 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v7i7.11410

Research on Communication Network Technology for Electric Power Line Inspection Drones

Qiang Wang

Zhongtongfu Consulting & Design Research Institute Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210019, China

Abstract

Large-scale drone-based inspection imposes stringent requirements on communication networks regarding comprehensive coverage, high bandwidth, and low-latency transmission capabilities. Drawing from practical implementation experiences of autonomous drone inspections in a municipal power grid, this study identifies key performance metrics for various data streams during inspections. It compares four communication solutions—including proprietary drone protocols, 1.4 GHz dedicated wireless networks, 26 GHz 5G millimeter-wave dedicated networks, and operator-provided 5G public network VPNs—across multiple dimensions such as architecture, performance, industrial ecosystem, cost, and security, while evaluating the cost-effectiveness and technical compatibility of different self-built backhaul network configurations. The research demonstrates that the operator-provided 5G public network VPN solution currently offers superior full-area coverage, a mature industrial ecosystem, and zero initial infrastructure costs, making it the optimal short-term choice for comprehensive power grid drone inspections. Although the 26 GHz millimeter-wave dedicated network provides adequate bandwidth performance, its commercial infrastructure remains underdeveloped; thus, medium-to-long-term exploration of hybrid public-private network architectures is warranted to establish technical foundations for future iterations of low-altitude power inspection communication systems.

Keywords

power line inspection; drone; communication networking; 5G public network; wireless private network; backhaul network

电力巡线无人机通信组网技术研究

王强

中通服咨询设计研究院有限公司，中国 · 江苏 南京 210019

摘　要

无人机规模化巡检对通信网络的全域覆盖、大带宽、低时延传输能力提出严苛要求。本文依托某地市级电网无人机自主巡检落地实践，梳理巡检多类型数据流传输指标，从架构、性能、产业链、投资、安全多维度对比无人机私有协议、1.4GHz 无线专网、26GHz 5G 毫米波专网、运营商 5G 公网 VPN 四类通信方案，分析自建回传网络多套建设组合方案的造价与技术适配性。研究表明，当前阶段运营商 5G 公网 VPN 方案全域覆盖能力强、产业链成熟、零初期基建投入，是全场景电力无人机巡检最优短期方案；26GHz 毫米波专网带宽性能充足但商用配套不完善，中长期可探索公专网融合组网模式，为低空电力巡检通信体系迭代提供技术储备。

关键词

电力巡检；无人机；通信组网；5G公网；无线专网；回传网络

1 引言

电网持续扩容背景下，传统人工巡检存在作业效率低、高空风险高、偏远线路存在巡检盲区等短板。无人机凭借机动灵活、大范围快速巡检、高清图像视频采集等优势，全面覆盖输、变、配电力设备自主巡检场景，落地应用规模快速扩张。

本文研究某地市已建成二十余座无人机自动机场，规划 2026 年底新增两百余座，最终建成近三百座固定机场，实现辖区 500kV 及以下变电站、输配电线路全自动巡检全覆盖。规模化无人机作业产生多类型并行数据流，包含远程控制指令、北斗差分定位、高清图片、实时视频、机场安防监控数据，单场景实时图片回传带宽峰值达 44Mbps，定位导航数据需毫秒级时延保障，视频、业务图片传输需满足秒级时延标准。

该地市前期完成 1.4GHz 无线专网无人机通信试点，积累实测数据。本文结合现场业务需求，从频谱政策、网络性能、建设成本、安全合规等维度对比主流通信组网路线，研究配套回传网络分层架构与设备选型方案，为电力无人机通信工程选型、落地实施提供量化参考。

【作者简介】王强（1979–），男，中国新疆昌吉人，本科，高级工程师，从事移动通信网络规划研究。

2 无人机巡检业务通信需求分析

2.1 无人机作业模式

本地无人机采用全自动远程巡检模式，运维人员无需抵达现场，依托远程平台调度无人机，在机场 3–6km 空域内完成自主作业。作业覆盖城市高低空全域，业务场景包含日常常规巡检、线路故障特巡、工程验收、现场安全督查、电网应急抢修、基建场地管控、光伏台区排查，同时可拓展违建排查、消防巡查、污染源溯源等低空政务延伸业务，进一步抬高网络带宽与全域覆盖要求。

2.2 四类数据流传输特征

2.2.1 作业数据流

分为事后回传、实时回传两类模式。日常巡检图片采用事后传输，单台无人机每日采集约 2000 张图片，单张 20MB，8 小时传输带宽需求 11Mbps；故障、基建、光伏排查等场景要求图片实时回传，单日采集 2800 张，其中基建、光伏业务峰值带宽 44Mbps，为全场景带宽上限，所有业务时延统一要求秒级。

2.2.2 导航数据流

无人机实时向电力北斗平台、无人机服务平台回传位置坐标，平台下发差分定位数据支撑动态高精度定位。该数据流直接决定飞行安全与操控精度，时延指标需达到毫秒级。

2.2.3 视频数据流

巡检实时视频上传至业务平台，联动 AI 算法实现缺陷自动识别。常规巡检仅回传 1/10 视频内容，其余场景全量实时传输，单台无人机视频固定占用 5Mbps 带宽，时延为秒级。

2.2.4 监控数据流

无人机场配套安防摄像头，实时回传起降区域障碍物监控画面，单机场监控视频带宽需求 5Mbps。

2.3 全网带宽需求测算

单座无人机机场实时业务峰值带宽：实时图片 44Mbps + 巡检视频 5Mbps + 机场监控 5Mbps，叠加控制信令、导航数据 40% 带宽冗余，单机场合计带宽约 90Mbps。按照 200 余座机场规划规模，全网总带宽需求约 21150Mbps（21Gbps）。叠加低空经济拓展政务业务后，网络带宽、连续覆盖能力要求将进一步提升。

3 三类主流通信组网方案对比分析

3.1 无人机厂家私有协议组网

3.1.1 组网架构

无人机与机场通过 2.4GHz/5.8GHz 厂家私有微波链路通信，所有采集数据经机场汇聚后统一回传至电网主站，无人机不直接对接管理平台。机场至主站需新建专用巡检回传网，采用核心 - 汇聚 - 接入三层架构：核心层部署巡检中心、地调双节点，配置双光纤冗余；汇聚层覆盖 500kV、220kV 变电站，开通 10GE 链路上联核心；接入层覆盖 110kV 及以下变电站、供电所，复用现有 10G SDH 传输环网，开通 100Mbps 链路接入汇聚节点。

3.1.2 优劣特性

优势：无线终端技术成熟、产业链完善；依托电网自有光纤传输，无需支付运营商流量费，内网传输可靠性稳定。

短板：厂家私有微波传输距离受限，城区遮挡环境有效半径仅 1km，郊区无遮挡区域仅 3km；需完整新建分层回传网络，一次性基建投入偏高。

3.2 自建无线专网方案

依托专用频谱、自建基站搭建电力专属无线网络，现有可选技术分为 1.4GHz IEEE 802.20、1.4GHz LTE、26GHz 5G 毫米波三类，技术成熟度、性能差异显著。

3.2.1 1.4GHz IEEE 802.20

该标准早年为 4G 备选技术，2022 年标准工作组解散，主流通信厂商无配套设备，国内仅少量小众厂商生产，设备未通过无线电管理准入检测，产业链基本消亡。频谱仅分配 6MHz 共享带宽，理论峰值速率 30Mbps，无法满足 44Mbps 实时图片回传需求；仅无遮挡空域可实现 8–10km 覆盖，地面无信号，无法实现立体全域覆盖，无工程落地价值。

3.2.2 1.4GHz LTE 专网

4 G LTE 产业链完备，可复用政务、海事专网成熟终端设备，但 5MHz 频谱带宽下上行峰值速率仅 15.12Mbps，带宽指标无法匹配实时巡检业务。覆盖性能存在分层缺陷：无遮挡高空覆盖 8–10km，郊区地面覆盖 5–8km，城区仅 3–5km，70m 以上高空无稳定信号，不支持空地一体化立体覆盖。

3.2.3 26 GHz 5G 毫米波专网

毫米波为 5G 标准关键技术，工信部分配 24.75–25.5GHz 共 750MHz 行业专用带宽，上行峰值速率可达 300Mbps，带宽完全覆盖无人机全场景业务；支持波束赋形，可实现空域立体覆盖。短板为毫米波绕射能力弱、易受建筑遮挡，无遮挡环境覆盖半径仅 6km；国内行业专网毫米波设备、终端商用尚处于起步阶段，配套产业链不完善。

3.2.4 技术方案比较

1.4GHz 两条技术路线均存在带宽短板，无法满足实时巡检需求；仅 26GHz 毫米波性能达标，但建网成本极高。测算显示，覆盖全域巡检场景，1.4GHz LTE 专网总投资约 5000 万元，5G 毫米波专网投资高达 10500 万元，后期基站运维、设备迭代持续产生高额成本。

3.3 运营商 5G 公网 VPN 方案

3.3.1 组网架构

无人机导航、视频、实时图片数据通过运营商专用 5G DNN 通道传输；机场安防监控、日常巡检事后图片复用变电站现有电力信息内网回传，无需新建专用回传传输网络。

3.3.2 5G 网络基础能力

国内地市、县城城区已实现 5G 全覆盖，农村区域覆盖率达 85%；运营商多频段 5G 资源搭配大规模 MIMO、波束赋形技术，构建地面 + 低空立体覆盖网络，5G 实际上行速率 250Mbps 以上，远超 44Mbps 业务带宽上限。5G-A（Release18）已完成标准冻结，新增载波聚合、通感一体化能力，可同步实现数据传输与低空无人机目标感知，适配低空安防拓展需求。

三类方案横向对比

对比维度	厂家私有协议模式	无线专网模式（5G 毫米波）	无线公网 VPN 模式
覆盖能力	郊区 3km/ 城区 1km，受遮挡严重	无遮挡约 6km，抗遮挡差	全域立体覆盖
传输速率	依赖有线回传	上行 300Mbps，满足需求	上行 250Mbps，满足需求
产业链成熟度	成熟	起步阶段	成熟
初期建设成本	较高（新建回传网）	很高（基站 + 回传网）	低（利用公网）
运维成本	自主运维，成本可控	较高	流量资费较高
安全性	专网专用	专网专用，物理隔离	APN 逻辑隔离
政策合规性	合规	毫米波需申请频率	合规

综合对比，5G 公网 VPN 在覆盖、基建成本、产业链配套层面具备突出综合优势，为现阶段电力无人机巡检首选通信方案。

5 自建回传网络建设方案设计

若选用私有协议、无线专网两类方案，必须配套新建无人机巡检专用回传网络，回传网造价、技术架构直接决定整体方案可行性。

5.1 三层分层网络架构

统一采用核心 - 汇聚 - 接入架构：核心层设置巡检中心、地调双节点，双光纤冗余保护；汇聚层覆盖 500kV、220kV 变电站，10GE 高速链路上联核心；接入层覆盖 110kV 变电站、供电所，复用现有电力传输环网，开通 100Mbps 业务链路。

5.2 数据网设备两套选型方案

交换机方案：核心高端交换机、汇聚中端交换机、接入低端交换机，全网部署 MPLS/VPN，总投资约 500 万元；短板为设备不支持 SRv6 协议，不符合国家电网综合数据网向 SRv6 演进的长期规划。

路由器方案：全网部署高端 / 中端路由器，完整支持 MPLS、IPv6、SDN、SRv6，适配电网远期网络升级需求，总投资约 3200 万元。

5.3 传输承载两种技术路线

灰光 OTN 方案：扩容、新增 OTN 板卡与设备，依托硬隔离通道承载 10GE 业务，单跨传输距离超 300km，ASON 智能保护机制完善；总投资 3600 万元，设备硬件成本偏高。

SPN 方案：各汇聚节点部署 100G SPN 设备，支持 SR 隧道、业务质量可视化运维，国内运营商大规模商用落地；短板为短距离传输受限，长链路需增设光放大模块，总投资 2000 万元。

5.4 四类建设组合造价对比

组合方案	数据网选型	传输网选型	投资规模（万元）
思路一	路由器方案	灰光 OTN 方案	6900
思路二	路由器方案	SPN 方案	5200
思路三	交换机方案	灰光 OTN 方案	4200
思路四	交换机方案	SPN 方案	2500

工程选型需结合区域电网远期通信规划、年度投资预算综合确定；中长期规划场景优先选择路由器 + SPN 组合方案。

6 结语

本文结合某地市无人机规模化巡检落地实践，量化分析多类型业务数据流带宽、时延指标，横向对比三类通信组网技术路线性能、造价、适配场景，同时完成自建回传网络多套建设方案测算。

电力无人机通信组网覆盖无线接入、传输承载、网络安全、低空业务拓展多维度体系，伴随 5G-A、毫米波、低轨卫星通信技术持续迭代，组网方案将持续优化。电网企业应建立常态化技术跟踪、方案评估机制，持续匹配无人机巡检规模化、智能化发展的通信需求。

参考文献

[1] 工业和信息化部。民用无人驾驶航空器无线电管理暂行办法 [Z]. 2023.

[2] 国家电网有限公司。无人机业务应用网络安全防护方案 [R]. 2023.

[3] 国家电网有限公司。公司综合数据网优化指导意见（2023 年版）（调通〔2023〕70 号）[Z]. 2023.

[4] 国网江苏省电力有限公司。新型电力系统全场景网络安全防护指导意见（苏电互联〔2021〕473 号）[Z]. 2021.

[5] 3GPP. Release 18: 5G-Advanced [EB/OL]. https://www.3gpp.org/release-18, 2024.

[6] IEEE 802.20 Working Group. Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Part 20: Air Interface for Mobile Broadband Wireless Access Systems[S]. 2008.