较高要求，假设无人机的速度是60km/h，20ms网络时延引起的额外制动距离是0.33米($60 \times 1000 / 3600 \times 20 / 1000$)，时延增加将直接影响编队飞行的安全性。

表2-6 无人机编队飞行业务网络指标

时间\指标	下行速率	上行速率	业务 端到端时延	控制端到端时延	覆盖高度	覆盖广度
2018	DL 200Kbps	UL 200Kbps	100ms	0.5m	<200m	城市
2020	DL 1Mbps	UL 1Mbps	20ms	0.1m		

2.8 未来云端AI自主飞行

2.8.1 业务场景描述

当前的无人机无论是视距内控制还是超视距远程控制，都需要人观看无人机传回的实时视频进行控制，未来由云端的AI代替人观看视频控制无人机，将进一步提升效率解放人力，让无人机成为真正的空中智能平台。

5G网络的大带宽低时延能够实现无人机实时

实景导航，网络辅助的环境感知智能避障。无人机回传感知传感器信息由云端AI判断周围的障碍物、多机协同避让，相比在无人机本地判断将节约成本和功耗，云端获取到的信息更加全面，算法统一易于升级。5G网络同时回传采集到的业务信息，通过云端AI进行自动分析，提前识别隐患。

2.8.2 通信能力需求

无人机云端AI自主飞行的场景丰富，无人

机需要安全高速的网络保障实现高清多路视频（4K/8K）回传到云端供AI处理、飞行状态监

控、远程操控、网络定位以及实时下载高精度三维地图，具体网络指标如下：

表2-7 无人机自主飞行网络指标

时间\指标	业务	上行速率	下行速率	业务端到端时延	控制端到端时延	定位	覆盖高度	覆盖广度
2018	1080P	UL 6Mbps	DL 6Mbps	500ms	100ms	0. 5m	<100m	城市 农村
	4 路 1080p	UL 25Mbps						
2020	4K	UL 25Mbps	DL 50Mbps	200ms	20ms	0. 1m	<200m	
	4 路 4K	UL 100Mbps						

2.9 无人机通信需求总结

IMT-2020应用组预测，上述七大类网联无人机典型应用场景在未来市场空间与发展成熟度的关系如下：

各类应用场景对通信能力需求有所差异，但均从上下行速率、数据链路传输时延、控制链路传输时延、覆盖高度、定位能力等角度对移动蜂窝网络提出了不同等级的要求，为后续进行网络规划部署和网络能力实现提供了重要的依据。

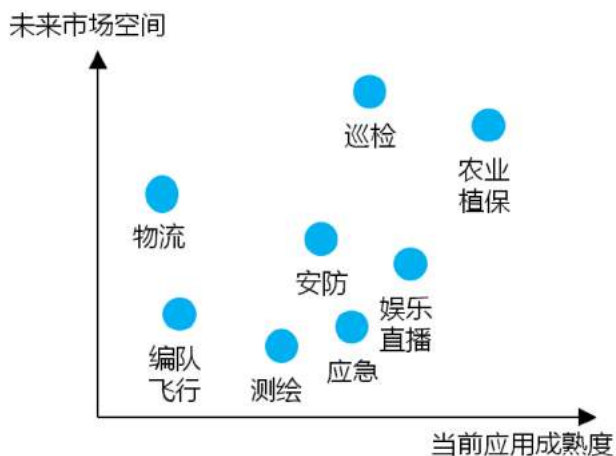


图2-2 无人机七大类应用场景空间与成熟度

4G网络能力

3.1 综述

蜂窝连接对于无人机的控制和协同操作非常重要，并能实现更多样化的使用场景。当前已有很多无人机的应用在4G现网上运行，例如农业、物流、基础设施巡检等。通信运营商与设备商也进行了大量的低空覆盖测试和研究，目前4G网络已经具备支持无人机部分场景的通信需求，但同样具有很多挑战，4G网络在带宽、时延、干扰协同上都存在一定的优化空间。

3.2 4G网络测试表明4G网络可支持无人机部分场景

2017年在4G现网中，运营商选取了多个城市不同场景进行低空网络质量测试，场景涵盖城区、工业园区和郊区，参见下表，站间距从180米到2000米不等。频段覆盖TDD-LTE D 频段(2575~2635M)和F 频段(1885~1915M),测试高度为50-300米，测试指标包括下行参考信号接收功率（Reference Signal Receiving Power，以下简称RSRP）、下行信号与干扰加噪声比（Signal to Interference plus Noise Ratio，以下简称SINR）、以及和安全飞行密切相关的上行业务速率、时延、掉线率等。

表3-1 移动蜂窝网低空覆盖测试场景

	城区体育馆	城区公园	工业园区	郊区学校	郊区
应用	赛事转播、安防	商业演出、航拍	安防、巡检	航拍、直播	农业植保、管线巡检
站间距	站间距 180m 左右，密集分布	站间距 300m，较为密集分布	站间距 400m，较为密集	站间距 1000 米，一般密集	站间距 2000 米，稀疏分布
周边环境特征	建筑物较多	空旷，有湖泊，树木较多	低层建筑较多	中间是平地，空旷；周边是看台和其他建筑	比较开阔，一定距离外有山林

信号质量测试结果显示低空50-300米区间信号强度RSRP在-80~-90dbm之间，属于较好覆盖，室外能够发起各种业务。但由于飞行沿线的

基站主要为地面覆盖建设，无人机所处高度不在地面站天线主瓣范围内，空中信号杂乱，且无主覆盖小区，造成基站下行干扰较大，在部分区域

可能出现终端无法解调，出现断线失联问题，可能触发长时间处于该区域的无人机降落或返航。

下图为各场景不同高度RSRP 和SINR 分布图。

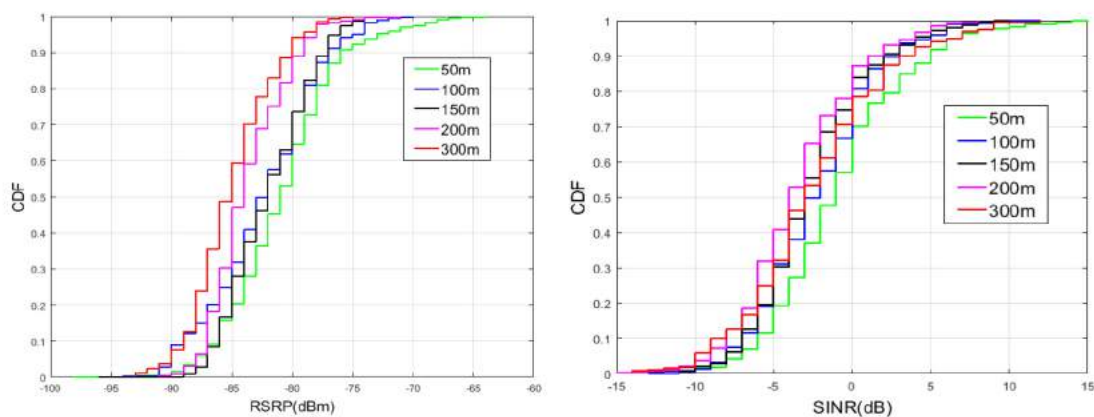


图3-1 移动蜂窝网低空覆盖测试结果

上行TCP业务速率测试结果显示在低空50-300m区间，速率均值可达5Mbps以上。5Mbps以上速率占比超过70%，速率低于1Mbps占比仅在1%左右。可以满足无人机安全飞行的状态信息采集通信需求（30~50kbps）。在非失联区域，因无人

机安全飞行对下行速率要求较低（5~10kbps），在有通信连接的区域，也基本可以满足安全通信要求，但在干扰过大的失联区域，下行方向的管理指令传输困难，如长期处于该区域，可触发无人机降落或返航。

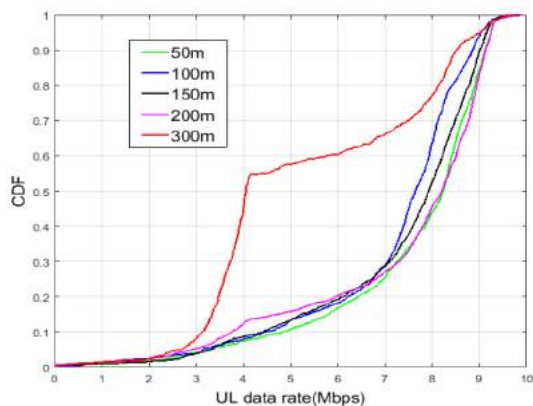


图3-2 移动蜂窝网低空覆盖测试结果

表3-2 移动蜂窝网低空覆盖测试结果

高度	最大速率	平均速率
50m	9.2Mbps	7.5Mbps
100m	9.6Mbps	7.1Mbps
150m	9.5Mbps	7.3Mbps
200m	9.2Mbps	7.3Mbps
300m	9.1Mbps	5.3Mbps

Ping包(32字节)和TCP小包(100字节)时延测试结果显示时延范围基本在200-300ms之间,300米高度时延会达到500-600ms。

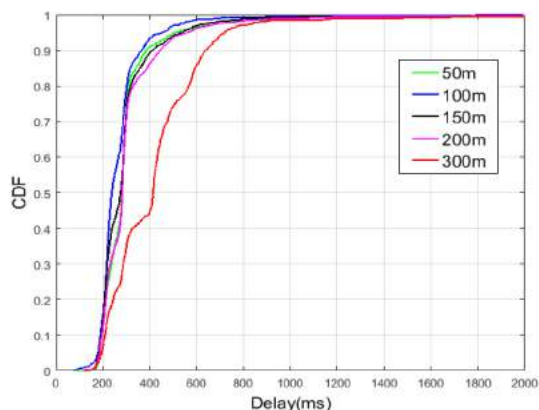


图3-3 移动蜂窝网低空覆盖测试结果

测试结果表明当前蜂窝网络在300米以下,信号覆盖良好,上行数据传输均值达到5Mbps,时延300ms以下,LTE蜂窝网络已可以支持联网无人机低速率的多种应用的通信需求。

300米以内空域地面网络信号覆盖强度较高,但当前的移动通信网络主要针对地面终端设计,当无人机飞行高度超过基站天线的主覆盖方向后,下行方向干扰较大,部分区域可能出现短

时断线问题,同时下行干扰对无人机监管业务的速率和时延也有影响,需要在这些区域针对低空覆盖特征进一步优化网络,包括联合处理,邻区关系优化等。

3.3 现网低空覆盖面临的挑战

由于多数无人机的飞行高度在天线之上,无人机终端(User Equipment,以下简称UE)的无线通信环境与地面UE存在差异,进而带来干扰增多、移动性管理复杂化、身份验证识别难等技术问题。移动蜂窝网络除了需要满足无人机通信的数据类型和场景需求之外,还需解决无线通信环境差异带来的新问题。

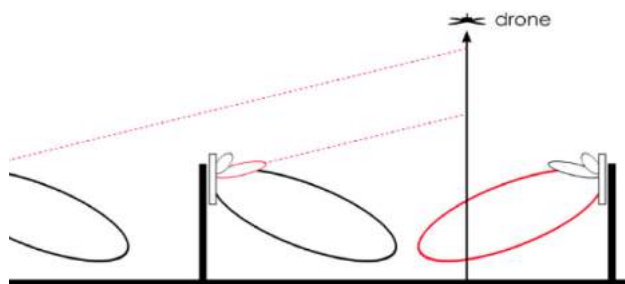


图3-4 移动蜂窝网低空覆盖测试结果

比如，当无人机UE飞行高度低于或接近天线高度时，其无线传播特性类似于地面UE。而当无人机UE在高于天线高度飞行时，由于视线传播的概率增大，其上行信号会被更多站点接收到，同时本身亦会探测到来自更多站点的下行信号。

由此带来的技术问题包括但不限于：

1 下行干扰

无人机在空中收到大量邻区，邻区个数多达十几个，导致下行平均SINR下降至0db左右

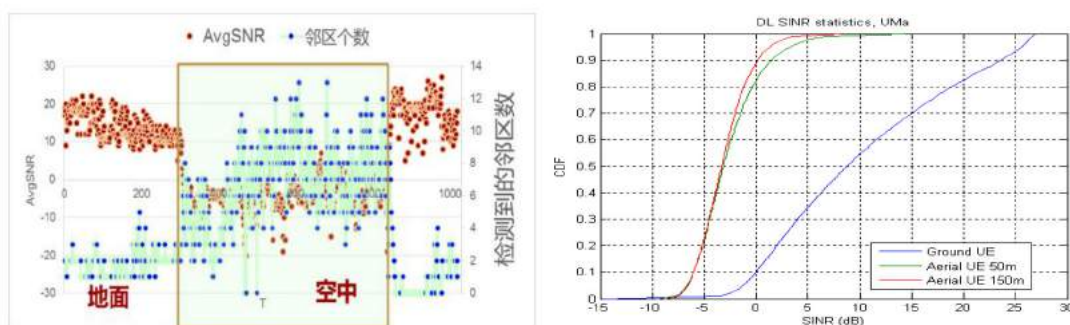


图3-5 移动蜂窝网低空覆盖测试结果

2 移动性问题,部分干扰邻区来自远距离基站站间距为500m城区场景会收到2.5km外小区

干扰,空中频繁切换,切换失败和掉线次数比地面高出2-5倍

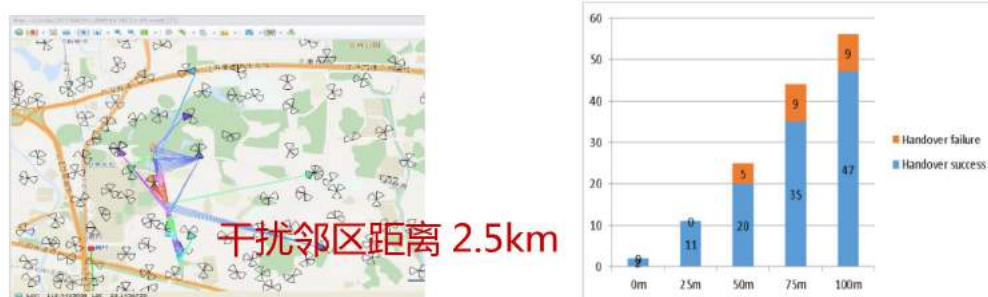


图3-6 移动蜂窝网低空覆盖测试结果

3 无人机上行到多个邻区的路损接近，对邻区干扰影响大；

无人机上行到周围多个基站都是视距传播（Line-of-Sight，以下简称LOS），无人机终端上行业务会干扰周边邻区的地面用户上行性能。传统地面UE功控，只考虑本小区路损及SINR，不考虑对邻区的干扰；

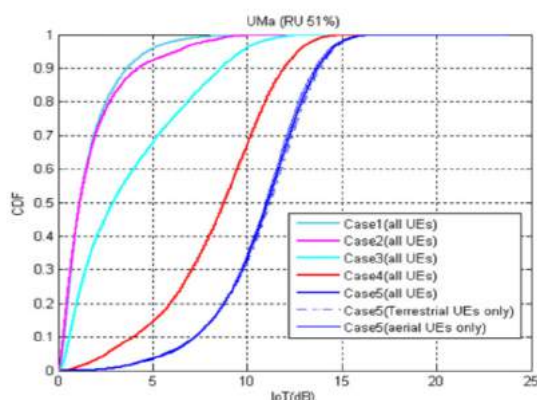


图3-7 移动蜂窝网低空覆盖测试结果

4 难以有效识别空中终端，从而对其优化和管控

3.4 4G网络对无人机应用通信需求满足度

表3-3 移动蜂窝网低空覆盖测试结果

	物流	巡检安防	测绘	农业	直播	编队	自主飞行
覆盖高度	末端满足 支线 3000m	常规满足 油气 1000m	满足	植保满足 勘测满足	满足	满足	部分满足
下行	满足当前 100kbps 需求，不满足未来自主飞行需求						
上行	当前 部分满足 2K 远控	部分满足 2K 远控 不满足未来 4K	部分满足 2K 远控 不满足 4K+ 激光	100kbps 2K 7.5Mbps	不满足	满足	不满足
时延	满足					部分满足	不满足
可靠性						有挑战	有挑战
连接数						有挑战	
定位	高			高		高	高

通过上述分析得出：4G网络满足现有的部分低速率、对时延不敏感的无人机应用，对于高速率、超低时延无人机应用存在挑战。

5G网络能力

4.1 综述

5G 网络通过提供人人通信、人机通信和机器之间通信的多种方式，支持移动因特网和物联网的多种应用场景。同时，5G 网络通过提供多样化业务需求和业务特征的能力，适应不同应用场景的灵活性和多样化的业务需求，如超宽带、超低时延、海量连接、超高可靠性等。以业务为中心，高效灵活地提供最佳用户体验，是5G 网络系统设计的指导目标。

5G超高速、超低时延和超高可靠性的显著特

征，将不仅提升人类通信体验，还将拓展智能制造、车联网、智能物流、无线家庭宽带接入等行业应用，承担着推进全社会数字化进程的使命。

5G的空中接口和系统架构以革命性的创新设计支持超大带宽、多连接以及低时延高可靠性等极致体验。

前几代无线网络的特点是有固定的接入参数和频谱资源块，以低频为主；5G网络允许使用全频谱（低频+高频）和创新的新空口和架构来提供最佳通信服务。

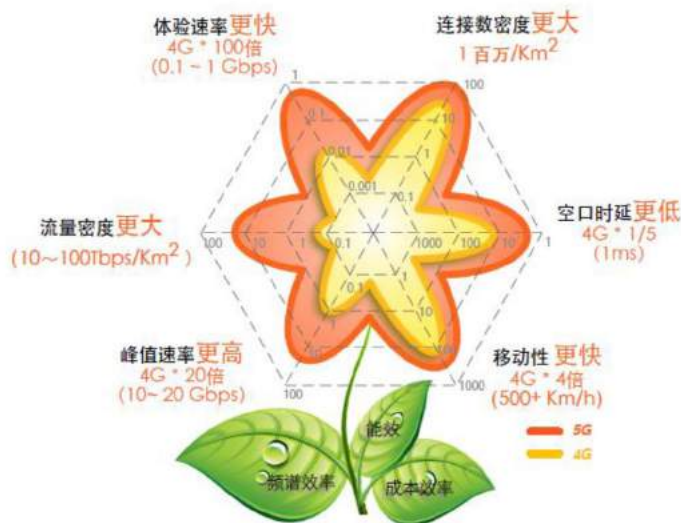


图4-1 5G网络能力图

5G在容量方面，5G通信技术将比4G实现单位面积移动数据流量增长1000倍；在传输速率方面，单用户典型数据速率提升10到100倍，峰值传输速率可达10Gbps（相当于4G网络速率的100倍）；端到端时延缩短5倍；在可接入性方面：可联网设备的数量增加10到100倍；在可靠性和能耗方面：每比特能源消耗应降至千分之一，低

功率电池续航时间增加10倍。

凭借 5G 无限的发展潜力，蜂窝技术为无人机带来了全新级别的高可靠性、强大的安全性、无处不在的覆盖和无缝的移动性。

4.2 5G网联无人机网络整体解决方案

5G网联无人机的无人机终端和地面控制终端均通过5G网络进行数据传输和

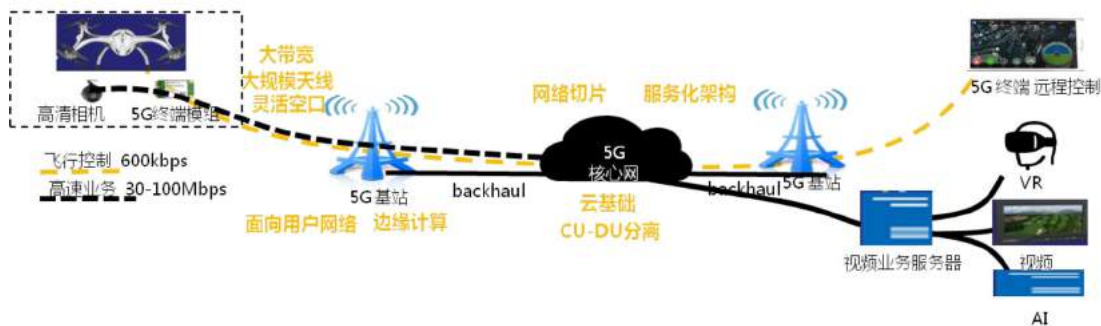


图4-2 5G网联无人机整体解决方案

控制指令传输，并通过业务服务器加载各类场景的应用。其中5G网络提供了从无线网到核心网的整体网络解决方案，以适配第二章中各种复杂应用场景的网络实现。

5G新空口技术包括采用大规模多天线,新频谱(引入C波段,毫米波频段),新编码(Polar码, LDPC码),新的帧结构(新子帧结构, 自包含子帧), 灵活Numerology,新的物理信号设计。5G 采用大规模多天线技术,采用更窄的波束精确对准服务的无

人机 and 地面终端,增强有用信号,并减少小区内和小区间干扰,减少无人机低空上下行干扰,提升对低空的覆盖能力。5G以用户级下行导频替代小区级下行导频,降低了无人机在低负载网络下受到的下行干扰。5G灵活Numerology在时域、频域、码域、空域、功率域等采用灵活的资源调度来减少无人机的上下行干扰。

5G空口云化包括上下行解耦技术以及以用户为中心网络技术,上下行解耦打破上下行绑定

与同一频段的传统限制，以5G高频段与4G中低频共站部署增强小区覆盖，5G下行传输利用高频段，上行传输与4G的低频段进行频谱共享，根据4G空闲程度灵活分配给5G上行使用，实现5G覆盖增强。以用户为中心网络，突破用户与小区绑定的传统架构，联合优选多个物理小区链路随时随地适配用户体验，有效提升有用信号、降低信号衰落和干扰。同时因上层逻辑小区唯一识别，可成功减少小区间切换，提升无人机在空中的移动性和覆盖。

以业务为中心的云化架构，基于软件定义网络(Software Defined Network, 以下简称SDN)和网络功能虚拟化(Network Function Virtualization, 以下简称NFV)的网络将实现更灵活的开放和应用创新，为了满足多种行业多样化的业务需求，按需实现网络切片资源分配，为不同切片提供相应的QoS保障。网络切片使得一张5G网络上同时承载无人机大带宽、低时延、高可靠的多种不同应用。

4.3 5G网络具备的能力

4.3.1 覆盖能力

覆盖的问题分为两类，第一类是有用信号差，如弱覆盖和无覆盖的；第二类是有用信号强度不差，但是干扰信号强度大，从而SINR低。在目前低空无人机（300m以内）应用的大部分场景中，主要是第二类覆盖问题，即主要是干扰导致的覆盖问题。在一些地面站稀少和网络参数配置

等原因导致的第一类覆盖问题，主要存在于飞行在较高航线或偏僻位置的无人机。针对第一类由于信号弱导致的覆盖问题，可以采用充分利用基站侧多天线的垂直波束能力来增强覆盖，考虑无人机的不同应用场景，采用高效的波束扫描和跟踪。也可以采用专用对空天面设计等实现无缝覆盖。针对第二类由于干扰强导致的覆盖问题，可以通过降低下行干扰的方式来提高覆盖。可以采用如下的方式：

- 采用大规模天线大规模天线形成较窄波束对准服务用户，减少小区内和小区间干扰；
- 采用协作传输的方式，即多个小区间协调在时、频、空、码、功率域的资源来减少干扰；
- 采用不同带宽部分(Bandwidth Part,简称BWP)分频接入,使得地面和空域采用不同的BWP资源,减少空地间的干扰；

4.3.2 用户下行容量

低空无人机的下行业务速率要求较低，一般不存在容量问题。如果因为未来无人机的密度增大，同时地面终端业务负载也比较大，此时会出现小区下行容量受限问题。

5G基站具有大规模天线大规模天线能力，大规模天线大规模天线增加水平和垂直面发射通道数，使得水平垂直面的波束更加准确的指向用户，更窄的波束有利于控制干扰，提升用户的信噪比，同时可以实现更多用户的空分复用提高下行容量。

5G拥有更大带宽，C波段每载波100M带宽，毫米波每载波400MHz带宽，单载波带宽相比4G频谱有5-20倍提升。

5G不再使用小区参考信号（Cell Reference Signal，以下简称CRS），减少了开销，避免了小区间CRS干扰，提升了频谱效率。5G新的下行高阶调制1024QAM提升了高信噪比条件下的下行速率。

4.3.3 用户上行容量

无人机具有明显的上下行业务不对称性。无人机应用的上行要求几到一百Mbps的速率。且随着未来无人机高清视频回传要求的进一步提升，蜂窝网络支持无人机上行容量面临较大挑战，同时还需要考虑无人机上行带来的干扰问题。

与下行容量提升一样，5G通过大带宽，大规模天线大规模天线精准波束、高阶调制等技术相对4G大幅提升了上行容量，以用户为中心的无边界网络架构，提供上行高速率、低时延，实现5G网络无缝的移动性和随时随地的极致体验。

4.3.4 时延

无人机的指挥与控制（Command and Control，以下简称C&C）数据业务需要较低时延，同时高清视频的回传也需要尽可能的减少传输时延。针对于无人机传输时延的降低，可以采用如下的方法：通过高效的时、频、空、码域等维度的资源调度来提高传输链路的质量，减少重

传次数；

5G新空口可以根据不同的业务时延需求调度不同子载波间隔和时隙符号数目的BWP，结合前置导频、迷你时隙、灵活帧结构、上行免调度设计实现低时延传输。

针对C&C数据业务，可以使用自包含子帧结构，传输和反馈可以在一个时隙内完成，可以大大减少反馈和重传时间。

4.3.5 可靠性

无人机的C&C数据，需要保持较高的传输可靠性，以保证飞行安全，可以通过如下方法提高其可靠性：

- 通过时、频、码、空域等多维度资源的协调调度，减少链路干扰，提高链路可靠性；
- 也可以通过分集的方式，如时域、频域重复多次传输；
- 还可以通过多小区协作，多个小区或者发射节点联合传输。
- 控制信道高聚合等级、时隙聚合、Polar码提升控制信道可靠性

4.3.6 小区连接数

随着未来5G网络的逐渐普及，地面终端和无人机终端的接入需求都将日益增大，因此需要尽可能增大小区的容量，提高小区的连接数。

- 通过多用户调度，如多用户多天线来实现资源的高效利用，提高小区连接数。充分利用无人机和地面终端的信道信息，选择那些信道相对

正交的用户进行多用户多天线。

- 还可以通过多种正交和非正交多址接入方式提高小区容量。充分利用小区中心与边缘用户信道差异性以及无人机和地面终端信道差异性，选择合适的多址方式以提高小区连接数，增大小区容量。

4.3.7 地面与低空定位

未来的5G基站具有大规模的天线阵列，尤其是在垂直方向的天线数目增多，垂直方向的定位能力大大增强。无人机与基站之间主要以LOS信道为主，可以采用单站或者多站协同的方式进行定位，因此蜂窝网络的3-D定位精度将大大提高。

4.3.8 网络干扰协调与其它

5G网络基站侧使用大规模天线大规模天线后，基站侧发射的下行波束相比LTE要窄，因此一般而言，可以提高有用信号能量，减少站间干扰。但是无人机在空中是三维方向运动，当无人机的空中密度增大时，邻区之间的干扰仍不可忽视，因此多小区之间的干扰协调，协作beamforming等仍需进一步研究以减小干扰。

由于无人机与基站之间的信道基本是LOS信道，且一般无人机终端的天线是全向天线，无人机上行对地面终端的上行链路产生较大的干扰。这个上行干扰不仅存在于数据信道，也存在于SRS导频信号。

针对无人机的下行干扰，可以采用多小区之

间的协作beamforming进行消除。无人机的位置信息和飞行路线信息也可以用来辅助进行资源调度和干扰消除。

针对无人机的上行干扰，可以采用无人机的多天线发射beamforming和功率控制来解决。

4.4 5G的关键技术

4.4.1 精准波束消除干扰

大规模天线大规模天线站点的天线数显著提升（64/128/256或更多天线），且天线与射频单元一起集成为有源天线处理单元AAU。当基站天线数量增多时，相对于用户的几百根天线就拥有了几百个信道，如果信道相互独立，同时陷入衰落的概率便大大减小，这对于通信系统而言变得简单而易于处理。通过使用大规模天线阵列对信号进行联合接收解调或发送处理，相对于传统多天线技术，大规模天线大规模天线可以大幅提升单用户链路性能和多用户空分复用能力，从而显著增强了系统链路质量和传输速率。此外，大规模天线的多天线阵列系统增加了垂直维的自由度，可灵活调整水平维和垂直维的波束形状。因此，基站的三维覆盖能力显著提升。

大规模天线的典型应用场景一般是热点地区、高楼或者需要深度覆盖的区域，对于无人机通信而言，通过大规模天线垂直面和水平面的波束赋形，可以形成精准的窄波束进行发送和接收。对于下行链路而言，精准的窄波束一方面提高了无人机的覆盖，另一方面也减少了小区内或

者小区间的干扰。如果可以进行多小区协作波束赋形,则无人机的下行链路传输质量将进一步提升,有助于其C&C数据的传输。对于上行链路而言,既可以是基站侧形成接收波束,也可以是用户侧形成发送波束,从而既可以实现无人机上行大容量高清视频的传输,也可以减少无人机对地面终端的干扰。

4.4.2 边缘计算

在目前的网络架构中,由于核心网的高位部署,传输时延比较大,不能满足超低时延业务需求;此外,业务完全在云端终结并非完全有效,尤其一些区域性业务不在本地终结,既浪费带宽,也增加时延。因此,时延指标和连接数指标决定了5G业务的终结点不可能全部都在核心网后端的云平台。

移动边缘计算正好契合该需求。一方面,移动边缘计算部署在边缘位置,边缘服务在终端设备上运行,反馈更迅速,解决了时延问题;另一方面,移动边缘计算将内容与计算能力下沉,提供智能化的流量调度,将业务本地化,内容本地缓存,让部分区域性业务不必大费周章在云端终结。

移动边缘计算部署在移动边缘,将把无线网络和互联网两者技术有效融合在一起,并在无线网络侧增加计算、存储、处理等功能,构建移动边缘云,提供信息技术服务环境和云计算能力。由于应用服务和内容部署在移动边缘,这样便可

以减少数据传输中的转发和处理时间,降低端到端时延,满足低时延要求,并降低功耗。移动边缘计算将确保未来无人机应用低时延和高可靠性

4.4.3 网络切片



图4-3 网络切片

网络切片是SDN/NFV技术应用于5G网络的关键服务。一个网络切片将构成一个端到端的逻辑网络,按切片需求方的需求灵活地提供一种或多种网络服务。5G基础设施平台支持5G网络的高性能转发要求和电信级管理要求,并以网络切片为实例实现5G移动网络定制化部署。5G网络端到端网络切片将网络资源灵活分配,网络能力按需组合,基于一个5G网络虚拟出多个具备不同特性的逻辑子网。每个端到端切片均由核心网,无线网、传输网子切片组合而成,并通过端到端切片管理系统进行统一管理。

4.4.4 安全

网络切片技术中每个切片（例如分级分类的无人机）配置不同等级的安全保护，实现切片安全即服务SaaS，使能运营商为垂直行业提供差异化、可定制的安全套餐（包括加密算法、参数、配置黑白名单、认证方法、隔离强度等等），并监测安全套餐性能，及时调整增强套餐或删除部分配套、调整资源配置，有效防止外部攻击，提升整体业务E2E安全性。

网络安全能力开放平台：5G将安全能力同网络能力一样开放给垂直行业使用，为行业应用提供统一身份管理、认证鉴权、密钥分发等能力，简化行业应用的开发和部署难度。安全能力以模块化的方式部署，以通用标准接口的方式提供。通过组合不同的安全能力，可以快速提供安全能力以满足多种业务的端到端安全需求。

4.5 5G网络对无人机应用通信需求满足度

表4-2 5G网络对无人机应用通信需求满足度

	物流	巡检安防	测绘	农业	直播	编队	自主飞行
覆盖高度	末端满足 支线 3000m	常规满足 油气 1000m	满足	植保满足 勘测满足	满足	满足	部分满足
下行	满足当前 100kbps 需求，满足未来自主飞行需求						
上行	满足当前与未来 2K, 4K, 8K 视频传输需求						
时延	满足						
可靠性	满足						
连接数	满足						
定位	高			高		高	高

相比较4G网络，5G网络能力满足了绝大部分无人机的应用场景的通信需求，无人机的联网，已经先在4G网络中实现了部分应用，用5G能够做得更好、更完善，网联无人机将驱动多类

场景应用升级。为满足自主飞行、编队等未来更加自动化和智能化的无人机应用需求，将对移动通信网络的能力提出更高的要求。

网联无人机终端通信能力

未来网联无人机包括六大部分：飞控系统、通信系统、导航系统、机载计算机系统、任务载荷系统以及安全飞行管理系统。如下图所示：



图5-1 网联无人机终端通信能力

- 飞控系统，使网联无人机实现高可靠、稳定的飞行操作，并向智能化和微型化升级；
- 通信/导航系统，使得网联无人机具备低时延、大带宽超视距远程控制、路径规划、自主导航、集群飞行的能力；
- 安全飞行管理系统，具备认证、实时安全加密的能力；
- 任务载荷系统，载荷数据的实时联网传输、本地/云端系统的智能化分析能力；
- 机载计算机系统，使得网联无人机具备智能环境感知、智能识别以及能力开放的能力。

根据上述分析，未来的机载终端归纳为ABC 飞行

三类，以满足不同行业应用场景下需求：

C类：超大带宽，智能化分析

A类：保障安全飞行

三类机载终端的主要功能规格如下：

B类：无人机远程超视距实时控制+保障安全

表5-1 三类机载终端主要功能规格表

	A 类	B 类	C 类
	(安全飞行)	(超视距实时远控+安全飞行)	(超大带宽+端侧智能化)
数据业务速率	DL 100 kbps UL 100 kbps	DL 100 kbps UL 150 Mbps	DL 100 kbps UL 1000 Mbps
E2E 传输时延	<500ms	<20ms	<500ms
神经网络单元	NA	NA	YES
蜂窝辅助定位/GPS 定位	粗精度(米级)<10 米 (水平和垂直方向)	高精度(厘米级)<0.1 米 (水平和垂直方向)	粗精度(米级)<10 米 (水平和垂直方向)
其他能力	低功耗，低成本 工业级高可靠 安全加密	精准授时 安全加密 工业级高可靠 视频编码处理、视频图传增强	视频编码处理 视频图传增强 本地智能，能力开放

5G应用案例

6.1 综述

5G具备的超高带宽、低时延高可靠、广覆盖大连接特性，与网络切片、边缘计算能力结合，将进一步拓展无人机的应用场景，使能低空数字化经济。在国内，无人机结合5G的试点应用已经悄然起步。

6.2 VR直播

在过往五年中，VR业内公司一直在尝试VR直播在综艺娱乐和体育直播的落地应用可行方案，但因4G网络环境的带宽限制无法满足高清VR视频的传输，即使用于内容采集的VR摄像机

拥有超清VR视频采集和直播能力的情况下，用户终端的观看体验仍然欠佳，导致VR直播应用发展缓慢。随着5G时代的来临，这一现状将彻底改变，5G网络可实现上行单用户体验速率100Mbps以上，空口时延10ms，将使得VR直播更加流畅、更加清晰、用户体验更优。

无人机通过挂载在无人机机体上的360度全景相机进行视频拍摄，全景相机通过连入5G网络的CPE将4K全景视频通过上行链路传输到流媒体服务器中，用户再通过VR眼镜、PC从该服务器拉流观看。

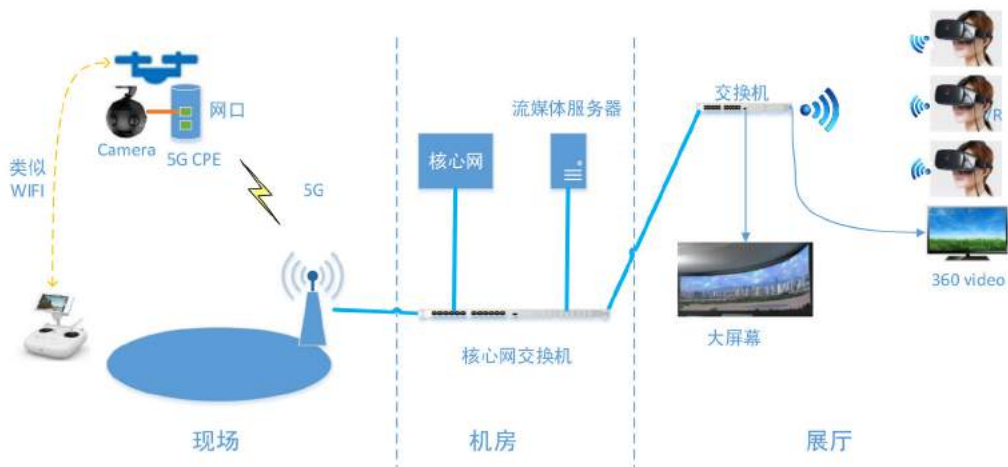


图6-1 基于5G的无人机VR直播组网图

2018年5月，搭载5G通信技术模组的无人机在上海虹口北外滩，成功实现了一场基于5G网络传输叠加无人机全景4K高清视频的现场直播。同年5月，5G之城----杭州也实现了基于5G的无人机全景直播，用户在展厅戴上VR眼镜后可以实时看到无人机在浙大玉泉校区拍摄到的4K全景视频。上海与杭州的5G直播试验都验证了5G与4G网络相比，5G图像更为清晰，画面播放也更加流畅。远端VR观看无晕眩感，能够更好地实现身临其境的效果。

6.3 城市、园区安防

在安防场景中，需要无人机实现高清视频实时传输、远程控制等功能，这些功能都需要通过网络连接来支撑。具体来说，无人机安防监控的典型网络需求包括：实时视频传输（多路）、飞

行状态监控、远程操控以及网络定位

在传输速率方面，当前安防业务通常使用1080P视频实时传输，随着安防业务对视频清晰度要求的逐渐提升，需要实现4K、8K高清视频的实时传输，对5G网络提出上行30-120Mbps的传输速率需求，时延方面，在未来远程操控时延要求100ms以下，对应的无线网络侧时延要求约为20ms，对未来网络建设能力提出更高要求。

5G网络的大带宽、低时延实时视频流回传至控制中心,融合AI深度学习能力，快速视频分析实现多手段的目标锁定及实时跟踪监控，控制中心能通过5G网络向无人机飞行控制系统发送控制指令，极大地提升传统无人机用于安防场景的效率。方案实现示意图如下：



图6-2 基于5G的无人机城市安防系统

无人机与5G结合实现多种功能，达到全方位无死角的安防布控：

一是控制中心人员通过VR眼镜的4K高清视频呈现实时观看和与地面安防设备的同步联动，优势互补，最大化安防场景能力；

二是控制中心人员通过VR眼镜、PAD等地面控制终端经由5G网络远程控制无人机机载摄像头的转向、无人机的飞行状态及路线，进一步追踪锁定目标；

三是无人机对突发安防场景问题的预判以及自动识别的目标实现进行自动跟踪。

通过智能无人机飞行平台以及5G蜂窝网络能力的有效引入，促进了传统安防产业像天地一体化协同作战的方向转型以及多场景安防能力的智

慧升级，必将作为一种新型的安防解决方案模式得到更加广泛的应用，从而促进传统安防服务商的智慧升级，从而带到整个产业的发展。

6.4 高清直播

在我国雄安新区第一栋地标性建筑“市民中心”的建设过程中，无人机的高清视频直播提供了从空中俯瞰的实时画面，为近距离观察市民中心建设情况提供了极大的便利。雄安新区的另外一个重要景观-白洋淀，无人机的高清直播可以把白洋淀的风景实时传到20km之外的市民中心临时指挥部。视频直播采用专业级航拍无人机，支持实时回传1080P30帧高清视频，通过与之相连的5G TUE，将高清视频信号通过5G网络传输，供远在市民中心的参观者观赏。

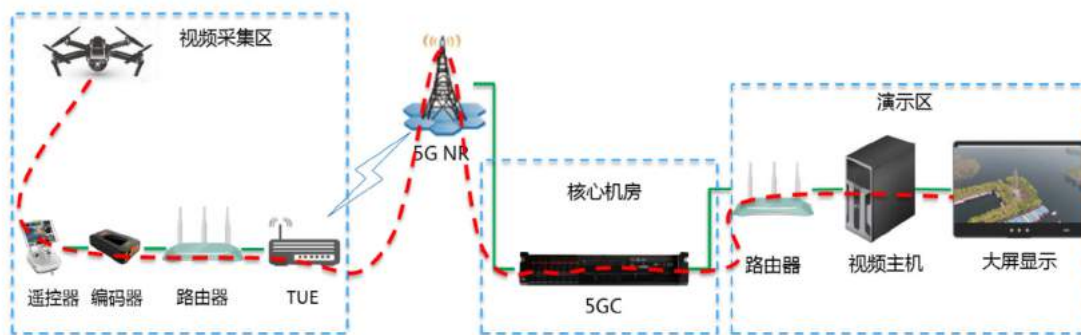


图6-3 基于5G的无人机高清直播组网图

整套系统要求空对地通信带宽不低于50Mbps，屏到屏业务延时不超过60ms，每路地对空通信带宽不低于1Mbps，控制业务延时不超

过20ms。借助于5G网络的低延时大带宽的eMBB业务，和超低延时超高可靠性的URLLC业务，可以实现更优质的用户体验。

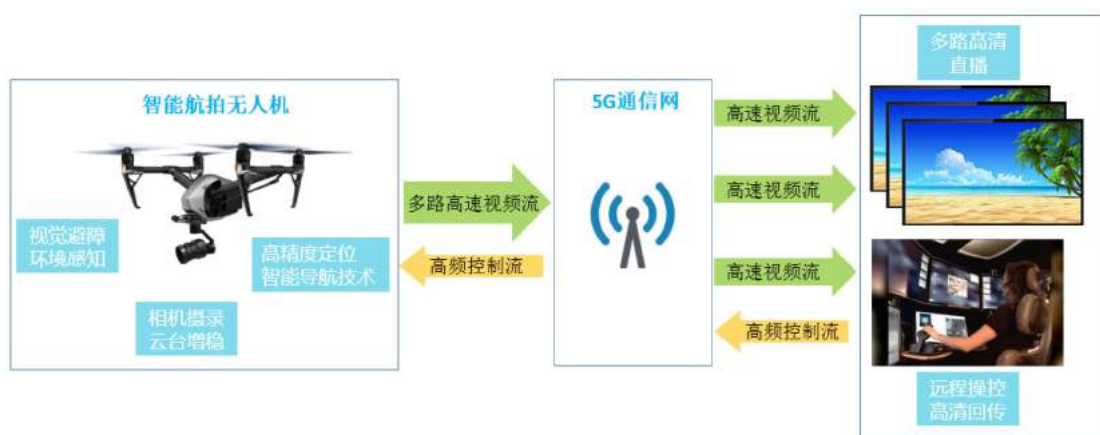


图6-4 基于5G的无人机高清直播示意图

6.5 电力巡检

电力设备中输电线路一般位于崇山峻岭、无人区居多，人工巡视检查设备缺陷的效率较低，因蛇、虫、蚁等小动物咬伤员工的事件也屡见不鲜；另外，输电铁塔、导线、绝缘子等设备位处高空，应用无人机巡查，既能避免高空爬塔作业的安全风险，亦可以360°全视角查看设备细节情况，提高巡视质量。而当前的4G网络只能支持1K的图传，对于某些细节检查，视频和图片的清晰度明显不足，而5G网络可实现上行单用户体验速率100Mbps以上，空口时延10ms，将使得实时

视频更加流畅、更加清晰、巡查效果更优。

多旋翼无人机可分别或者组合搭载高清变焦相机、红外相机、夜视相机、激光雷达等多种传感器，传感器通过连入5G网络的CPE将视频流通过上行链路传输到流媒体服务器中，用户再通过PC从该服务器拉流观看巡查，实现电力线巡查高清视频的即拍即传。

无人机4K视频实时回传，上行实时30Mbps带宽；

多机协同360°全景拍摄，数据冗余采集，

减少由于对巡检目标对角、光线不一致、图像漏拍等导致的GIS图像3D建模失败，节约成本30~90%；

地面站与管理中心进行内外场协同作业，即时发现问题并进行图像复采集，作业效率提升40~80%；

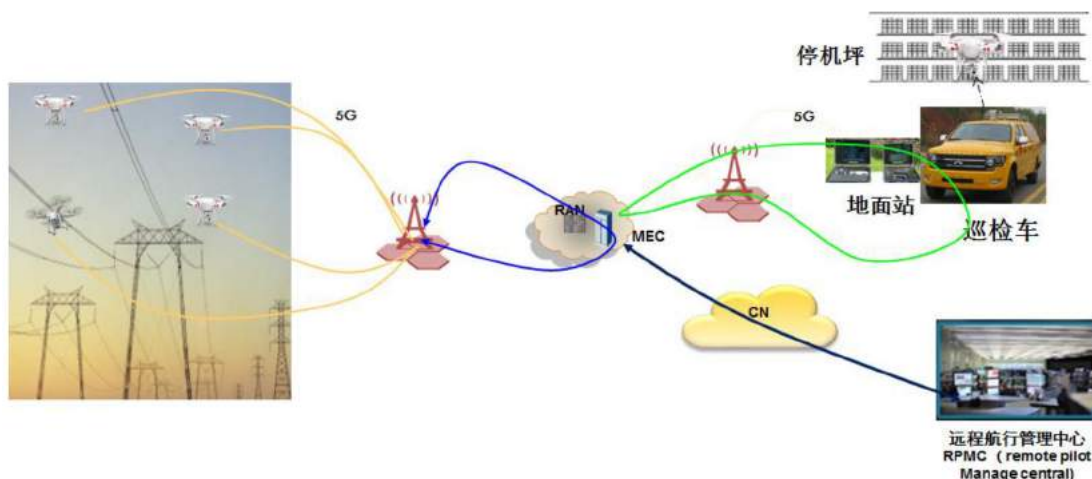


图6-5 无人机电力巡检示意图

6.6 基站巡检

在移动通信系统中，空间无线信号的发射和接受都是依靠移动基站天线来实现的。基站天线的工参主要有挂高、俯仰角、方位角和位置经纬度，这些参数对基站的电磁覆盖有决定性的影响，无线网络的运行质量也与天线参数的正确性

密切相关。因此，基站天线工参定期检测工作是移动通信系统维护工作最基本、最重要的工作之一。常规的人工攀爬基站巡检受到多方面包括天气、环境、仪表、人员操作等因素的影响，造成人工巡检效率较低，无法按时完成任务。通过5G网联无人机基站巡检方式，在降低了人工劳动强

度的同时也降低了人工登塔作业安全风险，提高了巡检效率的同时也节省了时间成本。网联无人

机采集、拍摄基站数据并回传数据至主服务器，人工对数据进行处理，并编辑生成报告。



图6-6 无人机基站巡检示意图

巡检生成的数据量大，4G或传统微波电台无法进行实时数据传输，只能后期进行数据处理。由于测量误差要求较高，故应配备高精度定位模块，需利用5G高带宽、低时延、高可靠性特点，对采集数据进行高精度定位。通过5G网络可将网联无人机连入无人机管理云平台，可对多架基站巡检无人机进行实时监控。

6.7 无人机水务

无人机在水务方面的应用越来越广泛，如水质监测、日常巡查、水文数据获取、防汛抗洪、水土保持监测等等。

网联无人机水质监测是在水务方面的创新性应用。无人机荷载多光谱相机进行水体地物光谱

采集，利用采集的多光谱影像，通过自主研发的聚类分析算法，对多光谱遥感影像数据进行针对水质特征的影像聚类分析，得出水质状况定性结

论。结合抽样水样检测数据获得定量数据，综合分析，可总体掌握监测水域的水质状况。

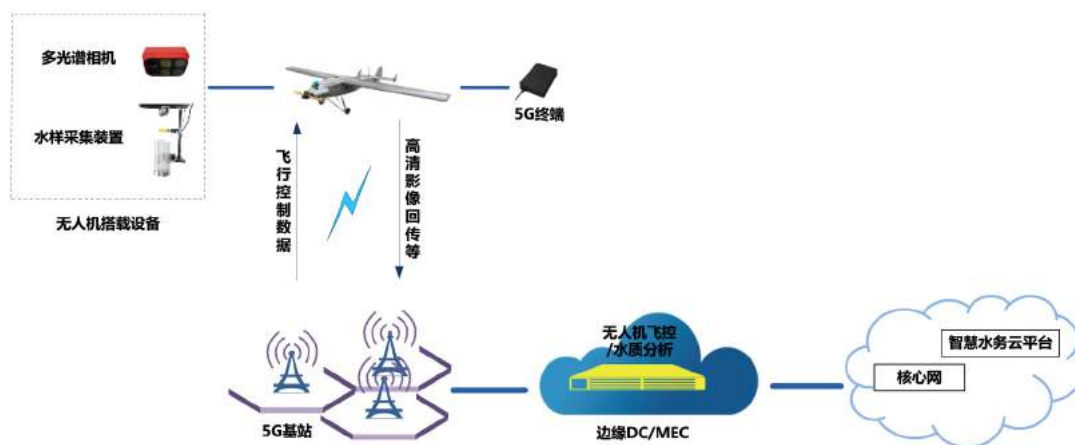


图6-7 无人机水务业务示意图

该应用要求上行速率50Mbps，在150m飞行高度上，通过使用具备垂直波束调整能力的大规模天线，有能力达到50Mbps上行速率；在300m-500m飞行高度上，要达到50Mbps上行速率，对5G网络覆盖部署提出了较高要求，可以考虑引入低频上行载波、增加上行时隙配比以及调整天线倾角等增强手段解决。

相比监测站点加人工排查的方案，利用网联

无人机获取水文水质数据，覆盖面积广、成本更低、效率更高，能实现全流域的实时动态水质监测和强大的水文水质数据获取能力，拥有广阔的市场发展前景。

6.8 无人机物流配送

近年来，国内外的主要物流企业纷纷开始布局无人机配送业务，以实现节省人力、降低成本的目的。通过5G网络，可以实现物流无人机状态

的实时监控、远程调度与控制。在无人机工作过程中，借助5G网络大带宽传输能力，实时回传机载摄像头拍摄的视频，以便地面人员了解无人机的工作状态。同时，地面人员可通过5G网络低时

延的特性，远程控制无人机的飞行路线。此外，结合人工智能技术，无人机可以根据飞行任务计划及实时感知的周边环境情况，自动规划飞行路线。

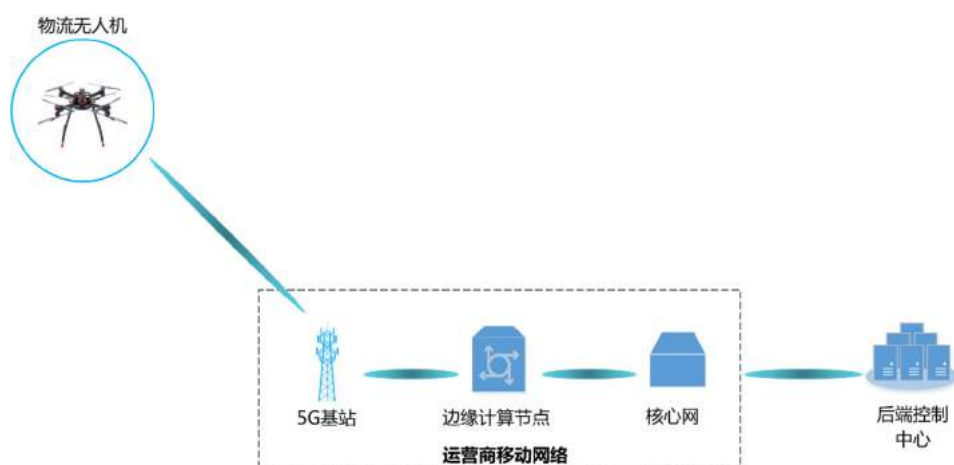


图6-8 无人机物流示意图

6.9 无人机应急通信及救援

我国幅员辽阔，多样的环境和气候特征使得各种自然灾害时有发生，因此，灾后的救援工作尤其重要。利用无人机灵活性强的特点，当灾害发生时，使用搭载通信基站的无人机，基于规划

的路线飞行，触发受灾被困人员手机接入机载基站网络，实现对被困人员通信设备的主动定位，确认被困人员的位置及身份信息。同时利用5G网络的大带宽传输能力，通过机载摄像头实时拍摄并回传现场高清视频画面，结合边缘计算能力

与AI技术，实现快速的人员识别及周边环境分析，便于救援人员针对性地开展营救工作。通过该产品与传统搜救方式的结合，可有效降低搜寻

时间，保证被困人员能够在第一时间得到有效救助，最大程度地减少人员伤亡，具有显著的社会效益。

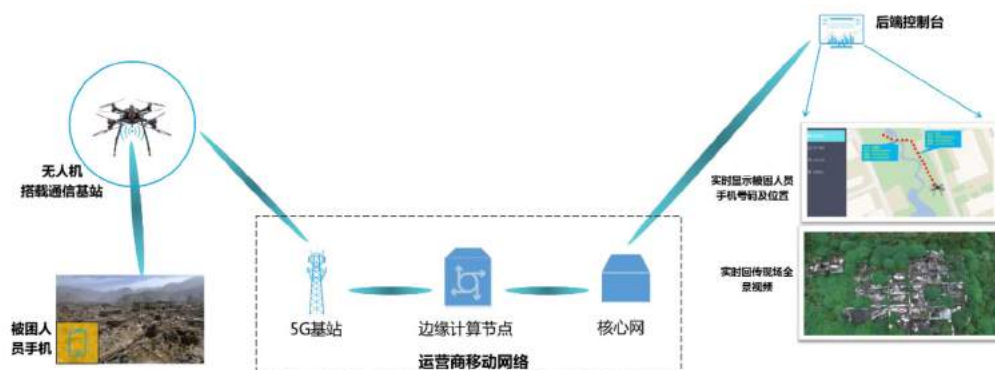


图6-9 无人机应急通信与救援示意图

6.10 野外科学观测

野外科学观测是指在野外条件下通过对生态环境、动植物的指标要素进行长期采集、数据积累和测定，确定其变化趋势，帮助科研人员进行研究，是生态学、气象学等领域的基本研究手段。野外科学观测地点普遍远离城市，通过应用

多种传感器、视频监控设备、数据采集器、通信网络等基础设施，能够实现科研数据的采集、存储、传输，形成信息化的研究环境。然而，在广域的青藏高原冰川、内蒙古草原、新疆戈壁等环境下，建立监测系统需要的成本较高。

无人机基于规划路线飞行，可实现广覆盖、

低成本的视频数据和遥感数据的采集。5G网络增加监测视频数据和遥感数据的上行传输速率，并降低空口时延，提高野外科学观测的效率。结合5G网络的大带宽和低延迟高可靠性能，实现科学观测系统原始数据、视频数据的实时观

测。如：气象领域高频的原始流数据采样频率较高（10Hz），基于LTE网络实现实时数据传输困难。另外在观测系统架构中，通过边缘计算在本地筛选并计算有效数据，剔除重复和无效数据，提高系统工作效率。

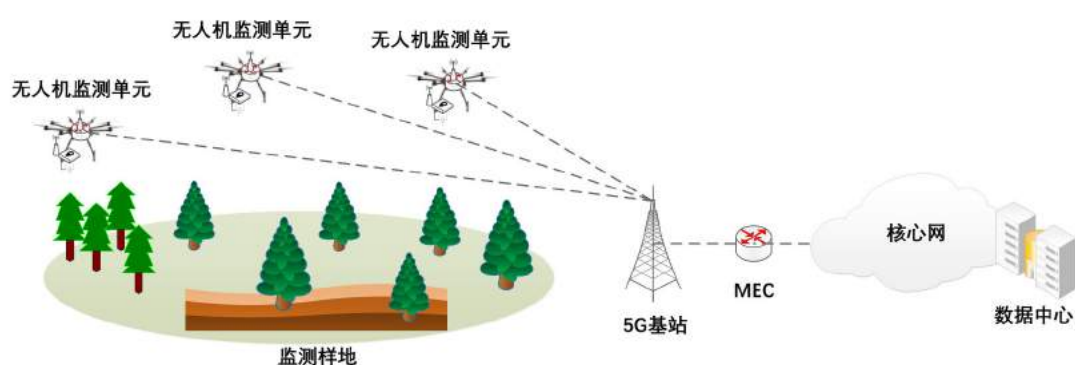


图6-10 5G无人机野外科学观测系统示意图

无人机安全飞行

7.1 法规政策

随着无人机产业与技术的迅速发展，民用无人机被大规模投入使用，不规范使用无人机的问题也越来越多，给国家安全、公共安全以及飞行安全带来了威胁，引起相关政府部门和社会各界的广泛关注。需要尽快建立完善的无人机运行管理机制和办法，确保无人机在运行阶段“看得见、管得住、查得着”。既要保障空域安全，也要尽可能多的给予无人机用户自由飞行的权益，促进无人机行业的健康发展。

政府相关管理部门也在不断探索无人机运行管理的思路 and 方案。无人机运行法规逐渐完善，逐步出台了多项指导性文件。

注册管理

2017年5月，中国民航局航空器适航审定司发布的《民用无人驾驶航空器实名制登记管理规定》，要求2017年6月1日起，最大起飞重量250g以上（含250g）的无人机实施实名登记。

运行管理

2017年10月，民航局推出《无人机围栏》和《无人机云系统接口数据规范》两篇规范文档，指导无人机系统进行有序运行管理。

2018年1月，国务院、中央军委空中交通管

制委员会办公室组织起草了《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例（征求意见稿）》，该条例是我国首次从国家战略层面对无人机管理和发展做出部署，采用分级分类的管理思路，根据运行风险大小，把民用无人机分为五类：微型、轻型、小型、中型、大型。

标准体系

国家标准化管理委员会办公室在2017年8月出台了《无人驾驶航空器系统标准体系建设指南》，制定了无人机标准建设目标和发展阶段：第一阶段（2017-2018年）：满足无人驾驶航空器系统市场需求，支撑行业监管需要，初步建立无人驾驶航空器系统标准体系，并重点制定一批市场急需、支撑监管的关键标准；第二阶段（2019-2020年）：逐步推进无人驾驶航空器系统标准制定工作，到2020年，基本建立健全无人驾驶航空器系统标准体系，制修订300项以上无人驾驶航空器系统标准，基本实现基础标准、管理标准和技术标准全覆盖，行业应用标准满足相关行业应用需求。

7.2 运行管理技术方案探索

经过产业界长期的深入分析和研究，基于运行风险大小的无人机分级分类的管理思路，结合

国内外的最新研究成果，无人机的运行管理方案主要有本地广播方案和网联管理方案。

本地广播方案是不依赖移动通信网络,基于机载技术成熟、尺寸小、功耗低、成本低的无线广播发射机（如Wi-Fi、蓝牙），周期性的广播无人机的身份识别信息、三维位置（经度、纬度和高度）、飞行状态等信息。地面上使用手机、PAD等便携式移动终端，或者车载终端、固定监测站来接收和解析此类广播信号。该方案有成本低、技术成熟度高、部署灵活等优点，但广播信号覆盖范围受限，以及部分普通用户手机需要进行软件升级。

网联管理方案是通过联网，基于现有移动通信网络具备的实名登记、可信位置校验、实时可

靠数据传输等能力，并通过一体化的管理流程与加密认证技术实现整体业务安全可靠，达到事前可预警、事中可管控、事后可追踪。

1) 通过移动通信网络可实现可靠地双向数据传输

2) 通过移动通信网络辅助定位实现位置可信

3) 通过手机实名信息，便捷、快速实现无人机实名登记

4) 完善的管理流程与加密认证技术实现整体业务安全可靠

无人机系统主要由无人机、控制站和数据链三大部分组成。根据无人机系统中连接移动通信网络模块的不同，又分为控制站地面网联管理方案和无人机空中网联管理方案。

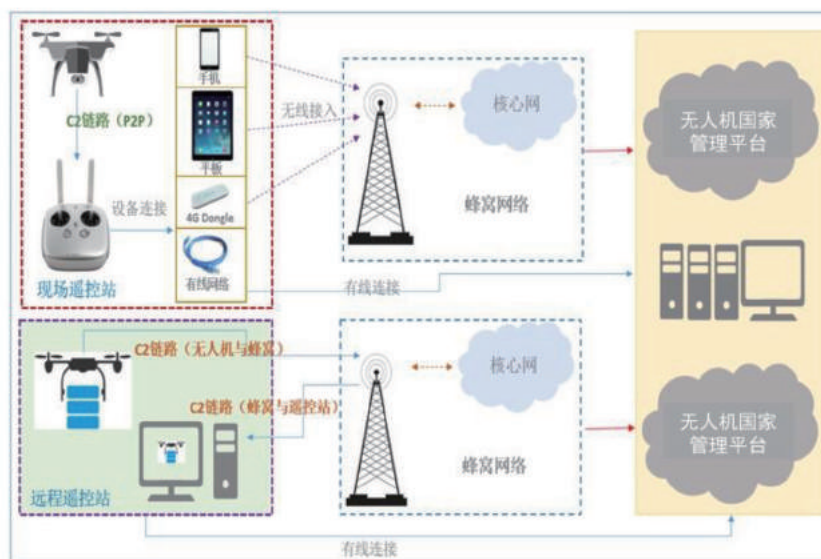


图7-1 无人机网联管理方案

7.2.1 控制站地面网联管理方案

无人机在飞行时与地面控制站通过遥控遥测数据链（C2链路）建立实时连接，地面控制站通过无线或有线接入网络的方式连接网络。无人机的ID、三维位置以及飞行状态等数据通过遥控遥测数据链（C2链路）从无人机传输至地面控制站，地面控制站增加其ID和位置信息后对接收的信息进行整合和封装，得到无人机完整系统的识别和跟踪信息，并按照数据上报格式和频率等技术要求向国家级无人机管控平台上报数据，移动

通信网络可校验地面控制站的位置。该方案具有地面网络覆盖率高、安全可靠、可选网络接入方式多样、地面控制站对网络接入模块的尺寸、面积、功耗、重量等容忍度高等优点。

7.2.2 无人机空中网联管理方案

无人机通过机载移动通信模组直接接入移动网络，向国家级无人机管控平台发布无人机的识别信息，如ID、运行三维位置、飞行状态等信息，移动通信网络可校验无人机的位置。该方案具有安全可靠、用户难以篡改等优点。

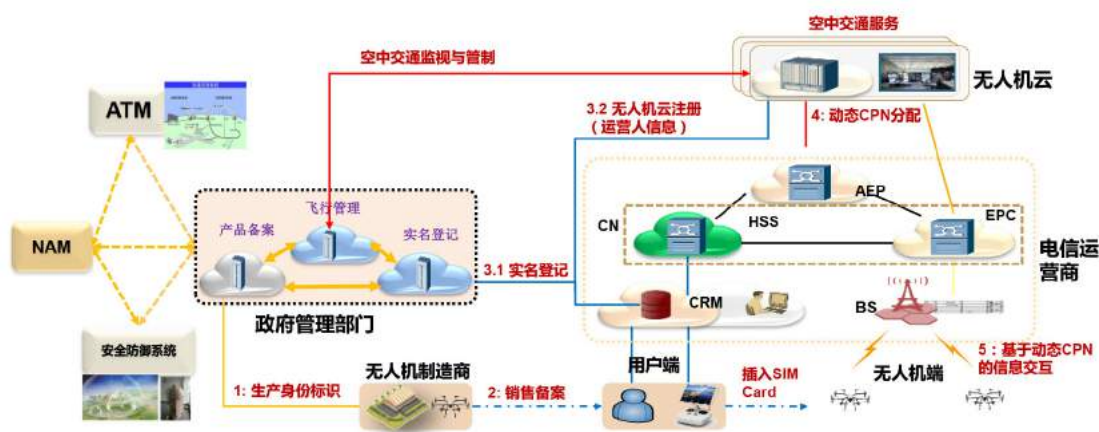


图7-2 蜂窝网联无人机交通管理架构

2018年2月中国民航局发布《低空联网无人机安全飞行测试报告》，《报告》通过实施网联无人机安全飞行管理项目技术测试，深度研究测试蜂窝网络在无人机安全飞行管理上的有效性。进一步验证了利用现有蜂窝网络进行无人机空中

网联管理的技术可行性，该成果不仅代表着中国在低空空域的前沿探索，对引导全球无人机产业快速健康发展，推动低空数字化新产业更有着重要的意义。

标准进展

8.1 3GPP标准进展

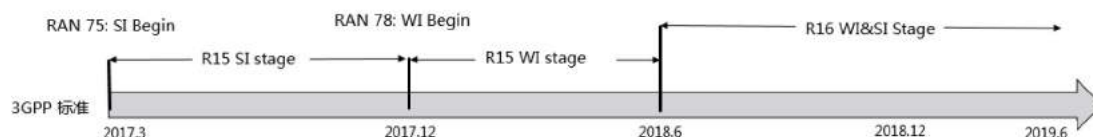


图8-1 3GPP标准进展

随着无人机这一新终端的快速发展，3GPP(3rd Generation Partnership Project, 以下简称3GPP) 标准从2017年开始研究无人机。2017年3月3GPP R15 RAN #75会议中提出了无人机业务需求定义，并通过一项新的LTE的研究项目

(Study Item, 以下简称SI)) Study on enhanced LTE Support for Aerial Vehicles (RP-170779)，项目研究增强的LTE技术以支持300m以内低空飞行的无人机的相关的业务。

表8-1 3Gpp对无人机业务的需求定义

项目	值
飞行高度	离地面 300m 以内
飞行速度	水平移动速度不超过 160km/h
数据类型	命令与控制 遥测、航线更新、实时操作、身份、飞行授权、导航数据库更新等。 应用数据： 视频、图片、传感器等
时延	命令与控制: 50ms 基站到无人机单向 应用数据: 与地面用户相似
上下行速率	命令与控制: 上下行各 60-100 kbps 应用数据: 上行不超过 50Mbps
命令与控制可靠性	丢包率不超过 10 ⁻³

在该研究项目中，全球移动通信运营商、设备商提出大量提案，进行充分的讨论，于2017年12月输出研究报告TR36.777。研究内容包括低空外场测试，信道模型，空中覆盖面临的问题以及潜在的优化方案。研究报告指出当前4G商用网络已可以为无人机终端提供服务，但可能存在上下行干扰和移动性的挑战。当空中无人机数量较多

时，问题将更加明显。报告给出了当前4G商用低空覆盖面临的挑战和潜在优化方案。

3GPP R15 RAN #78会议启动工作项目(Work Item,以下简称WI)，讨论3GPP R15标准针对无人机的解决方案的改进,于2018年9月输出标准TS36.777。目前已形成的决议如下表：

表8-2 3GPP R15标准对无人机的改进

项目	决议
测量上报	无人机的测量报告包含位置信息，利用已有终端位置上报机制。位置信息中高度是采用海平面以上高度，范围是-420米到 8880 米，精度是 1 米。垂直方向的速度也可以包含在位置信息中。 无人机的上报可以基于高度阈值和检测的小区数目。 高度触发上报时支持迟滞和触发时间设置。
移动性	支持基站发送无人机飞行路线信息请求。 飞行路线信息可由一系列的导航点组成，每个导航点是一个三维的位置点，同时也可以附加时间戳。
身份识别	无人机注册信息由 MME 通知给基站； 基于注册信息的无人机识别的相关信令和接口需要在核心网节点如 MME 和 HSS 等重新定义。
无人机终端能力	基站发送参考高度或者阈值信息给无人机，辅助无人机识别是否处于空中通信状态。 无人机通信能力作为可选的终端能力，但是已注册的无人机终端需强制进行高度上报。
上行功率控制	UE 特定的功控参数 P ₀ 的范围扩大为-16 到 15； 无人机可以通过 RRC 信令配置一个 UE 特定的路损补偿因子 alpha； UE 特定的路损补偿因子 alpha 可以覆盖小区范围的路损补偿因子 alpha。

2018年3月，3GPP启动针对R16的无人机通信的讨论，研究4G和5G网络如何更好地支持无人机终端。多家运营商和设备商愿意继续就蜂窝网络支持无人机通信这个课题进行更深入的研究。目前就无人机的R16研究内容中，比较受关注的研究点有：如何最大效率地复用地面网络为空中

无人机提供通信，是否需要为无人机通信划分单独的频段资源或者专用网络，干扰管理和移动性增强的进一步研究。

3GPP SA1目前开展了面向无人机在监视和管理领域的身份识别和追踪、无人机行业应用对于移动通信网络需求的用例及需求的研究。

表8-3 3GPP SA1对移动通信网络的需求研究

3GPP工作组	标题	时间	主要研究内容
SA1	Study on Remote Identification of Unmanned Aerial Systems(FS_ID_UAS)	2018.03-2018.09	研究基于 3GPP 签约的无人机的识别和追踪的用例和需求，以满足商业(business)、安全(security)及公共安全(public safety)方面的需求，包括： - 识别数据的内容及其与区域和国家监管数据的关系； - 识别数据的可用性； - 识别数据的使用。
	New WID on Remote Identification of Unmanned Aerial Systems(ID_UAS)	2018.9-2018.12	主要将 FS_ID_UAS 课题中识别出来需求形成正式标准规范提供给 3GPP 下游工作组。
	New Study on Enhancement for UAVs (FS_EAV)	2018.09-2019.12	主要识别更多的无人机应用的场景、需求及 KPI，包括：时延、可靠性、移动性、高速数据传输等。

8.2 ITU标准进展

伴随着无人机网联化的发展趋势，国际电信联盟（International Telecommunication Union，以下简称ITU）在2017-2020研究期内开展了多项关

于无人机的标准研究项目，研究内容涵盖无人机的网联功能架构、通信需求、身份标识、频谱等方面，如下表所示：

表8-4 ITU标准进展

ITU 工作组	标题	主要研究内容
ITU-T SG20	Functional architecture for unmanned aerial vehicles and unmanned aerial vehicle controllers using IMT-2020 networks	定义民用无人机加载 5G 能力中涉及的功能架构体系，制定统一的接入授权、认证和配对、飞行状态、业务质量监测及公共信息分发等标准
ITU-T SG20	Use cases, requirements and capabilities of unmanned aerial vehicles for Internet of Things	无人机作为通信平台（基站、中继等），服务于物联网的用例、需求和能力
ITU-T SG20	Framework of identification and connectivity of Moving Devices in Smart City	智慧城市中基于低功率广域网络（LPWA）的无人机识别和连接方法
ITU-T SG16	Requirements for communication service of civilian unmanned aerial vehicle	民用无人机的通信业务需求，包括速率、时延等，以及相应的业务分类或场景
ITU-R	Characteristics of unmanned aircraft systems and spectrum requirements to support their safe operation in non-segregated airspace	支持无人机安全飞行的频谱需求

8.3 行业规范进展

8.3.1 国际进展

无人机领域国际非通信标准和规范主要涉及国际标准化组织（ISO）、国际民航组织

（ICAO）、欧洲航空安全局（EASA）以及美国联邦航空局（FAA）等相关组织。

ISO在无人机领域的标准化工作进展（目前均处于在研阶段）：

表8-5 ISO关于无人机的标准进展

ISO 工作组	标题	主要研究内容
ISO/TC20/SC16	ISO/CD 21384-1 Unmanned aircraft systems -- Part 1: General specification	无人驾驶航空器系统通用要求
ISO/TC20/SC16	ISO/CD 21384-2 Unmanned aircraft systems -- Part 2: Product systems	无人驾驶航空器系统-产品系统
ISO/TC20/SC16	ISO/CD 21384-3 Unmanned aircraft systems -- Part 3: Operational procedures	无人驾驶航空器系统-作业程序
ISO/TC20/SC16	ISO/CD 21895 Categorization and classification of civil unmanned aircraft systems	民用无人驾驶航空器系统分级分类
ISO/IEC JTC1 SC17	ISO/IEC-22460 Drone Licenses and Drone Identity Module	无人机执照和身份识别模组

ICAO的工作重点是制定适航、运行、运营人合格审定、驾驶员执照颁发、空中交通管理、探测和避让、安保和环境方面的标准和建议。

EASA的工作重点是无人机适航性管理政策以及无人机监管等方面，比如要求能对无人机进

行远程识别以及当无人机进入禁地时予以识别等方面。

FAA聚焦小型无人机的管理规则，规定无人机飞行全程都必须在驾驶员的视线内、无人机可进行使用的时间、飞行最大高度和速度以及对无

人机驾驶员的监管措施等。

8.3.2 国内进展

我国无人驾驶航空器系统标准体系包括“分类分级”、“身份识别”等基础类标准，“注册管理”、“制造管理”、“运行管理”等管理类标准，“系统级”、“部件级”等技术类标准以及在不同行业的应用类标准，其中，基础类标准以国家标准为主，管理类标准、技术类标准和行业应用类标准以行业标准为主。

中国民航局发布了行业标准《MH/T 2008-2017 无人机围栏》、《MH/T 2009-2017 无人机云系统接口数据规范》等。

另外，制定民航领域团体标准的组织有无人机系统标准化协会理事会及技术委员会、中国（深圳）无人机产业联盟等团体。其中，无人机系统标准化协会理事会及技术委员会发布了《无人机系统术语》和《民用无人机系统分类及分级》，中国（深圳）无人机产业联盟发布了团体标准《中国无人机通用技术标准》、

《固定翼无人机系统通用技术标准》、《多轴无人机系统通用技术标准》、《单旋翼直升无

人机系统通用技术标准》、《多轴农用植保无人机系统通用标准》、《电池动力单轴农用植保无人机系统通用标准》、《公共安全无人机系统通用标准》、《消防用多旋翼无人机系统技术要求》等团体标准。

趋势，总结和展望

当前，无人机与无线通信跨界融合的需求与趋势已经有目共睹，无人机5G应用的产业生态从无人机应用场景和通信需求、终端通信能力、无线技术等方面也初步成熟。未来，我们希望通过无人机5G应用领域的持续创新，促进无人机在物流、巡检、安防、救援、测绘、农业植保、直播、编队飞行甚至自主飞行等场景的网联化智能化建设，提升航拍、送货、勘探等各种各样的个人及行业业务体验，构成一个全新的、丰富多彩的“网联天空”。为了实现这个目标，计划分三个阶段推进。

第一阶段，网联化：基于一张承载无人机和MBB用户的全联接网络，推进无人机网络连入蜂窝网络实现无人机安全飞行，激发更多网联无人机应用，研究在娱乐、农业植保、编队飞行等场

景下，降低成本提升效率和应用体验。

第二阶段，实时化：开展区域无人机全联接业务研究。结合5G无线网络接入的增强移动宽带以及低时延高可靠等技术，进行区域无人机全联接类场景的研究。这将推进超视距范围无人机互联互通、高清视频传输、高可靠低时延数据回传等前沿技术的落地，有效解决巡检、安防、测绘、救援等领域面临的人员伤亡、恶劣环境相关安全隐患问题。

第三阶段，智能化：结合5G与AI云端处理技术，通过蜂窝网结合AI技术实现无人机的自主作业，彻底实现7*24小时无间断作业，进一步解放人力，提高效率，并避免作业过程中的人员伤害，让人摆脱重复劳动，投身到更有技术含量的工作中。

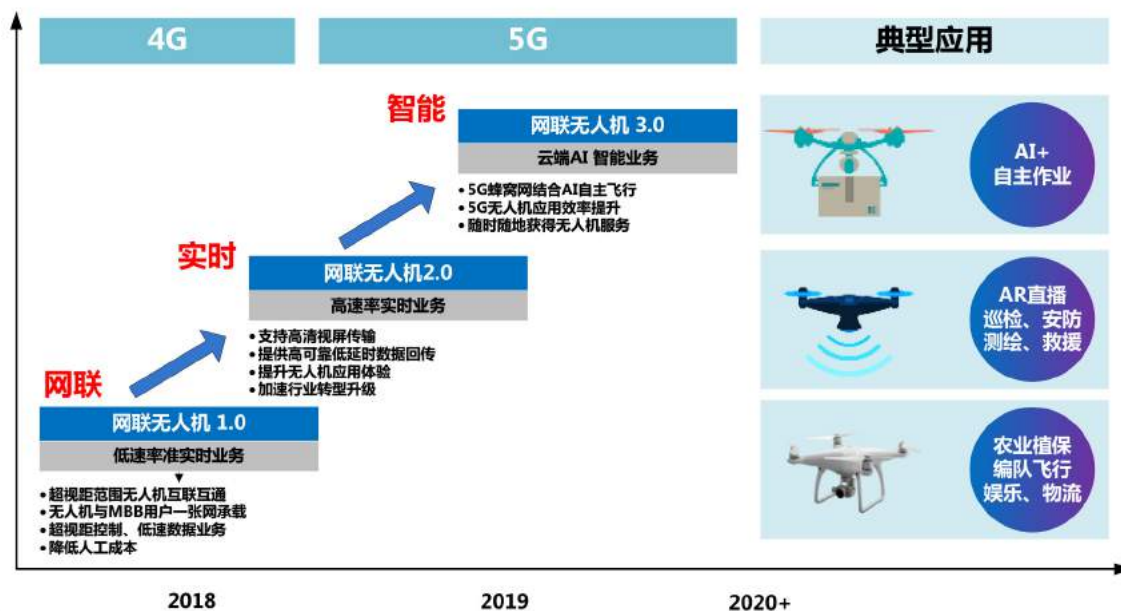


图9-1 网联天空三阶段展望

民用无人机应用前景广泛，是我国全行业数字化转型需要创新的5G技术和业务应用之一，也是中国制造2025十大领域中需要重点推动的新一代信息技术产业之一。无人机与通信的跨界融合，将极大地加速民用无人机应用之普及，网联无人机作为一种信息终端类型的拓展，创新

应用业务及应用空间都值得期待。因此，IMT-2020(5G)推进组将带领产业界合作伙伴，坚定地持续推进网联无人机应用场景的研究和商用落地，为实现网联无人机的宏伟愿景而努力。

贡献单位

CAICT 中国信通院

 **中国移动**
China Mobile


China
unicom 中国联通
创新·改变世界

 **中国电信**
CHINA TELECOM
世界触手可及


HUAWEI

 **大唐移动**
DTmobile

ZTE中兴



EWATT 易瓦特

 **中国科学院**
计算机网络信息中心
Computer Network Information Center
Chinese Academy of Sciences



联系方式
电话: +86-10-62300164
邮箱: imt2020@catc.cn

COPYRIGHT© 2018 IMT-2020 (5G) PROMOTION GROUP.
ALL RIGHTS RESERVED.