

无人机组网遥感：“高频次迅捷”到“全时全域”演进

廖小罕^{1,2,3}, 汤安琪^{1,2}, 岳焕印^{1,2,3}, 黄吴蒙⁴, 叶虎平^{1,2,3}

1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049;

3. 中国民航局低空地理信息与航路重点实验室, 北京 100101;

4. 广州中科云图智能科技有限公司, 广州 510030

摘要: 随着无人机平台技术与载荷能力不断突破, 无人机遥感得到广泛应用。无人机遥感在分辨率和重访周期层面有效补充了卫星遥感的短板, 但在短时间大范围数据覆盖能力、海量数据融合处理能力上仍然有欠缺。为此, 无人机组网遥感技术因此应运而生。从“十三五”到“十四五”阶段, 无人机与遥感科技创新互相促进、技术前沿经历了从“高频次迅捷”到“全时全域”的演进。“十三五”及以前阶段, 无人机临场组网遥感多见于应急搜救、灾害监测和毁损评估等等应用场景; 无人机区域组网遥感在电网巡检、测绘、生态与农情监测等得到了广泛应用; 该阶段基本打通了无人机遥感高频次、迅捷响应所需的全部技术环节, 但在智能化和实时性方面仍然存在缺陷。这些缺陷限制了无人机组网遥感技术在更复杂的地理环境、更需要时效性场景中发挥应用。随着技术进步和国家大力发展低空经济的政策支持, 进入“十四五”阶段, 无人机组网遥感水到渠成发展到了全时全域智能化遥感, 自主、智能化遥感成为遥感无人机发展最新研究前沿。本文在总结无人机组网遥感技术及应用演进趋势的同时, 对未来发展关键技术、政策、标准等作了发展方向分析。

关键词: 无人机, 无人机组网遥感, 全时全域, 空地协同, 低空经济

中图分类号: TP79/P2

引用格式: 廖小罕, 汤安琪, 岳焕印, 黄吴蒙, 叶虎平. 2025. 无人机组网遥感: “高频次迅捷”到“全时全域”演进. 遥感学报, 29(6): 1515–1528

Liao X H, Tang A Q, Yue H Y, Huang W M and Ye H P. 2025. Networked drone remote sensing: Evolution from “High-Frequency and Rapid Response” to “All-Time and All-Area Coverage”. National Remote Sensing Bulletin, 29(6): 1515–1528 [DOI: 10.11834/jrs.20255122]

1 引言

无人机遥感是利用无人机平台搭载遥感传感器、结合先进的导航定位、通信传输和遥感应用等技术, 面向设施巡检、安全监测、农林环保等诸多领域, 开展对地观测获取遥感信息, 并完成遥感数据处理、建模和应用分析的技术(李德仁和李明, 2014)。该技术最早起源于军方, 后随技术革新和成本下降在民用领域逐渐蓬勃发展。当代无人机遥感的突出特点包括航空器平台轻量化、可云下低空作业、满足用户时空需求、机动快速响应等, 其中又以电动垂直起降无人机应用最为普遍。在中国民航局登记的遥感无人机平台

90%以上重量都在几公斤到几十公斤, 主要作业高度在低空真高1 km以下(廖小罕和周成虎, 2016)。高智能化、低制造成本降低了用户应用的技术门槛, 催生了如今无人机遥感科技创新和产业井喷式发展现状。2024年成为低空经济元年, 无人机科技与应用发展如火如荼。

自2021年中共中央、国务院在《国家综合立体交通网规划纲要》中首次提出“低空经济”概念后, 历经数年技术革新、深化应用, 低空经济已经成为了具有新质生产力的新发展赛道, 二十届三中全会提出倡导大力发展通用航空与低空经济。无人机遥感产业属于低空经济的重要组成部分(廖小罕等, 2025)。低空经济可以细分为载人

收稿日期: 2024-04-05; 预印本: 2025-05-12

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2023YFB3905705)

第一作者简介: 廖小罕, 研究方向为无人机遥感与低空公共航路规划。E-mail: liaoxh@igsrr.ac.cn

通信作者简介: 汤安琪, 研究方向为无人机组网遥感控制算法及效率评估。E-mail: tangaq.19b@igsrr.ac.cn

载物交通运输、农林植保娱乐、无人机航拍测绘遥感3大类。其中,无人机航拍测绘遥感应用领域最广,需求最为复杂,与各产业结合最为紧密。无人机测绘遥感均使用机载传感器,广义上均可以归纳为遥感应用。

中国的遥感领域经历了长时间的发展历史,早期遥感以卫星遥感、传统航空遥感为主。2010年前后,中国资源、高分等卫星遥感进入世界第一方阵,航空遥感遍地开花(郭华东等,2013)。随后十年,无人机遥感迅猛起飞,迅速抢占世界前沿高地(晏磊等,2019)。近年来随着应用场景的逐步扩大,无人机遥感又在协同能力和实时处理技术等方面深入发展。

卫星遥感可以快速提供大范围态势信息,但是精度有所欠缺;无人机遥感在分辨率和重访周期层面有效补充了卫星数据的短板,也在时间和尺度上赋能遥感技术,使其可以解决更具挑战性的科学问题。但无人机单机遥感不足以提供大面积同时相数据。在遥感救灾(Liu等,2022)、生态监测(孙志刚和陈鹏飞,2024)和国土安全等应用中,对超短时间窗口内快速提供指定区域详细目标观测数据的需求日益增加,多无人机协同组网遥感应运而生。

无人机组网遥感方案面世后,很快因其可以兼顾大面积作业和高分辨率数据获取的优势获得广泛关注。早期研究主要以如何使尽可能多的无人机高效、安全、迅捷展开组网遥感作业为目标,包括了组网任务规划、集群通信链路、多机在网管理、多源数据融合、冗余容错等课题。随着科技的进一步发展,尤其是通信导航基础设施的完善和智能化技术发展,再加上发展低空经济政策和产业界的切实需求加持(廖小罕等,2024),无人机遥感呈现从“高频次迅捷”到“全时全域”的演进趋势。

2 无人机组网面向遥感高时间频次、高观测精度需求

无人机是时代的产物,凝聚着各个时期最前沿的科技成果。现代无人机的起源与工业化、互联网与集成电路领域的腾飞密切相关(樊邦奎和张瑞雨,2017)。当代无人机离不开卫星导航、移动通信、互联网及后台的各种云系统的支撑。看似独立运行的无人机,实际上背后有大量基础设

施的支撑,这是当代无人机和传统无人机的主要差异,也是对于无人机技术发展的要求逐年提升的根本原因。

无人机作为现代遥感的重要数据采集手段,其广泛应用给遥感领域数据获取手段带来了革命性变化。一方面,无人机在数据获取方面带来了生产力的释放(王勇等,2021)。过去几十年,遥感数据的获取,无论是通过遥感卫星还是航测飞机,都需要专门的部门和队伍相对集中地开展作业;而现在无人机的出现使得一个人就能借助无人机完成全部数据的获取。数据获取的方式从集中转向分散,用户数量迅速增多,生产力得以大量释放(Nex等,2022)。同时,无人机使得遥感作业“去专家化”,过去遥感需要专家团队和专业部门来开展相应的工作,而当代无人机的出现,让广大科研团队甚至普通民众都有机会参与到这一领域中。大众对航拍的热情也推动了遥感领域的科技创新和产业化进程,获取的海量超高分辨率的影像又降低了遥感影像判读的门槛。无人机使遥感真正迈向了“To C”,末端用户人人参与(廖小罕等,2019)。

遥感领域变革的同时,也对无人机领域的进步提出需求。随着碎片化、分布式资源的大量出现以及区域重大应用需求的增多,对无人机遥感全流程的时空效率提出了新的需求。在一些短时间需要大量数据的应用场景,如抢险救灾(蒋汪洋等,2020)、环境监测、国土安全等,数据的获取能力决定了宏观决策的精准度,这个时候往往单无人机不足以提供同时相大面积的数据支撑,需要多无人机协同组网观测提供数据(孙亚勇等,2022)。大量的实践证明,多无人机协同组网开展遥感作业,可以同时的满足高频次、高精度的要求。

无人机组网遥感指围绕遥感任务,组网遥感系统或体系在指定区域组织多遥感无人机协同开展遥感观测作业、数据传输、信息提取和支撑辅助决策。系统内的单无人机之间具有相互协同、互为补充能力的特点。因此,组网遥感系统作业能力大于各单遥感无人机作业能力之和,系统具有短时间大范围作业、冗余容错能力(Ullah等,2019)。

该方法最大特点是可同时满足高频次、高精度的要求。卫星遥感应用普遍,且有着影像覆盖范围大、拼接工作量小的优势;但存在时间窗口/

重访周期问题,且在数据精度、受天气影响程度上逊色于无人机遥感。组网遥感方案通过无人机快速出动、相互协同作业,可以弥补单一无人机覆盖范围小的能力缺陷,在观测精度和时间频次上整体优于卫星遥感,是遥感技术能力的重大进步(图1)。

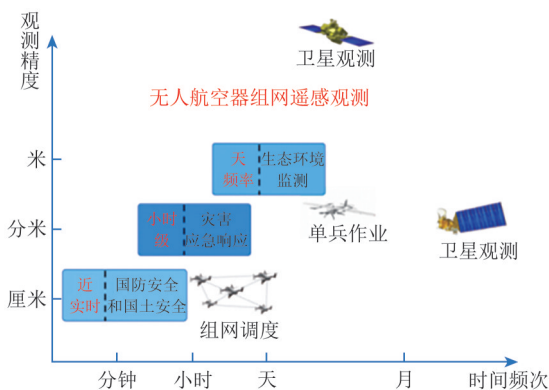


图1 无人机组网在时间频次和观测精度上提升遥感效率
Fig. 1 Networked drones enhance remote sensing efficiency in terms of temporal frequency and observation accuracy

无人机领域与遥感领域互相促进、协同变革的进程就像原子的裂变与聚变一样。当代轻小型无人机作为遥感数据获取新手段出现,从单一、集中的数据获取走向了分布式的爆炸应用,诱导释放了数据获取低成本、便利化、近实时、按需

定制等优势“的裂变能”;而生产力释放所展现出遥感无人机的应用潜力,又诱发了很多高时效、大范围的深耕领域的应用需求,通过需求牵引,推动了多机组网协同发展,在数据获取上实现快速、同步、多时相、厘米级分辨率、超大范围无缝拼接的“聚变能”。

3 从“高频次迅捷”到“全时全域”的发展

3.1 无人机组网遥感分类

无人机组网遥感基于场景规模和网络结构的差异可以划分为两大类:临场组网遥感和区域组网遥感。

临场组网遥感一般以一个临时、就近的地点作为无人机组网遥感的管控和数据处理场所;通过临场的实时指挥、管控,开展组网遥感任务下达、任务执行、事中/事后数据处理等任务。区域组网遥感和临场相比,则是在更宽泛的、尺度可以大到全国的范围内,有组织有分工地布设多个地点为遥感无人机管控及作业场所;通过设立在一个地区或者云端的总部管控大厅和数据处理中心,开展组网遥感任务下达、任务执行和数据处理,通常总部中心可通过卫星和多链路系统连接每个地点(图2)。

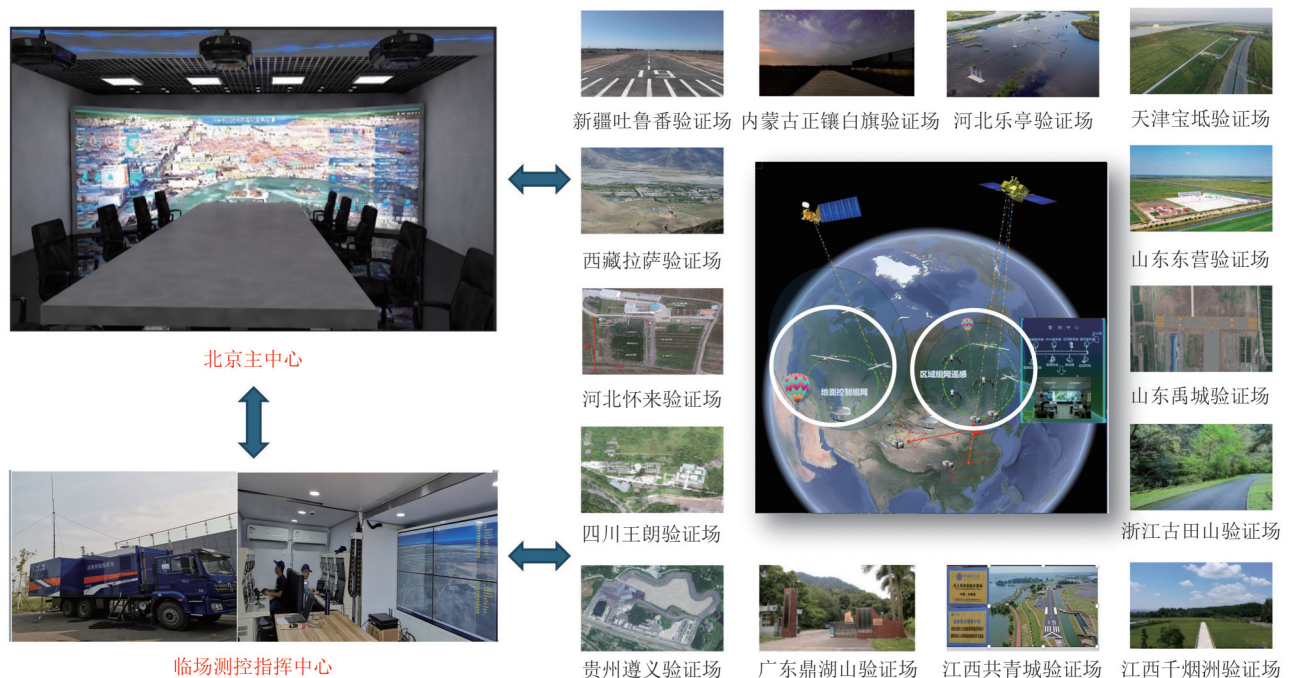


图2 “高频次迅捷项目”区域组网遥感网络示意图

Fig. 2 Structure of the regional drone network for remote sensing in the “high-frequency and rapid response networking project”

在上述两种场景结构下,具体的组网设计方案根据需求不同又有细分。硬件设计上,有飞行平台组网和多源载荷组网:飞行平台组网指固定翼无人机、多旋翼无人机、浮空器等多种飞行平台同时组网作业,基于飞行能力和滞空特性的差异实现互补;多源载荷组网指各飞行平台携带非同源的载荷如可见光、多光谱、SAR、Lidar等,在不同谱段、尺度、精度上对同一目标进行综合获取,通过融合分析提升数据产品质量。规划方法上,有错层组网和协同组网:错层组网方法将飞行平台规划于不同高度、尺度,同时满足普查和详查需求,具有事中态势评估和事后详细分析的全阶段数据获取能力;协同组网往往面向更复杂、广域的目标场景,通过多组无人机接力、跳飞或空中自组网的方式,进行多目标、长距离、长时段任务作业,构建动态区域监测网。

3.2 早期高频次迅捷组网遥感

如前所述,无人机组网遥感是时代的产物和需求的产物。其发展历程由多领域不同的需求牵引,从碎片化研究成果逐渐走向今日的能力整合。中国由于轻工业产业链完整、基础设施建设完备,在无人机科研、应用上具有独树一帜的发展路线。因此,本节以国内国外、不同组网架构为区分分别展开分析、回顾。

国际上,受限于基础设施、制造成本、法律法规,仿真规划先于真实应用研究(Kim等,2019)。尤其在国内快速发展的应急监测、城市低空、电网路网体系建设等民用常态化、全时域组网场景中,国外鲜见大规模无人机应用案例,主要是军事需求驱动着无人机组网和蜂群试验不断取得重要进展(McNabb,2024)。美国战略和预算评估中心(CSBA)提出新型作战概念(Mahnken等,2020),无人机遥感侦察网需对关键区域保持实时、持续的态势感知能力;美国国防部2023年发布“复制器计划”,推出无人机智能自组网概念(Robertson,2023);欧洲开展“压制防空无人机蜂群”项目(Sprenger,2019),目标是强化无人机蜂群作战能力。这些都是看重无人机组网带来的高效、迅捷环境感知和高频次打击能力。除军事应用场景外,国际学术界对于组网遥感的研究多聚焦于算法层面,主要集中于以提升飞行效率(Choton和Prabhakar,2023)为导向的单一或多区

域遥感任务分配(Boubin等,2022),或以提高数据精度为导向的农林业组网遥感数据融合(Ju和Son,2018)等,在理论发展和算法革新上进行探索(Luna等,2022)。

中国在国防安全领域的无人机发展同样居于国际前列(刘丹丹和姜志敏,2020);由于低空经济和智能化发展牵引,在民用领域的无人机组网遥感应用成果更是尤为突出。

在“十三五”及以前阶段,无人机组网遥感的主要研究目标是发展高频次、迅捷出动能力。这一阶段全国有多家研究机构、企业尝试对组网所需的全链路各项技术进行整合突破,包括多源无人机飞行平台、协同任务规划、组网通信链路、轻量化载荷、数据融合处理系统等方面。

此阶段的无人机组网研究主要面向大范围遥感场景,提升多机高频次迅捷升空能力。这也初步考虑了真实应用场景对遥感数据获取的时域和空间域的能力提升需要。在实际案例中,如以前述提及的组网网络架构分类进行划分,临场组网遥感更为常见,主要通过临时搭建的组网通信链路、管控地面站、数据处理车等基础设备,以保障周围数十平方公里的动态飞行。

举例说明,中国电子科技集团公司依托自研临场组网遥感架构率先在2016、2017年成功完成了67架、119架固定翼无人机集群飞行试验,固定翼无人机演示了密集弹射起飞、空中集结、多目标分组、编队合围、集群行动等动作(魏云峰和马俊,2017)。该试验并非以遥感影像获取为第一目标,但其飞行平台和通信架构方案展现了较为先进的组网在网能力。

聚焦到遥感领域,同一时期,科技部通过“十三五”国家重点研发计划项目支持了高频次迅捷无人航空器区域组网遥感技术研发项目(后简称“高频次迅捷项目”)(晏磊等,2019)。中科院地理资源所联合北京航空航天大学、北京大学、中测新图(北京)遥感技术责任有限公司、中国科学院电子学研究所、空军研究院等研究单位开展了有报道的首次以遥感作业为目标的无人机组网协同管控功能性试验。通过部署在北京的无人航空器管控系统“RUNET”,将全国多地的无人机接入,成功捕获了地理位置信息、飞行状态等基本作业数据(贾斯曼,2017)。同团队随后又开展了临场(宇辰网无人机资讯,2019)和区域(全

国)组网应用实验(IGSNRR, 2020),无人机完成了组网遥感态势显示、图像的实时回传、航空器远程卫星接管、多机自主起降、遥感数据迅捷处理等多项科目。

值得一提的是,该项目不仅完成了科研探索和应用示范,还应对了突发灾害事件,验证了在狭窄时间窗口和恶劣天气条件下无人机组网遥感方案对卫星数据的重要补充能力。在此对该典型案例进行简要分析。

中国幅员辽阔、自然灾害频发。灾害遥感数据多集中于卫星数据(Li等, 2021),但卫星数据有分辨率低、无法全时段数据覆盖的缺陷,且洪涝灾害发生时常见恶劣天气、严重云层遮挡,进一步降低可用数据质量,只能作为宏观抢险决策的参考依据。无人机组网遥感方案在时效性、精细程度、去人工化程度等多方面都显著改善了

现状。

2020年6、7月份,受持续降雨和来水影响,江西省鄱阳湖流域各水文站水位持续上涨;至7月12日0时,水位超有记录最高水位(22.53 m),湖区多处圩堤发生溃堤,部分房屋被淹没,造成了巨大的经济损失。为全力支持防汛抗洪抢险救灾工作,险情告急当夜,江西省水利厅、江西省水科院等多家单位联合正在当地进行测试试验的高频次迅捷项目团队,紧急出动10余架无人机,对康山大堤及周边重要设施开展高精度超高分辨率的应急监测。在10 h内完成康山蓄滞洪区全域400 km²应急航摄任务(IGSNRR, 2020),快速获取现场遥感数据,及时精确掌握区内农作物种植、居民地分布、交通道路、水利工程设施、已建安全区等情况,为灾情研判、蓄滞洪区运用论证提供科学支撑(图3)。

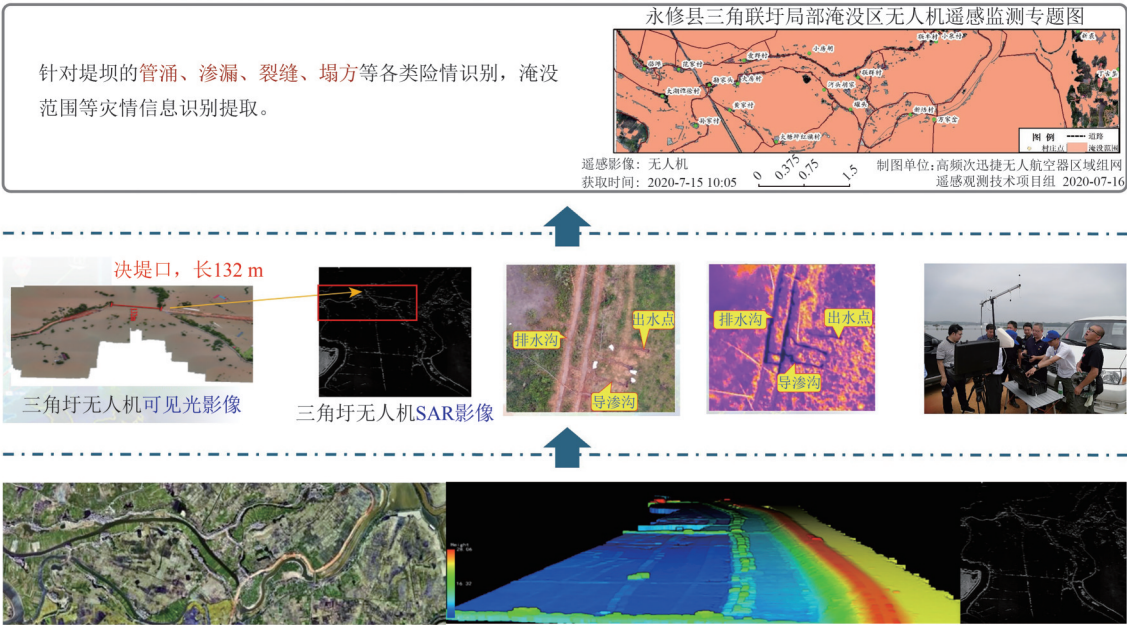


图3 无人机临场组网快速获取洪涝灾害区灾情、堤坝遥感数据案例

Fig. 3 Case study of rapid on-site drone networking for acquiring remote sensing data on flood disaster areas and dams

上述两个应用案例验证了无人机组网在时间、空间分辨率上对遥感能力的重要推动作用。尤其在临场组网遥感场景,多无人机高频次、迅捷升空获取数据,可有效补充卫星获取手段短板(表1)。

无人机临场组网遥感虽然可大幅提高数据获取效率,但是其中的全链路各项技术并未紧耦合,多无人机从起飞前准备、到升空作业是一套多流程、高成本的复杂方案,对前期基础设施和飞行

作业团队的支撑保障需求很大,往往需要几十甚至上百人团队同时保障作业。这一系统性问题在实际应用时极大限制了该方案的推广。如何低成本、高效、高场景适应性地组织多架无人机部署并展开作业成为关键问题。因此,在遥感前沿领域,把多架无人机及配套通信、规划设备等全部硬件设备集成在一个平台中,形成一个可快速出动、多机迅捷展开作业的遥感组网一体化方舱的方案应运而生。

表1 无人机组网方案与卫星遥感能力对照表
Table 1 Comparison of UAV networking solutions and satellite remote sensing capabilities

	无人机组网	卫星
是否不受重访时间窗口限制	是	否
是否可在厚云层遮挡天气获取有效数据	是	否
最高影像分辨率	厘米级	亚米级
是否可按需求定制多源载荷方案	是	否
影像后处理难度	较高；碎片化数据需要拼接融合	较低；单幅影像覆盖范围大

无人机方舱又称“无人机机巢”、“无人机机场”，其中可移动的版本也称“无人机车”、“车载无人机站”等。此类研究由单无人机版本而始，很快出于提高作业效率的需求，向多机版本发展。由于其极大程度地减少准备时间，就地形成区域组网，因此率先在野外数据采集、应急救援等领域得以应用。多家公司、研究机构在这一时期都研发了此类产品（华科尔，2020），其中最为普遍的是消防类无人机方舱（孙健，2018）：该类方舱一般可携带2—4架无人机，在不同角度对火场区域执行监测、照明、投掷灭火物等任务。在侦查领域，中国电子科技集团公司也放出过可通过地面密集发射帮助多枚折叠无人机快速发射升空的陆空协同固定翼无人机“蜂群”系统演练记录（东南军情，2020），无人机携带云台相机，通过快速弹射升空、空中组网侦查、伞降回收，提高了多机地面展开效率。聚焦遥感领域，中国科学院地理资源所牵头研发的“组网一号”一体化方舱，一舱携带4—5架尾座式固定翼无人机，可快速发射、就地自主降落，一套展开即为一个临场组网网络，多套部署可支持区域遥感能力建设，可作为组网规划、通信中继、数据处理的全链路实验母舱（图4）。该方舱在第三次新疆科学考察中，对自然保护区的野生动物种群数量进行了大范围评估（谢慧变，2022），单周即完成了传统科考方案数月作业量。可以预估，可移动部署、快速组网展开、就地数据处理的一体化组网方舱是未来临场组网遥感的终极解决方案。

在同一阶段，在区域组网遥感领域，受真实需求牵引，国家电网、南方电网等地区率先开展

无人机电力组网巡检试点（华瑞通科技，2018），至“十三五”末期，已经形成相当应用规模。福建、广东、江西等省份陆续开始探索无人机区域遥感网建设方案，为路网巡检和智慧城市监测提供常态化服务。全国雨后春笋般出现了一大批提供组网运营方案、无人机装备、通信及载荷供应、多模态数据处理的科研团队及新兴产业公司。及至2022、2023年，在国家遥感中心组织的全国无人机组网遥感技术比测上（2022），武汉大学、中山大学、北京大学等高校和中科云图、中测新图（北京）遥感技术有限责任公司、航天宏图信息技术股份有限公司等企业的一批成果和技术脱颖而出（2023）。



图4 “组网一号”无人机阵列集群快速机动遥感载发车
Fig. 4 “Networking One” drone swarm network rapid remote sensing mobile launch vehicle

区域组网遥感在这一时期主要依赖于既有基础设施开展。除电网、路网发展渐有燎原之势外，中国科学院充分利用中科院的现有科研基础设施储备，基于全国81个国家野外科学观测台站，构建了覆盖全国的三级架构空地协同多无人航空器组网遥感体系（IGSNRR，2020）。该体系由骨干网和末端的局地观测网组成，北京主中心通过云端与临场移动指挥中心逐级发布任务，再结合实际地面环境及作业情况，辐射管控全国多个野外飞行验证场。巅峰时期逾137架无人机同时在网，对7大生态类型的环境进行了遥感数据组网观测（廖小罕等，2021）。

综上，在“十三五”及以前，无人机组网遥感尚且聚焦于“高频次迅捷”能力，属于整合各领域前沿技术的阶段。按场景分类，临场组网遥感多见于应急搜救、抢险评估、临时通讯恢复等应用场景；区域组网遥感的发展则被常态化无人机遥感作业需求如电网、路桥、基础设施、生态

植被等多样化巡检任务所驱动。直至“十三五”末期，无人机组网技术体系基本打通了高时间频次、高观测精度展开作业所需的全部技术环节，但在智能化和实时性方面仍然存在缺陷。这些缺陷限制了无人机组网遥感方案在更复杂的地理环境、更即时的处理需求下开展有效作业。随着技术的进步和发展低空经济的政策加持，无人机组网遥感水到渠成地走向了全时全域智能化遥感。

3.3 全时全域智能化组网遥感

从发展趋势来看，进入“十四五”，按用户需求、自主、智能化遥感作业成为遥感无人机发展最新前沿。如图5所示，水平维度表示无人机遥感作业环境复杂程度，垂直维度表示遥感无人机作业时间能力程度。遥感无人机在观测时长上的按需响应能力（即全时作业）和环境复杂性维度上的宽兼容（即全域遥感）成为前沿研究热点。兼具二者的能力，即复杂环境下遥感无人机全时全域组网观测关键技术成为最新科技挑战。

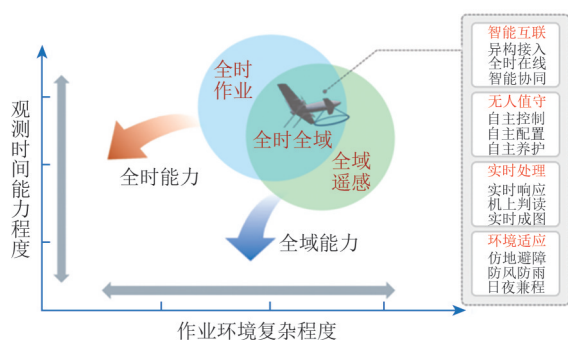


图5 “全时全域”——组网遥感作业场景在观测时间和环境复杂程度上逐步提升

Fig. 5 “All-Time, All-Area”—Networked Remote Sensing Gradually Improve in Observation Time and Environmental Complexity

全域组网智能化遥感的核心是在智能化程度和数据处理实时性上取得突破，其内核包含以下几个关键要素：

(1) 智能组网：通过多站点、多机协同任务的方式，将空地一体化组网应用于多种复杂场景中，进一步提升了系统的自动化与智能化水平。

(2) 集群组网：集成异构数据源，实现高频次的获取和处理，支持轻量化设备载荷及移动载体平台。此外，该系统能够进行局地及云端的高效数据处理，确保信息快速传递与反馈。

(3) 实时处理：在数据处理方面，系统具备机上实时处理、智能化数据提取和实时成图的能力，保证了数据的快速响应与生成，满足实时监测的需求。

显然，全时全域组网遥感有着更广泛的应用前景，如在洪涝、地质等灾害监测中，通过对全域范围内的灾情和隐患进行实时排查和风险评估，可提供迅速的防灾减灾决策支持，持续跟踪动态变化。道路、城市等日常场景的监测中，则可按需求实现全域道路状况的实时监控，提升交通管理的效率与安全性。

通过高度的智能化、实时化处理能力与广泛的应用场景，“全时全域”组网遥感时代充分释放了无人机技术在全域智能监测中的巨大潜力，推动了遥感领域的深度发展；在飞行平台、遥感载荷、数据融合、云端规划管控等多科研前沿提出新的科学问题。

全时全域智能化组网遥感能得到广泛的研究和发展，主要是由于多领域场景的迫切应用需求，下面结合部分主要案例进行分析：

(1) 电网全时无人机组网遥感巡检。电网无人机组网巡检兴起最早，在替代人工从事危险工作、提高工作效率、提高监测精度等方面取得了良好效果。在科研和产业共同推动下，这一技术迅速推广，已形成全时全域运行的体系规模雏形。电网遥感巡检典型做法是通过搭载激光雷达的无人机系统在电力巡检通道中进行点云数据采集、航线自动规划以及搭载可见光/多光谱无人机日常自动巡检等环节，可实时进行人工智能图像识别及隐患归档。此类基于无人机遥感技术的电力巡检已在绝大部分省市开始应用；江浙地区的电力线路巡检已具备极高的覆盖率，南方电网在珠三角也实现了大范围规模的应用。

当前，电力行业无人机巡检模式正逐渐从单机作业向多机、多任务协同作业演进，形成了全新的组网巡检模式。此模式基于后台管理系统，实现多无人机的协同管理，具备以下优势：

1) 集群作业：实现多无人机统一派发任务与集群调度。

2) 一键巡检：通过智能化平台实现巡检任务的快速部署。

3) 智慧化管控：后台平台进行精准分析和和管理，显著提高巡检效率和安全性。

参照北京数字绿土科技股份有限公司案例数据, 电网巡检是立体空间、多层次的组网。通过建设无人机各层次网络和组网调度平台, 实现变电设备、输电设备、配电设备巡视航线的优化组合及巡视计划的自动编制及执行, 并进行智能化数据管理。具体: 1) 基于基础点云数据可以进行精细建模, 构建高精度输电线路数字通道, 基于三维管理平台进行数字化全要素资产管理; 2) 自

动规划无人机巡检航线, 提高电力巡检效率; 3) 基于巡检点云数据自动归档记录巡检内容, 可以进行缺陷自动识别; 4) 基于防外破监测防护系统, 提供前端智能识别、实时预警提示, 后台运维监控管理。总体电网巡检平台组网遥感无人机高度自主化、智能化、实时化, 通过装载地基层、低空层、航空层激光雷达载荷, 可以高效适配多场景应用。

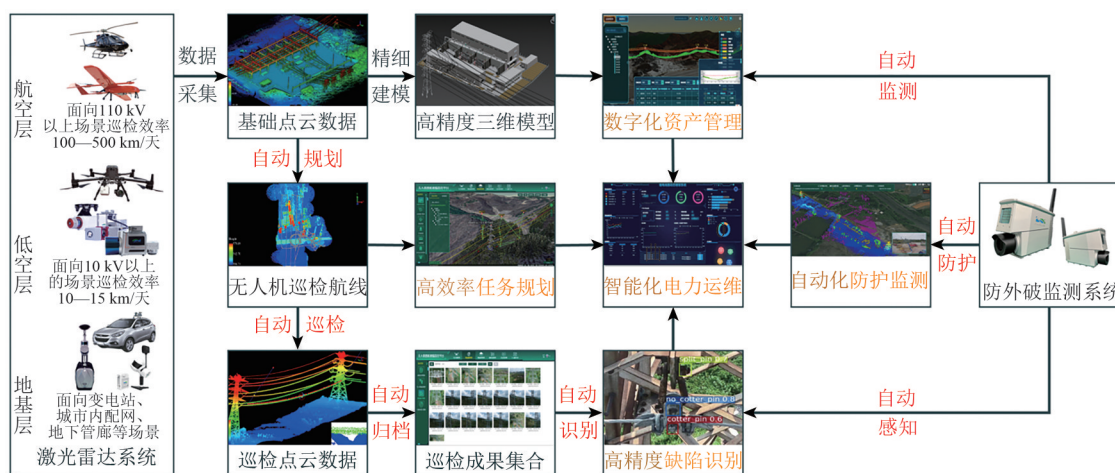


图6 电网巡检多层架构组网示意图(以北京数字绿土科技股份有限公司数据为例)

Fig. 6 Multi-Layer network architecture for drone power grid inspection (Data from Beijing Green Valley Technology Company)

电网全时无人机组网遥感巡检促进了无人机作业模式向巡检机群化、作业智能化、管控集中化转变, 全面提升设备状态感知能力、主动预测预警能力、辅助诊断决策及集约运检管控能力, 有效提高运检标准化程度和安全性, 并大幅提高效率效益。

(2) 道路交通全时组网遥感巡检。道路交通巡检场景与电网有相似之处, 有地面网络基础设施, 且有体量大、人工成本高、设施难于抵近等要素。但道路场景人流量大, 对飞行安全和识别精度要求更为严格。

此类巡检方法针对路产管理、道路养护、应急事件响应等应用场景, 基于无人机组网遥感巡检技术与图像智能识别技术的集成(王勇等, 2023), 能够对重点监测区域进行高频次巡检, 在突发事件中提供迅捷响应, 有效降低巡检成本, 提升路面、桥梁及边坡等设施的病害检测效率, 并通过逐步建设实现全时段、全区域的无人化自动巡检。目前道路交通无人机组网巡检展现了其庞大的发展空间和市场需求, 属于科研、产业界的关注热点(Li等, 2023), 进一步拓展了无人机组网遥感技术在道路交通领域的细分研究。

道路交通组网遥感巡检体系依托于路网本身设计部署, 沿公路按照飞行约束要素分布规律部署无人机机巢。以福建高速在高速罗林段部署的无人机组网遥感巡检系统为例, 执行任务时, 服务器向机巢下达开仓指令, 无人机自主出仓执行巡检任务。当无人机临近下一机巢时, 服务器根据无人机电量和余下任务情况判断是否向机巢下达开仓指令, 若需要开仓, 即下达指令, 无人机跳点回仓, 实现多跳组网飞行(图7)。

整体系统由管控中心进行组网调度, 并集成隐患排查与预警管理功能。飞行中获取的实时遥感数据进行机上预处理, 实时识别道路障碍物、裂缝、交通事故等情况, 将识别到的关键数据回传管控中心进行预警处理。

高效自主的组网巡检模式也促进了大量针对道路遥感数据自主识别研究, 实现全链路对遥感能力的提升(Wang等, 2021)。通过空间优化布局, 多台无人机能够在不同区域进行协同作业, 实现区域化无人机智能巡检模式。通过对路桥设施的定期巡检和对道路路面的日常实时监测构建全时全域遥感网, 构建常态化、智能化的道路巡检体系。

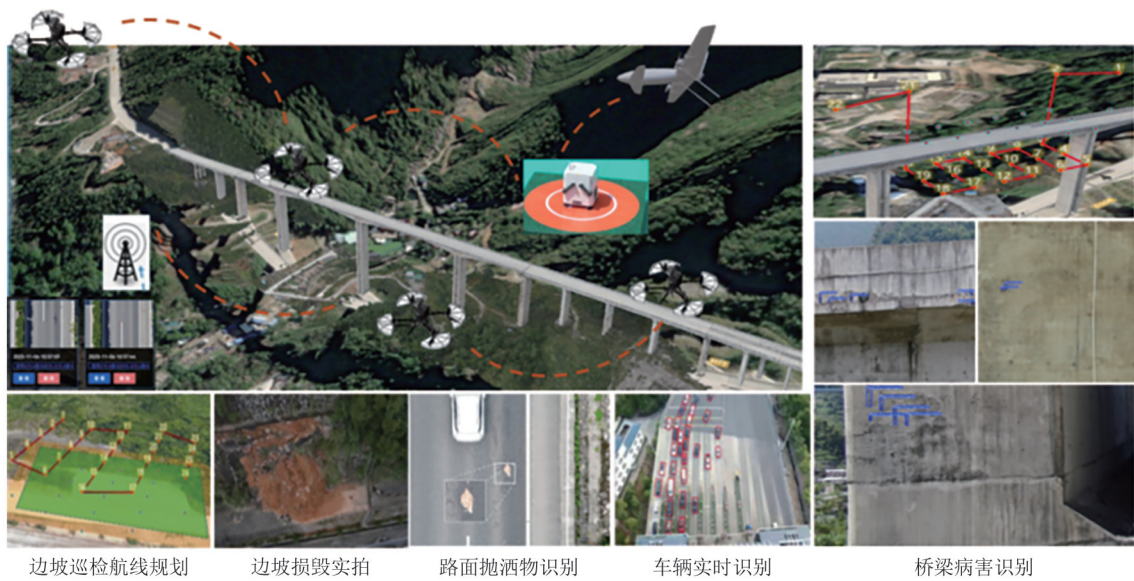


图7 道路交通巡检组网工作模式示意图(福建高速罗宁段案例)

Fig. 7 Networked operation model for road traffic inspection (Fujian Expressway Luoning Section)

(3) 城镇全域无人机遥感网。城市低空环境复杂，当前以无人机为主体的组网建设以区域航路网（徐晨晨 等，2020）为主，面向街道、建筑、生态要素等进行常态化、智能化监测（Barthélemy 等，2019）。以中科云图公司在广东佛山丹灶镇的网络建设为例（图8），其通过部署8个无人机方舱，构建丹灶镇低空无人机智能遥感网络，理论监测面积覆盖100平方公里以上。通过灵活的无人机布设与飞行团队的配合，实现对“一岛两湖十里片区”等重点区域的全面监测（荆文龙 等，2023）。

该系统能够集成多种传感设备，采集大范围区域数据，为城管、水务、环保、交通、应急、国土及公安等7个政府部门提供28项服务支持。系统架构主要包括以下几部分：

- 1) 基础层无人机组网体系：搭建低空无人机网络，实现全区域、多点覆盖。
- 2) 组网运营系统：通过无人机组网运营平台，实现全网络的协同调度与任务分配。
- 3) 综合可视化管控平台：整合多部门需求，提供可视化综合监测与管理功能。

当前系统已规划了500余条无人机巡检航线，具备重复利用和动态调整能力，并能在日常巡检中持续发现问题、形成问题清单，并及时反馈给相应主管部门，辅助决策与治理。这一无人机组网遥感监测体系已成为乡镇治理领域中智能化巡检与信息化管理的重要工具，未来将在智慧城市建设中发挥更大的作用。



图8 广东佛山丹灶镇城镇组网案例
Fig. 8 Case study of urban networking in Danzao Town, Foshan, Guangdong

综上，基于智能无人机与组网遥感技术的迅速发展，现代遥感观测已进入全时全域的新纪元。其高效、智能、实时与自主的特性显著提升了行业应用的技术水平，具有以下特点：

智能互联：实现异构设备接入、全时在线与智能协同，增强了系统的灵活性与响应能力。

无人值守：支持自主控制、配置和养护，降低了人工干预需求，提升了自动化水平。

实时处理：具备实时响应、机上判读与成图能力，确保巡检过程中的信息处理及时高效。

环境适应：具备复杂环境适应能力，包括防地避障、防风防雨及昼夜兼程操作，扩展了应用场景的广泛性。

4 结 语

无人机组网遥感技术的出现为遥感科学的发展和大众化应用注入了新的动力，使得高分辨率、高时效性、大范围影像数据的获取成为现实。全时全域智能化组网遥感目前仍在发展探索中，目前在总体规划和行业前沿都有大量推动。

在国家“十四五”规划中，国务院（2021）提出建设全国性的应急风险监测预警网的规划。应急管理部和工业和信息化部配套发布了《关于加快应急机器人发展的指导意见》（中华人民共和国应急管理部，2024），在全天候、全地域、智能化等方面增强机器设备的适用性；具体在无人机应急装备方面，提出通过无人机与组网遥感技术的融合，空基遥感网络将为应急事件的动态响应、监测和指令传达提供高效的技术支撑，实现实时应急巡检。生态环境部与中国科学院提出通过全国生态质量遥感监测网络，构建航空遥感监测网，覆盖全国各类生态系统，支持生态保护与恢复的决策制定和执行（生态环境部，2023）。

地方政府与企业推动区域无人机组网建设：如多地政府已开展全域无人机方舱的部署，通过方舱实现全域24 h高频次自主巡检和5 min快速响应，结合地面传感器，实现低空无人机遥感网与物联网的深度融合，打造空地一体化的城市治理模式。能源交通基础设施巡检（电网与道路）作为前沿领域，正在开展更智能、自主的全自动巡检任务规划，如电网正在探索输变配跨专业一体化巡检及无固定航线的电力设施自适应巡检，拓展无人机电力应用场景和服务能力。道路方面，通过在高速沿线部署分布式智能起降点，探索无人机跳飞接力巡检机制，用最少的设备实现更长的道路覆盖。

总体而言，这些规划展示了未来智能化组网遥感技术将通过多行业、多场景的深度应用，推动实现无人机组网遥感技术的全面普及和发展，

助力应急管理、生态保护、交通运输等领域的智能化升级。

在上述需求牵引下，当前技术水平仍存在局限，面对未来海量且复杂的数据需求，仍有诸多发展问题需要解决：

首先，遥感系统的组网化集成规范有待进一步完善。这涉及系统间通信协议、部件接口标准、软硬件兼容性及通用器件的规范等多方面内容。不同体系和品牌的无人机及配套设备要实现协同工作，必须解决通信协议的问题。目前，各品牌的无人机尚无法通过同一系统快速规划和更新飞行任务，常依赖临场工作人员手动操作或使用中间系统转换任务。为实现跨平台、多机高效运行，必须制定一套兼容不同系统刷新频率、数据格式及飞行参数的通信协议。同样，飞行平台、载荷、通信模块及底层电气器件的接口标准化也至关重要。整体而言，提升各部件的体系化整合能力，借助标准化接口和规范化系统实现“1+1>2”的协同效应，有助于推动产业各环节的全面合作，迎来新一轮发展高潮。

其次，遥感无人机的网联化程度尚显不足。尽管万物互联已成为技术发展的必然趋势，但无人机的云端化、网联化进程受限于系统通信协议、软硬件兼容性等因素。此外，地面通信基础设施的布局 and 规模也限制了无人机联网的效率。现有的临时通信设备或公网设施所能承载的数据带宽有限，且稳定性不足。未来需要高带宽通信技术、云端动态带宽分配能力、空地数据融合算法及机载数据预处理能力的进步，以支撑无人机的网联化发展，确保其在组网场景中的动态、高效、规模化运行。

第三，行业、区域及全国范围的组网遥感空间布局研究亟待深化。高效的无人机巡检、应急监测等场景，需依赖空间优化布局和接力优化等算法研究。例如，空间优化布局旨在平衡观测任务的分解、起降点的选择和多机协同的时效性，尤其在面对高温等环境条件下的数据真实性检验时尤为重要。空间接力优化则缓解了多无人机续航不足的问题，通过设置沿途起降点，实现无人机接力作业，提升巡检效率。多层架构的组网布局在省市级、大区域乃至全国范围内尤为必要，而“一网多用”则进一步提高了系统的效率和应用广度。

第四, 当前无人机组网遥感运行依赖的软硬件设施和人工参与仍然过高, 缺少成熟的产品化解决方案。无人机组网遥感方舱系统成为未来发展方向, 其具备防风防雨、可移动、无人值守的特点, 能够适应动态需求并实现自主组网运行。然而, 如何优化多方舱布局、提升无人机定位回收精度、远程解决延时和通信稳定性等问题, 仍需进一步研究。

最后, 组网遥感数据产品的快速生成能力仍在建设中。尽管飞行及数据获取的效率已大幅提高, 但前期设施搭建和后端数据处理耗时较长。模块化载荷设计和动态数据的实时传输处理是未来发展的重点方向。快速模块化组装、态势信息提取、高清影像拼接及2D/3D地图制作等技术的突破, 将进一步提升遥感数据产品的生成效率, 满足民用和国防领域的巨大需求。

总之, 无人机组网遥感是遥感技术和无人机技术相互需求、紧密结合的结果, 其发展历程经历了从“高频次迅捷”到“全时全域”的上升过程。不断增长的应用场景还在提出更高的技术需求, 技术的进步也为更多场景应用带来新的突破。在信息化基础设施和低空智联等新型基础设施更加完善的未来, 遥感无人机全时全域组网运行将成为新的常态; 其灵活、高效、迅捷、广泛的数据获取能力, 又将进一步促进遥感科学迈入新的发展阶段。

参考文献(References)

- Barthélemy J, Verstaevael N, Forehead H and Perez P. 2019. Edge-computing video analytics for real-time traffic monitoring in a smart city. *Sensors*, 19(9): 2048 [DOI: 10.3390/s19092048]
- Boubin J, Zhang Z C, Chumley J and Stewart C. 2022. Adaptive deployment for autonomous agricultural UAV swarms//*Proceedings of the 20th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*. Boston: ACM: 1089-1095 [DOI: 10.1145/3560905.3568414]
- Choton J C and Prabhakar P. 2023. Optimal multi-robot coverage path planning for agricultural fields using motion dynamics//2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation. London: IEEE: 11817-11823 [DOI: 10.1109/icra48891.2023.10160265]
- Fan B K and Zhang R Y. 2017. Unmanned aircraft system and artificial intelligence. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 42(11): 1523-1529 (樊邦奎, 张瑞雨. 2017. 无人机系统与人工智能. 武汉大学学报(信息科学版), 42(11): 1523-1529)
- [DOI: 10.13203/j.whugis20170177]
- Gongqing City Integration Media Center. 2023. The second UAV remote sensing comparison activity of the National Remote Sensing Center of the Ministry of Science and Technology was successfully concluded. [2024-12-30]. https://www.gongqing.gov.cn/02/01/202309/t20230925_6224196.html (共青城市融媒体中心. 2023. 科技部国家遥感中心第二届无人机遥感比测活动圆满闭幕. [2024-12-30]. https://www.gongqing.gov.cn/02/01/202309/t20230925_6224196.html)
- Guo H D, Chen F and Qiu Y B. 2013. Development of earth observation over the past half century and future direction. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, (S1): 7-16 (郭华东, 陈方, 邱玉宝. 2013. 全球空间对地观测五十年及中国的发展. 中国科学院院刊, (S1): 7-16) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2013.Z01.001]
- Huaruicom. 2018. Forecast and analysis of China's power line inspection drone industry for the next five years. [2018-10-22]. https://www.sohu.com/a/270490175_100126609 (华瑞通科技. 2018. 未来5年中国电力巡检无人机行业预测分析. [2018-10-22]. https://www.sohu.com/a/270490175_100126609)
- IGSNRR (CAS). 2020. UAV-based networked remote sensing technology supports flood relief in Poyang Lake—A research team under China's National Key R&D Program has conducted emergency monitoring of high-risk areas along the Kangshan Dike. [2025-03-15]. https://igsnr.cas.cn/news/zhxw/202011/t20201102_5732529.html (中国科学院地理科学与资源研究所. 2020. 无人机组网遥感技术助力鄱阳湖抗洪救灾——国家重点研发计划科研团队开展康山大堤险区应急遥感监测. [2025-03-15]. https://igsnr.cas.cn/news/zhxw/202011/t20201102_5732529.html)
- Jia S M. 2017. The Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, successfully conducts national network testing drill for UAV control systems. [2017-03-27]. https://m.cnr.cn/tech/20170327/t20170327_523679444.html (贾斯曼. 2017. 中科院地理资源所成功开展无人机管控系统全国入网测试演练. [2017-03-27]. https://m.cnr.cn/tech/20170327/t20170327_523679444.html)
- Jiang W Y, Liu J S and Wu W. 2020. Application of long endurance fixed wing UAV in emergency surveying and mapping support mission of Heilongjiang Province. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 43(S1): 187-189, 193 (蒋汪洋, 刘加生, 吴薇. 2020. 长航时固定翼无人机在黑龙江省应急测绘保障任务中的应用. 测绘与空间地理信息, 43(S1): 187-189, 193) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-5867.2020.z1.056]
- Jiangxi Channel. 2022. The first UAV network remote sensing comparison activity was held in Jiangxi Gongqing City. [2025-03-21]. <http://jx.people.com.cn/n2/2022/0809/c186330-40072859.html> (江西频道. 2022. 首届无人机组网遥感比测活动在江西共青城市举行. [2025-03-21]. <http://jx.people.com.cn/n2/2022/0809/c186330-40072859.html>)
- Jing W L, Zhou C H, Li Y, Yang J, Pan Y F, Huang W M, Deng Y B and Zhao X D. 2023. Development and applications of the UAV remote sensing network based on the intelligent UAV base station. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(2): 209-223 (荆文龙,

- 周成虎, 李勇, 杨骥, 潘屹峰, 黄吴蒙, 邓应彬, 赵晓丹. 2023. 基于无人机智能基站的空地协同低空无人机遥感网构建及应用. 遥感学报, 27(2): 209-223 [DOI: 10.11834/jrs.20235014]
- Ju C and Son H I. 2018. Multiple UAV systems for agricultural applications: control, implementation, and evaluation. *Electronics*, 7(9): 162 [DOI: 10.3390/electronics7090162]
- Kim J, Kim S, Ju C and Son H I. 2019. Unmanned aerial vehicles in agriculture: a review of perspective of platform, control, and applications. *IEEE Access*, 7: 105100-105115 [DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2932119]
- Li D R and Li M. 2014. Research advance and application prospect of unmanned aerial vehicle remote sensing system. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 39(5): 505-513, 540 (李德仁, 李明. 2014. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景. 武汉大学学报(信息科学版), 39(5): 505-513, 540) [DOI: 10.13203/j.whugis.20140045]
- Li J F, Wang J W and Ye H P. 2021. Rapid flood mapping based on remote sensing cloud computing and Sentinel-1. *Journal of Physics: Conference Series*, 1952(2): 022051 [DOI: 10.1088/1742-6596/1952/2/022051]
- Li Y L, Gao S, Liu X W, Zuo P L and Li H L. 2023. An efficient path planning method for the unmanned aerial vehicle in highway inspection scenarios. *Electronics*, 12(20): 4200 [DOI: 10.3390/electronics12204200]
- Liao X H, Huang Y H and Liu X. 2025. Opportunities and challenges in developing geographic information science and technology in the era of the low-altitude economy. *Journal of Geo-Information Science*, 27(1): 1-9 (廖小罕, 黄耀欢, 刘霞. 2025. 低空经济时代地理信息科技发展的机遇和挑战. 地球信息科学学报, 27(1): 1-9) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2025.250028]
- Liao X H, Wang Y F, Yang C, Li H H, Li Y C and Yue H Y. 2021. National land cover UAV networking remote sensing observation system. *IEEE Spectrum*, (11): 52-57 (廖小罕, 王岩飞, 杨超, 李航航, 李英成, 岳焕印. 2021. 全国土覆盖无人航空器组网遥感观测体系. 科技纵横, (11): 52-57) [DOI: 10.3969/j.issn.2095-4409.2021.11.018]
- Liao X H, Xiao Q and Zhang H. 2019. UAV remote sensing: popularization and expand application development trend. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 23(6): 1046-1052 (廖小罕, 肖青, 张颢. 2019. 无人机遥感: 大众化与拓展应用发展趋势. 遥感学报, 23(6): 1046-1052) [DOI: 10.11834/jrs.20199422]
- Liao X H, Zhang J and Huang Y H. 2024. Views on characters of low-altitude airspace geography and its impact on the geography development. *Acta Geographica Sinica*, 79(3): 551-564 (廖小罕, 张捷, 黄耀欢. 2024. 浅析低空地理学的特征及其对地理学的拓展. 地理学报, 79(3): 551-564) [DOI: 10.11821/dlxb202403001]
- Liao X H and Zhou C H. 2016. Development Report on Light and Small Unmanned Aerial Vehicles. Beijing: Science Press (廖小罕, 周成虎. 2016. 轻小型无人机遥感发展报告. 北京: 科学出版社)
- Liu D D and Jiang Z M. 2020. Combat applications and development trends of military UAV. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 43(6): 30-33, 38 (刘丹丹, 姜志敏. 2020. 军事无人机作战应用及发展趋势. 舰船电子对抗, 43(6): 30-33, 38) [DOI: 10.16426/j.cnki.jcdzdk.2020.06.008]
- Liu J L, Liao X H, Ye H P, Yue H Y, Wang Y, Tan X and Wang D L. 2022. UAV swarm scheduling method for remote sensing observations during emergency scenarios. *Remote Sensing*, 14(6): 1406 [DOI: 10.3390/rs14061406]
- Luna M A, Ale Isaac M S, Ragab A R, Campoy P, Flores Peña P and Molina M. 2022. Fast multi-UAV path planning for optimal area coverage in aerial sensing applications. *Sensors*, 22(6): 2297 [DOI: 10.3390/s22062297]
- Mahnken T G, Sharp T and Kim G B. 2020. Deterrence by Detection: A Key Role for Unmanned Aircraft Systems in Great Power Competition. Center for Strategic and Budgetary Assessments
- McNabb M. 2024. A2Z transforms from manufacturer to drone-network-as-a-service provider[EB/OL]. [2025-05-21]. <https://drone-life.com/2024/09/13/a2z-transforms-from-manufacturer-to-drone-network-as-a-service-provider/>
- Ministry of Ecology and Environment of PRC. 2023. Director of the Department of Ecological and Environmental Monitoring under the Ministry of Ecology and Environment of China responds to media inquiries on the National Work Plan for Ecological Quality Supervision and Monitoring (2023—2025) [EB/OL]. [2025-03-21]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/zbft/202309/t20230907_1040271.shtml (中华人民共和国生态环境部. 2023. 生态环境部生态环境监测司负责人就《全国生态质量监督监测工作方案(2023—2025年)》答记者问[EB/OL]. [2025-03-21]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/zbft/202309/t20230907_1040271.shtml)
- Ministry of Emergency Management of PRC. 2024. Guiding Opinions by the Ministry of Emergency Management and the Ministry of Industry and Information Technology on the Accelerated Development of Emergency Robots. [2025-03-21]. https://www.mem.gov.cn/gk/zfxgkpt/fdzdgknr/202401/t20240104_474181.shtml (中华人民共和国应急管理部. 2024. 应急管理部工业和信息化部关于加快应急机器人发展的指导意见. [2025-03-21]. https://www.mem.gov.cn/gk/zfxgkpt/fdzdgknr/202401/t20240104_474181.shtml)
- Nex F, Armenakis C, Cramer M, Cucci D A, Gerke M, Honkavaara E, Kukko A, Persello C and Skaloud J. 2022. UAV in the advent of the twenties: where we stand and what is next. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 184: 215-242 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2021.12.006]
- Robertson N. 2023. Replicator: an inside look at the Pentagon's ambitious drone program. [2024-10-23]. <https://www.defensenews.com/pentagon/2023/12/19/replicator-an-inside-look-at-the-pentagons-ambitious-drone-program/>
- Southeast Military Situation. 2020. China Electronics Technology Group Corporation (CETC) has successfully conducted test flights to verify its swarm drone system. [2020-10-24]. <https://news.qq.com/rain/a/20201024A06FIM00> (东南军情. 2020. 中国电科成功进行无人机“蜂群”试飞验证试验. [2020-10-24]. <https://news.qq.com/rain/a/20201024A06FIM00>)
- Sprenger S. 2019. Europeans propose siccing self-learning drone swarms on air defenses. [2024-10-23]. <https://www.defensenews.com/pentagon/2023/12/19/replicator-an-inside-look-at-the-pentagons-ambitious-drone-program/>

- com/global/europe/2019/10/22/europeans-propose-siccing-self-learning-drone-swarms-on-air-defenses/
- State Council of the PRC. 2021. Notice of the State Council on Issuing the National Emergency Response System Plan under the 14th Five-Year Plan. [2024-12-30]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2022/content_5675949.htm (国务院. 2021. 国务院关于印发“十四五”国家应急体系规划的通知. [2024-12-30]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2022/content_5675949.htm)
- Sun J. 2018. Structure design of rotor unmanned aerial vehicle. *Modern Machinery*, (4): 83-85 (孙健. 2018. 旋翼无人机方舱结构设计. *现代机械*, (4): 83-85) [DOI: 10.13667/j.cnki.52-1046/th.2018.04.019]
- Sun Y Y, Huang S F, Ma J W, Wang C L and Huang P. 2022. Research on application of UAV network remote sensing observation technology in flood disaster emergency monitoring. *China Flood and Drought Management*, 32(1): 90-95 (孙亚勇, 黄诗峰, 马建威, 王春林, 黄萍. 2022. 无人机组网遥感观测技术在洪涝灾害应急监测中的应用研究. *中国防汛抗旱*, 32(1): 90-95) [DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2021359]
- Sun Z G and Chen P F. 2024. *Ecological Environment UAV Remote Sensing Monitoring Methods and Cases*. Beijing: Science Press (孙志刚, 陈鹏飞. 2024. 生态环境无人机遥感监测方法与案例. 北京: 科学出版社)
- The Xinhua News Agency. 2021. The Central Committee of the Communist Party of China and the State Council issued the “outline of the national comprehensive three-dimensional transportation network plan”. [2021-02-24]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-02/24/content_5588654.htm (新华社. 2021. 中共中央 国务院印发《国家综合立体交通网规划纲要》. [2021-02-24]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-02/24/content_5588654.htm)
- The Xinhua News Agency. 2024. The decision of the Central Committee of the Communist Party of China on further comprehensively deepening reform and advancing Chinese-style modernization[EB/OL]. [2024-12-21]. https://www.gov.cn/zhengce/202407/content_6963770.htm (新华社. 2024. 中共中央关于进一步全面深化改革 推进中国式现代化的决定[EB/OL]. [2024-12-21]. https://www.gov.cn/zhengce/202407/content_6963770.htm)
- Ullah S, Yan L, Feng Z H, Zhao H M, Sun Y Y and Zhao H Y. 2019. Redundancy-based fault-tolerance control schemes in UAV networking for real-time remote sensing monitoring missions. *Journal of Geo-Information Science*, 21(4): 552-559 (Ullah S, 晏磊, 冯朝晖, 赵海盟, 孙逸渊, 赵红颖. 2019. 无人机组网遥感实时任务观测的冗余容错控制方案. *地球信息科学学报*, 21(4): 552-559) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2019.180389]
- Walkera. 2020. Fire trucks + drones! Walkera's system efficiently solves urban firefighting challenges. [2025-03-31]. https://www.youuvs.com/news/detail/202003/6582_2.html (华科尔. 2020. 消防车+无人机! 华科尔这系统高效解决城市灭火难题. [2025-03-31]. https://www.youuvs.com/news/detail/202003/6582_2.html)
- Wang X F, Ye H P, Liao X H and Yue H Y. 2021. An enhanced global context-aware network for road extraction from high-resolution imagery. *Remote Sensing Letters*, 12(9): 859-868 [DOI: 10.1080/2150704X.2021.1942579]
- Wang Y, Yang Y S, Wang S B, Yang Y and Zhang R. 2021. A review on the architecture construction of remote sensing data from unmanned aerial vehicle networking. *Progress in Geography*, 40(9): 1467-1479 (王勇, 杨宇森, 王士博, 杨玉, 张睿. 2021. 无人机组网遥感数据体系建设评介. *地理科学进展*, 40(9): 1467-1479) [DOI: 10.18306/dlkxjz.2021.09.003]
- Wang Y, Zeng X Q, Zeng J C, Huang K Q, Ye H P, Gan H and Chen Y K. 2023. Multilevel distillation learning road extraction model with global feature awareness and fusion. *Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics*, 35(10): 1541-1553 (王勇, 曾祥强, 曾俊铨, 黄开青, 叶虎平, 甘宏, 陈宇焜. 2023. 全局特征感知与融合的多层次蒸馏学习道路提取模型. *计算机辅助设计与图形学学报*, 35(10): 1541-1553) [DOI: 10.3724/SP.J.1089.2023.19714]
- Wei Y F and Ma J. 2017. China sets a new record again! Formation flight of 119 drones surpasses the United States. [2025-03-21]. <https://mil.huanqiu.com/article/9CaKrnK3p3c> (魏云峰, 马俊. 2017. 中国又创新记录! 119架无人机“群飞”领先美国. [2025-03-21]. <https://mil.huanqiu.com/article/9CaKrnK3p3c>)
- Xie H B. 2022. Xinjiang's comprehensive scientific expedition uses UAV networking technology for the first time. [2024-11-31]. <http://www.btxx.com.cn/web/2022/9/1/ARTI1661999210296336.html> (谢慧变. 2022. 新疆综合科考首次应用无人机组网技术[EB/OL]. [2024-11-31]. <http://www.btxx.com.cn/web/2022/9/1/ARTI1661999210296336.html>)
- Xinhua News Agency. 2024. In 2023, China's low-altitude economy will exceed 500 billion yuan. [2025-02-29]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202402/content_6934828.htm (新华社. 2024. 2023年中国低空经济规模超5000亿元[EB/OL]. [2025-02-29]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202402/content_6934828.htm)
- Xu C C, Ye H P, Yue H Y, Tan X and Liao X H. 2020. Iterative construction of UAV low-altitude air route network in an urbanized region: theoretical system and technical roadmap. *Acta Geographica Sinica*, 75(5): 917-930 (徐晨晨, 叶虎平, 岳焕印, 谭翔, 廖小罕. 2020. 城镇化区域无人机低空航路网迭代构建的理论体系与技术路径. *地理学报*, 75(5): 917-930) [DOI: 10.11821/dlxb202005003]
- Yan L, Liao X H, Zhou C H, Fan B K, Gong J Y, Cui P, Zheng Y Q and Tan X. 2019. The impact of UAV remote sensing technology on the industrial development of China: a review. *Journal of Geo-Information Science*, 21(4): 476-495 (晏磊, 廖小罕, 周成虎, 樊邦奎, 龚健雅, 崔鹏, 郑玉权, 谭翔. 2019. 中国无人机遥感技术突破与产业发展综述. *地球信息科学学报*, 21(4): 476-495) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2019.180589]
- Yucheng.com Drone Information. 2019. China has completed a regional networking remote sensing test of more than 10 unmanned aerial vehicles for the first time. [2025-03-21]. <https://www.163.com/dy/article/EKQBEN805118M99.html> (宇辰网无人机资讯. 2019. 中国首次完成十架以上无人航空器区域组网遥感试验[EB/OL]. [2025-03-21]. <https://www.163.com/dy/article/EKQBEN805118M99.html>)

Networked drone remote sensing: Evolution from “High-Frequency and Rapid Response” to “All-Time and All-Area Coverage”

LIAO Xiaohan^{1,2,3}, TANG Anqi^{1,2}, YUE Huanyin^{1,2,3}, HUANG Wumeng⁴, YE Huping^{1,2,3}

1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Civil Aviation Administration of China Key Laboratory of Low Altitude Geographic Information and Air Route, Beijing 100101, China;

4. Guangzhou iMapCloud Intelligent Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510030, China

Abstract: With continuous advancements in UAV platform technologies and payload capacities, UAV-based remote sensing has been widely adopted. It effectively compensates for the limitations of satellite remote sensing in terms of spatial resolution and revisit frequency. However, challenges remain in large-scale data coverage within short timeframes and in the fusion and processing of massive datasets. To address these issues, networked UAV remote sensing technologies have emerged. From China’s 13th Five-Year Plan to the current 14th Five-Year Plan period, innovations in UAV and remote sensing technologies have driven each other forward, with the technological frontier evolving from “High-Frequency and Rapid Response” to “All-Time and All-Area Coverage”.

During and prior to the 13th Five-Year Plan period, on-site UAV networking remote sensing was primarily used in emergency search and rescue, disaster monitoring, and damage assessment. Regional UAV networking was widely applied in power grid inspection, mapping, ecological monitoring, and crop condition assessment. At that stage, the entire technical chain necessary for high-frequency and rapid-response UAV remote sensing was largely established, though there were still limitations in terms of intelligence and real-time capabilities. These limitations restricted the deployment of UAV networked remote sensing in complex geographic environments and time-sensitive scenarios.

With ongoing technological progress and strong national policy support for developing the low-altitude economy, UAV networked remote sensing has naturally evolved in the 14th Five-Year Plan period toward all-time, all-domain, intelligent sensing. Autonomous and intelligent sensing has now become the latest research frontier in UAV-based remote sensing. This paper reviews the technological evolution and application trends of UAV networked remote sensing, and provides an analysis of key technologies, policies, and standards for its future development.

Key words: UAV, networked UAV remote sensing, all-time and all-area coverage, air-ground coordination, low-altitude economy

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFB3905705)