

ZTE中兴

低空安防融合感知技术 应用蓝皮书

——面向重要低空管制区域



中兴通讯股份有限公司

中国信息通信研究院

浙江凡双科技有限公司

上海特金信息科技有限公司

北京历正科技有限责任公司

理工全盛（北京）科技有限公司

江苏君立华域信息安全技术股份有限公司



引言

近年来，党中央、国务院高度重视低空经济产业发展。2023年12月，中央经济工作会议强调“打造低空经济等若干战略性新兴产业”，随后的全国工业和信息化工作会议提出“打造低空经济新增长点”，2024年3月，低空经济首次写入政府工作报告，提出“积极打造低空经济等新增长引擎”。2024年7月，党的二十届三中全会提出“深化综合交通运输体系改革，发展通用航空和低空经济”。2025年3月，《政府工作报告》中明确提出“推动低空经济安全健康发展”，规模化低空飞行活动是低空经济产生价值的基础，但实现可监管下的安全运营已成为发展低空经济的重要保障。

低空安防是保障低空经济安全健康发展的重要手段。低空安防包括两大领域：一是重要低空管制区域的低空安防，这类区域主要包括政府科研要地、机场、能源基地、边境口岸等，一般情况下严控无人机飞入；二是运营航线航路的低空安防，涉及合规运营无人机与黑飞无人机的智能识别和管制。本蓝皮书重点针对重要低空管制区域开展安防研究，总结典型场景及其安防需求，梳理低空安防技术手段，提出针对典型场景的低空安防综合解决方案，并分享相关实践案例，为业界同行提供重要参考，推动低空经济技术和产业良性发展。针对低空运营航路的安防，我们将在后续规划低空通导监解决方案相关蓝皮书，并进一步进行阐述。

本蓝皮书总结形成各典型场景的低空安防指标需求，多来自于产业调研和相关项目实践，一旦有行业标准出台，我们将对照标准进行修订完善。



目录 CONTENTS

01. 低空安防融合感知的必要性和关键挑战	01
1.1 低空安防对融合感知提出更高诉求	02
1.2 低空安防融合感知面临的挑战	03
02. 低空安防融合感知场景和需求	04
2.1 低空安防融合感知主要场景	05
2.2 低空安防融合感知基本业务需求	06
03. 低空安防融合感知与反制主要技术及设备	07
3.1 融合感知与反制系统概述	08
3.2 探测技术及设备	08
3.3 反制技术及设备	15
3.4 低空探测管控平台	21
04. 典型场景低空安防融合感知方案及应用案例	25
4.1 民航机场	26
4.2 边境口岸	31
4.3 重要活动场所	34
05. 总结与展望	38

01

低空安防融合感知的 必要性和关键挑战

——
低空安防对融合感知提出更高诉求
低空安防融合感知面临的挑战



01

低空安防融合感知的必要性和关键挑战

1.1 低空安防对融合感知提出更高诉求

低空安防需实现合规无人机及黑飞无人机、飞鸟等飞行物的探测监视，并对有安全隐患的飞行物进行反制，确保低空管制区域飞行安全。今年政府工作报告中强调，“推动低空经济安全健康发展”，构建高效协同、智能化的低空安防体系，已成为保障国家安全和社会稳定的关键任务。

伴随着物流配送、城市管理、应急救援、载人运输等低空应用场景的逐步拓展，低空无人驾驶航空器将呈现广域大范围、大规模、混合飞行的态势，“黑飞”扰航、敏感空域入侵、非法投递等风险事件同步激增，对公共安全、航空秩序、关键设施防护乃至国家安全的威胁不断加剧，低空安防需求呈现全域化、高频化特征，低空无人机探测感知与反制能力建设需求急剧攀升。因此，亟需梳理我国低空重点安防场景及其关键挑战，提出低空安防在探测感知与反制等领域的主要技术及其适用场景，形成低空安防融合感知的综合解决方案，助力低空经济安全健康发展。

低空感知与反制是实现低空安防的重要技术手段，其主要包括两大环节，分别是探测感知与反制。其中，探测感知负责对低空无人机或其他物体进行探测、动态追踪与身份识别，综合利用脉冲波、频谱、光电等感知手段，确认入侵物体类型、速度、位置等，是低空安防过程中的“眼睛”；反制负责在发现威胁目标后，实现无人机或其他飞行物的管控与打击，综合运用电磁压制、物理拦截等手段，确保入侵物体不会对目标监视区域造成侵害，是低空安防过程中的“手脚”。

虽然部分机场、边境口岸等重点安防场所部署了雷达、视频等感知设施和电磁压制等设备，但针对低空空域的多类型飞行器、多样化攻击手段等特征，低空安防技术防御体系整体仍处于起步阶段。此外，虽然现有感知探测和反制存在多种技术手段，但单一技术在实现功能、适用场景等方面各有差异，单一探测感知和反制技术无法满足各种低空安防场景的需求，构建多技术融合的低空安防体系成为未来的重要发展趋势。低空融合感知就是利用5G-A通感一体、低空监测雷达、无线电侦测等多种技术手段，根据应用场景特点和需求，通过设备联合部署与优势互补，构建低空安防的综合性实时动态监测体系，并利用电磁压制、激光摧毁等各类技术手段，形成低空安防的协同反制体系，为解决低空安防过程中的关键挑战提供技术能力。



1.2 低空安防融合感知面临的挑战

随着低空经济快速发展，政府科研要地、机场、能源基地、边境口岸等重点场所及运营航线航路的低空安防形势日益严重。然而，当前低空安防融合感知与反制在需求指标构建、技术手段供给、基础设施建设等方面仍处于发展初期，低空安防面临极大挑战。



需求指标方面

低空安防呈现场景复杂性、航线多样性的特征，重要低空管制区域及运营航线等低空安防融合感知的需求指标体系及其具体性能指标要求等仍不明确，亟需开展相关研究及实际场景试点探索。

技术手段方面

低空安防具有单探测与反制技术局限性、攻击手段多样性、反制技术滞后性等特点。一是传统探测技术具有局限性。低空飞行物探测监视难，小型无人机雷达反射面积小、飞行高度低，传统雷达难以有效识别，并且还存在飞鸟、空飘物等多种类型物体识别；二是低空安全攻击手段具有欺骗、劫持等多样化手段，低空飞行物可能受到干扰与欺骗，如利用卫星导航欺骗、通信链路劫持等技术，可导致低空无人机失控或被操控；三是低空反制技术滞后性。针对黑飞无人机的反制技术目前只通过电磁干扰、物理捕网等方式，技术发展滞后，可靠防御能力不足。

基础设施方面

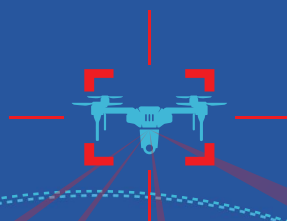
传统民航体系只是在机场、军事设施等领域部署了雷达和视频等探测及反制设施，这些设施也只能对大型飞行物进行探测。对于低空飞行区域，尤其是政府要地、能源园区、低空航线等区域，当前低空探测和反制的基础设施基本处于空白，大量重要低空管制区域均没有部署完善探测反制系统，无法针对低空无人机及其他飞行物形成有效防范。



低空安防融合感知场景和需求

低空安防融合感知主要场景

低空安防融合感知基本业务需求





低空安防融合感知场景和需求

2.1 低空安防融合感知主要场景

针对重要低空管制区域，机场、政府科研要地、边境口岸、能源基地、石化基地、大型活动场馆等成为低空安防融合感知的重点。



机场

包括各个等级民航运输机场、通航机场、军事机场等。机场低空安防需保障飞机起飞降落安全，防止各类低空无人机、飞鸟和其他空飘物等的非法侵入。同时，在民航机场内，还需避免作业车辆、人员误闯跑道，对安防提出了额外要求。



政府科研要地

包括政府机关、重要科研机构等重要场所。政府科研要地低空安防需要防止无人机入侵窃取国家机密或者进行恶意破坏，从而保障政府机关和重要科研机构的办公安全、人员安全以及机密信息安全等。



边境口岸

包括边境线及海关口岸。边境口岸低空安防主要防止无人机进行走私活动、利用无人机进行拍照和非法监测。



能源基地

包括核电厂、火电厂、水电站、变电站等。能源基地低空安防需防止非法人员利用无人机等破坏、干扰能源基地的正常运行，并有效预防机密信息窃取等行为。



石化基地

包括石油化工园区、大型油库等。石化基地低空安防需防止非法人员利用无人机等入侵，预防火灾事故等，有效预防机密信息窃取等行为。



大型活动场馆

主要包括大型体育场、集会广场等。大型活动场馆低空安防主要指重大活动期间防止黑飞无人机扰乱活动正常进行或者恶意破坏造成的民众安全事件。

2.2 低空安防融合感知基本业务需求

当前，大部分低空安防场景尚未有明确的业务指标需求，我们根据项目实践提炼，构建了探测概率、误报率等八大指标，并根据区域安防场景的安全发现、防御级别等需求，按照高、中、一般等级分三种情况，梳理了典型指标需求总览，如表2.1所示。

表2.1 低空安防融合感知基本业务需求

指标	高等级		中等级			一般
	机场	政府科研要地	能源基地	石化基地	边境口岸	活动场所
探测目标RCS	≥0.01m²		≥0.01m²			≥0.01m²
探测概率	≥95%		≥90%			≥80%
误报率	≤2次/天		≤3次/天			≤5次/天
定位精度	≤30米		≤30米			≤30米
数据更新率	≤2s/次		≤2s/次			≤2s/次
探测延迟	≤2s		≤2s			≤2s
取证要求	需要		需要			需要
反制要求	察打一体+人工		察打一体+人工			人工

注：以上指标仅为概要总览，详细的指标参见第四章。



低空安防融合感知与 反制主要技术及设备

融合感知与反制系统概述

探测技术及设备

反制技术及设备

低空探测管控平台

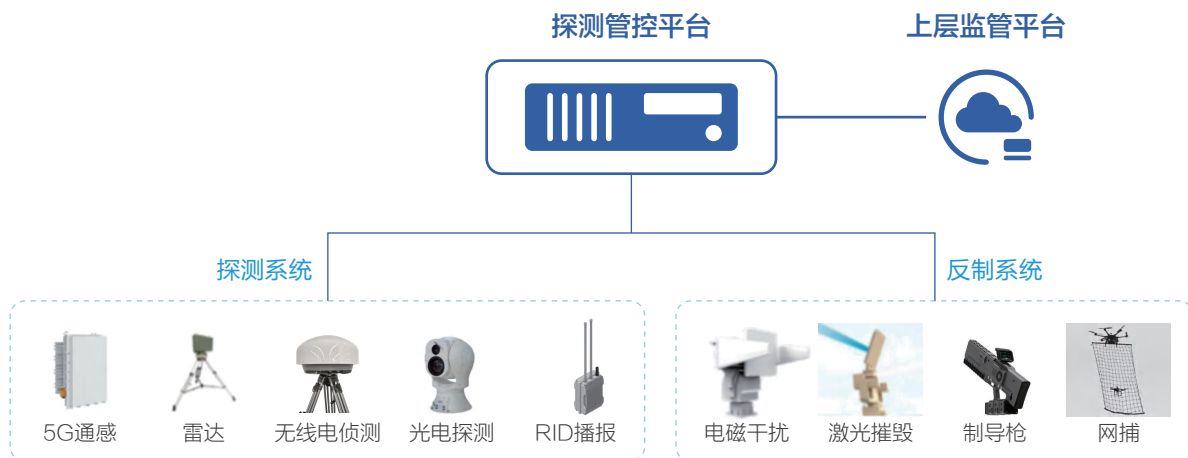




低空安防融合感知与反制主要技术及设备

3.1 融合感知与反制系统概述

低空安防融合感知与反制系统主要由探测系统、反制系统和探测管控平台构成，如图2.1所示。探测系统负责通过探测技术实现无人机或其他飞行物的感知探测，确认入侵物体类型、速度、位置等；反制系统负责利用反制技术实现无人机或其他飞行物的管控与打击，确保入侵物体不会对目标监视区域造成侵害；探测管控平台针对目标监视区域向对应的探测系统下发探测监视任务，探测系统实时上报探测结果到平台，一旦发现入侵无人机或其他飞行物，平台将通过光电探测拍照取证等方式并确认入侵物体类型，按需通知反制系统进行相应反制，最终通过探测系统查看入侵目标是否清除。同时，探测管控平台与上层监管平台互联，上报监管数据。



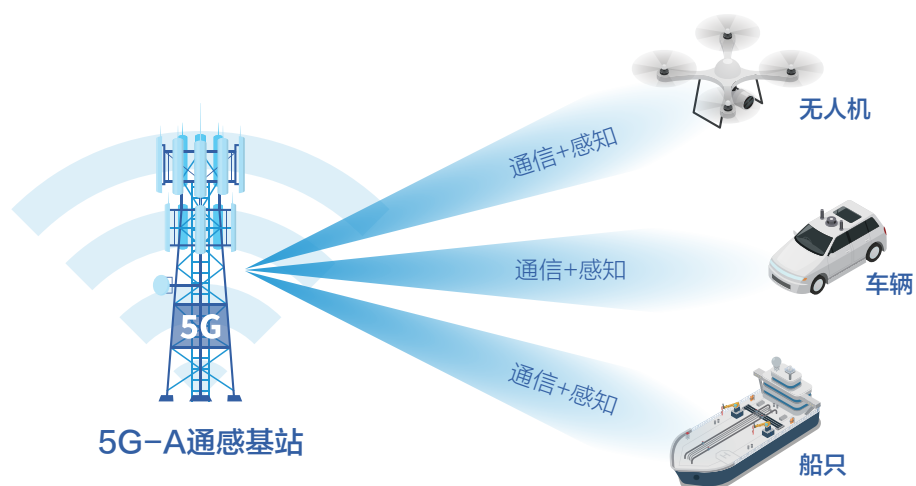
▲ 图3.1 低空安防融合感知与反制系统框架

3.2 探测技术及设备

► 5G-A通感技术

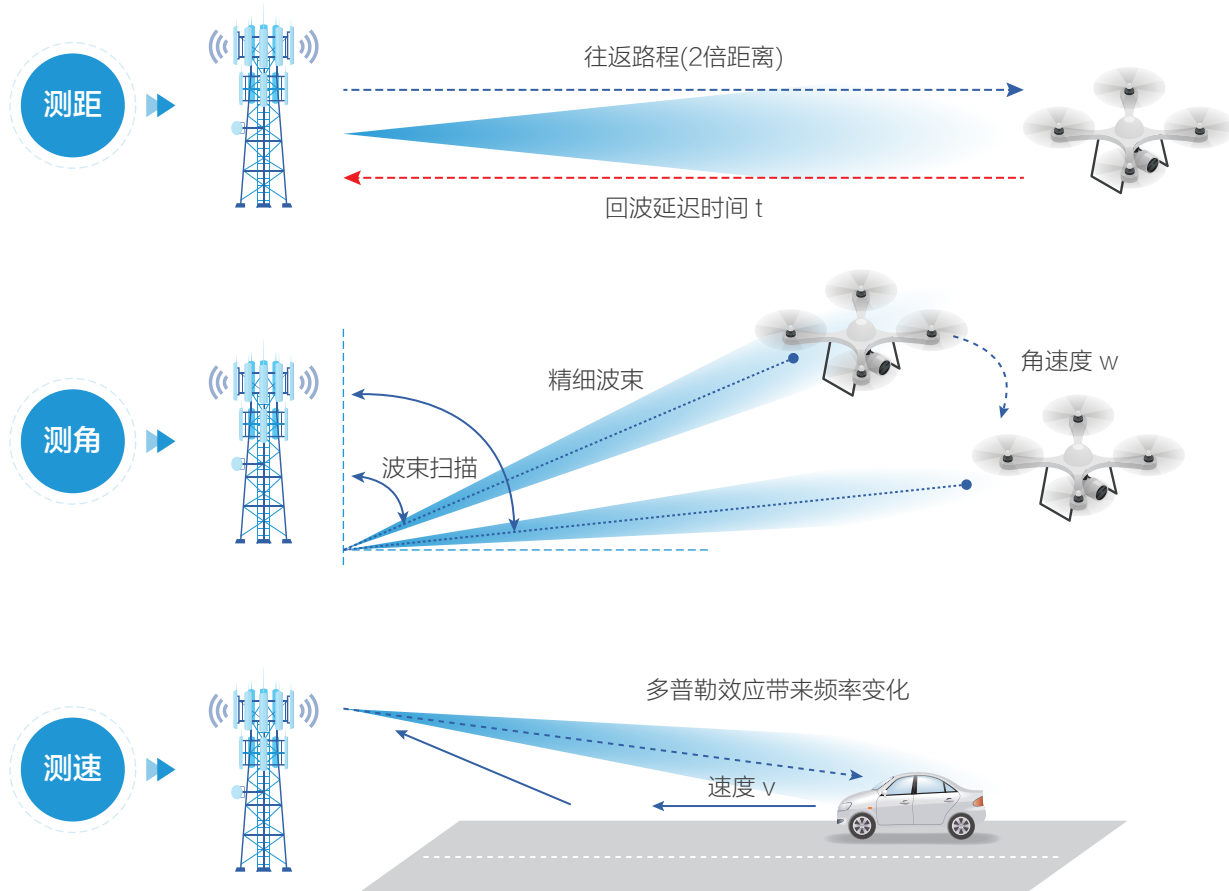
通信感知一体化技术（ISAC，Integrated Sensing and Communications）是5G-A的关键技术之一，通过将通信与感知功能深度融合，实现了“一网两用”的技术突破。

5G-A通感一体化通过在基站中集成通信与雷达感知功能，复用频谱资源和共享设备软硬件资源，使网络具备环境感知、目标检测与定位、轨迹跟踪等功能，如图3.2所示。



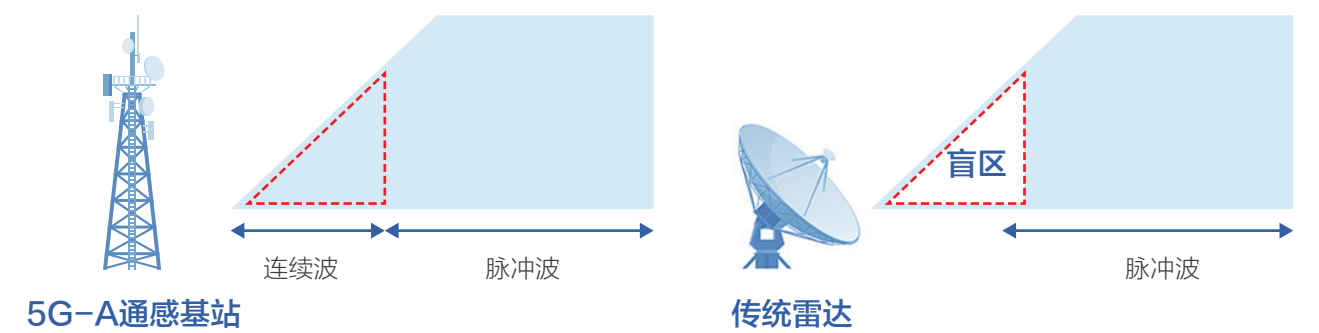
▲ 图3.2 5G-A通感一体化技术

5G-A通感基站感知基本工作原理如图3.3所示，与雷达（Radio Detection and Ranging, RADAR）工作原理类似，主要通过计算无线电波发射波和目标回波的时延、目标的多普勒效应频偏、不同天线波束收到目标回波的强度差异，给出探测目标的精确定位和速度感知。



▲ 图3.3 5G-A通感基站/雷达感知基本工作原理

传统雷达一般采用脉冲波进行感知探测覆盖，由于脉冲波的发射和脉冲回波的接收之间存在空隙，所以传统雷达虽然探测距离远但低空覆盖存在盲区。针对该问题，5G-A通感基站创新采用“脉冲波+连续波”双波形感知技术：采用连续波进行近距离感知覆盖，保证基站感知区域内无探测盲区；采用脉冲波进行远距离感知覆盖，提升基站的感知距离；“脉冲波+连续波”实现低空远距离连续覆盖，如图3.4所示。



▲ 图3.4 “脉冲波+连续波”双波形感知技术原理

所以，5G-A 通感一体技术具有较强的感知性能，可以有效支持低空应用场景，其主要感知性能指标如表3.1所示。

表3.1 典型5G-A通感一体技术感知性能

基本性能指标	5G-A通感一体化基站
工作方式	无线电波反射主动探测
主要工作频段	4.9GHz、26GHz
检出率	≥95%
虚警率	≤5%
感知目标RCS	≥0.01m ²
单站感知距离	不小于1.2km
感知精度	水平距离<10米、垂直距离<10米
组网能力	可以实现连片组网

此外，5G-A通感基站还具备目标识别的能力，可以区分不同的目标类型，如图3.5所示。例如，在低空安防场景中，5G-A通感基站通过识别引擎区分无人机和鸟，以减少不必要的预警。目标识别的基本原理是利用感知回波中的幅度、相位、频谱和极化等目标特征信息，通过多维空间变换来估算目标的大小、形状等参数，最后根据大量训练样本所确定的鉴别函数，在分类器中进行识别判决。为了提升目标识别效果，在5G-A通感基站中，还会引入AI技术，对不同场景不同类型的目标信号特征和运动特征进行数据收集、模型训练和学习，并将训练好的模型和参数用于实际场景和系统中，从而实现对目标类型的准确识别。



▲ 图3.5 5G-A通感基站目标识别技术

对于低空安防的高标准和高要求，利用5G-A通感基站的主动探测性、高灵敏度和7*24h不受环境因素影响特性，同时结合其他传统感知手段实现优势互补，可以实现精准管控的目标。具有如下优点：

- **广覆盖：**基站易组网，无低空覆盖盲区；
- **高感知精度：**超大规模阵列，米级定位精度；
- **多模态融合：**标准接口可结合多种设备，提供全面解决方案；
- **智能化：**实现AI目标识别和航迹跟踪；
- **演进能力强：**作为3GPP国际标准，具备持续的演进能力，未来演进到6G阶段的通感技术具备更强大的功能和更丰富的应用场景。

5G-A通感技术主要有以下不足：

- **低空业务测试尚不充分：**5G-A通感属于新兴技术，截止到2025年上半年，商用基站规模仅有约1千个，针对低空感知业务的相关性能指标尚需更多场景验证。
- **单站感知范围弱于专用雷达：**由于输出功率等因素，5G-A通感单站感知距离小于专用的低空雷达，仅能通过多站组网覆盖进行弥补。

► 低空监测雷达技术

低空监测雷达通过向空中发射无线电波，并接收目标反射回来的回波，实现对低空飞行目标的探测、定位、跟踪和识别，基本工作原理如图3.3所示，其典型设备形态如图3.6所示。



▲ 图3.6 低空监测雷达设备

表3.2 典型低空监测雷达性能

基本性能指标	低空监测雷达
工作方式	无线电波反射主动探测
主要工作频段	X波段/Ku波段
检出率	≥90%
虚警率	≥10%
感知目标RCS	≥0.01m ²
单站感知距离	≥5km
感知精度	水平距离<10米、垂直距离<10米
组网能力	组网困难

相比传统雷达，为了在复杂环境下实现对无人机等“低慢小”目标的精确探测及跟踪，低空监测雷达采用了脉冲多普勒体制、有源相控阵技术、抗杂波处理、目标识别等关键技术，其主要工作频段是X波段/Ku波段，基本性能指标如表3.2所示。

低空监测雷达的主要优点：

- **探测覆盖范围广：**单站探测距离 $\geq 5\text{km}$ （ $\text{RCS}=0.01\text{m}^2$ ），覆盖高度可以达到1000米以上高净空区域；
- **高精度探测：**采用先进的相控阵技术，能够实现对目标的快速扫描和高精度定位；
- **全天候作战：**不受昼夜、天气等自然条件限制，能够全天候持续工作，确保对低空飞行目标的实时监测。

低空监测雷达的主要不足：

- **虚警率较高：**对复杂背景的分辨能力较弱，容易受到地面杂波、植被反射等因素影响，易产生虚警；
- **探测盲区：**由于一般采用单点部署，所以顶部盲区较大；且由于采用脉冲波单波形还存在近点盲区；
- **连片组网困难：**难于像移动蜂窝网络实现连片无缝组网，雷达站与站之间协同、干扰消除、切换等都是组网存在的问题；
- **电磁干扰大：**由于发射功率较大，会带来较大的电磁干扰。

► 无线电侦测技术

无线电侦测技术是基于监测和分析无人机的无线电信号，实现对无人机的探测、识别和跟踪。无线电侦测技术能够实现对无人机的被动监测，探测无线频率能覆盖20MHz~6GHz的范围，是非合作目标监视的有效手段之一。无线电侦测设备的基本性能指标如表3.3所示。

按照实现方式，无线电侦测技术可分为频谱探测技术和报文解析技术两大类。

频谱探测技术以无线电频谱特征分析为主，其基于到达时间差（Time Difference of Arrival，TDOA）和到达角度（Angle-of-Arrival，AOA）等技术实现对无人机的无源定位；同时，基于多通道信号接收的特征提取与信号识别技术，实现对无人机的识别。当前，TDOA设备是频谱探测技术应用的主要产品类型，其典型设备形态如图3.7(a)所示，同时也有厂家会选择与AOA进行融合设计；AOA典型设备形态如图3.7(b)所示。此外，针对城市级大规模无人机监测跟踪带来的信息传输负载、监测资源优化和运算负载均衡等问题，领先厂家的TDOA系统还会进行组网优化设计，以实现城市级多区域多架次无人机的定位跟踪和轨迹形成。



▲ 图3.7 无线电侦测设备

表3.3 典型无线电侦测设备性能

基本性能指标	无线电侦测
工作方式	侦听被动探测
侦测频率范围	20MHz~6GHz
单站侦测距离	$\geq 3\text{km}$
感知精度	$< 30\text{米}$
组网能力	可以实现组网

报文解析技术是一种对无人机与遥控器之间传输的协议数据包内容进行解码和分析的技术，以实现无人机的探测、识别和跟踪等功能。报文解析聚焦于对无人机与遥控器之间传输的具体协议数据，通过提取其中的关键字段，如飞行状态（位

置、高度、速度）、设备序列号及操控者信息等，实现协议解析。报文解析技术通过识别报文协议内容，能够精准区分每一个目标的个体特征，关联一定时间内多频次出现的“高危目标”，实现目标定位并进一步实现飞手定位，同时也能够识别唯一识别编码，具有目标溯源倒查的能力。报文解析技术与频谱探测技术结合，可用于构建无人机黑白名单数据库。

无线电侦测技术的主要优点：隐蔽性强、无源被动探测，绿色环保；通过信号频谱分析和报文解析，可以定位无人机的操作员或控制站，对于抓捕黑飞飞手比较有帮助。

无线电侦测技术的主要不足：探测定位精度不高，特别是在复杂的电磁环境下，如城市建筑物反射和各类电磁干扰，会严重影响其探测准确性；对静默无人机无法检出。

► 光电探测技术

光电探测技术利用近红外相机、光学摄像机等光学设备的高分辨率光学摄像头捕捉飞行器图像，通过图像处理算法进行目标识别和定位，从而实现对目标进行实时追踪和监视，非常适合在需要精确目标识别等场景。典型光电探测设备的产品形态如图3.8所示，其基本性能指标如表3.4所示。

可见光探测的主要优点：分辨率高，能够提供详细的目标特征信息，适用于无人机行为分析和精细化监控任务。

可见光探测的主要不足：其性能受天气条件（如雨雾）和环境光照的限制，在低能见度环境中表现不佳。



▲ 图3.8 光电探测设备

表3.4 典型光电探测设备性能

基本性能指标	光电探测
工作方式	光电成像
目标跟踪识别	目标坐标获取后，光电设备自有AI算法持续跟踪
单站探测距离	1~2km
分辨率	可见光成像为1920×1080以上

► 远程识别技术

远程识别技术（Remote ID）是一种用于无人机的识别技术，要求无人机在飞行时实时地将自己的身份信息（如飞行器的唯一标识符、位置信息、速度、航向等）远程传输给地面接收设备或其他飞行器，从而实现对无人机的远程识别与监视。Remote ID技术允许无人机操作者在不暴露物理位置的情况下，向授权服务和空域管理者广播其身份和位置信息。

根据强制性国家标准《民用无人驾驶航空器系统运行识别规范》的要求，无人机应具备广播式运行识别发送和网络式运行识别发送两种功能，而且应能在起飞到降落的全过程保持运行识别信息的持续实时发送。

广播式Remote ID一般通过蓝牙、Wi-Fi等无线方式广播发送无人机运行识别信息；网络式Remote ID可以通过蜂窝网络（4G/5G）、地面有线网络、卫星网络等其中之一来传输无人机运行识别信息。典型Remote ID地面站监视设备的产品形态如图3.9所示，其性能指标如表3.5所示。

- Remote ID技术的主要优点：易部署、精度高、实时性强、多目标监测能力强。
- Remote ID技术的主要不足：广播式Remote ID信号覆盖距离较短，而且易受到干扰；此外容易受到针对性攻击。

当前Remote ID探测设备主要是对无人机主动广播式运行识别信息进行监测的地面侦测设备。而无人机则一般通过集成Remote ID模块来实现运行识别信息的生成和发送。Remote ID技术更适用于构建无人机白名单数据库。



▲ 图3.9 Remote ID地面站监视设备

表3.5 典型Remote ID地面站监视设备性能

基本性能指标	Remote ID远程识别
工作方式	侦听被动探测
侦测频率范围	2.4GHz、5.8GHz
单站侦测距离	≥ 1km
站址布设	支持与基站共址
组网能力	可以实现连片组网

► 探测技术对比

表3.6给出了各种探测技术汇总对比情况。通过分析可知，低空无人机具有飞行高度低、反射截面小、飞行速度慢、周围环境复杂等特点，单一探测技术无法满足各种低空安防场景的需求，需融合多种探测技术实现多维度、多层次的防控网络。

表3.6 各探测技术对比

指标	5G-A通感	低空监测雷达	无线电侦测	光电探测	Remote ID
业务功能	通信+感知	感知	侦听	拍照	广播/通信
探测模式	无线电波反射	无线电波反射	频谱侦听/报文解析	光电成像	频谱侦听/通信
扫描模式	电扫，测速精度高	机扫+电扫 难于检测低速目标	360° 侦听	360° 追踪	-
探测距离	1.2-1.5km	5-10km	3-5km	1-2km	<2km
探测物体RCS	>0.01m²	>0.01m²	-	-	-
探测位置精度	<10m	<10m	<30m	-	-
检出率	≥95%	≥90%	静默式无人机 无法检出	-	非法/静默式无人机 无法检出
虚警率	≤5%	≥10%	-	-	-
组网能力	大规模无缝组网	不具备大规模组网	多点组网	单站模式	多点组网
大众接受度	不敏感	敏感	不敏感	不敏感	不敏感
适用场景	所有禁飞区低空安防场景，做核心保护区精密探测保护	大型机场等高净空安防	一般性临时安保场所低空安防，重要活动场所外围低空安防	疑似目标追踪取证	所有低空场景

3.3 反制技术及设备

无人机反制技术及设备是为保护重要空地区域，对非法入侵的无人机进行控制的技术及设备。当前，无人机反制技术手段主要有电磁压制、激光摧毁、无人机网捕等，需根据实际防护场景，选择最优技术组合来构建无人机反制系统。

电磁压制

低空电磁压制技术是针对低空空域无人机等飞行器，通过发射高强度电磁波干扰其通信链路、导航系统及控制信号的电子对抗技术。典型的产品形态包括便携察打一体设备、机动车载察打系统等。

电磁压制的核心技术包括：

定向电磁干扰

针对非法无人机，采用定向电磁脉冲或信号屏蔽技术，迫使其降落或返航。

全向电磁干扰

多节点联动可以形成电磁压制网络，覆盖更大空域。由于将对应频段内的所有通信链路、控制链路、图传链路和导航链路都切断，因此采用此类反制技术容易引起“误伤”。

导航诱骗

发送虚假导航信号，迫使无人机驱离、返航、迫降。导航诱骗技术是一直较为有效的反制方式，相较于从卫星发射到无人机的真实定位信号，从设备发送给无人机的虚假定位信号功率更大，更容易生效。

便携察打一体设备

便携察打一体设备可通过单设备完成无人机防御反制全流程，满足快速部署、简洁操作的应用需求，包括手持式察打一体反制枪，便携式察打一体盾等。

1) 手持式察打一体反制枪

手持式察打一体反制枪作为便携察打一体的典型设备，通过频谱感知及无线电干扰等技术，实现无人机的探测预警、身份识别、目标测向、干扰处置。典型的手持式察打一体反制枪如图3.10所示，其性能指标如表3.7所示。



▲ 图3.10 手持式察打一体反制枪

手持式察打一体反制枪具有以下特点：

- **高精度瞄准：**具备高度精准的瞄准系统，确保在不同环境中对目标的准确打击，定向可避免大范围干扰。
- **迅速响应能力：**具备快速响应能力，一旦发现无人机威胁，能够迅速采取行动。

主要应用场景：

手持式设计灵活，可适应不同场景，包括城市执法、活动安保等多种应用场景。

手持式察打一体反制枪的优点：便携式，灵活使用；设备成本低；精准打击，避免大范围干扰，可避免坠机造成伤害。

手持式察打一体反制枪的缺点：有效范围相对有限，通常需要在特定范围内才能有效干扰无人机。

表3.7 典型持式察打一体反制枪性能

基本性能指标	手持式察打一体反制枪
工作方式	无线电探测、无线电干扰
侦测频段	900MHz、1.4GHz、2.4GHz、5.8GHz等可定制
侦测距离	1-2km
干扰频段	900MHz、1.4GHz、2.4GHz、5.8GHz等可定制
干扰距离	1-1.5km

2) 便携式察打一体盾

便携式察打一体盾设备通过无线电频率扫描无人机频谱特征，解析报文，侦测非法入侵无人机，识别无人机的控制信号、图传信号，通过电磁压制实现对飞控链路、图传链路和导航信号的干扰阻断，迫使无人机返航或降落。典型的便携式察打一体盾如图3.11所示，其性能指标如表3.8所示。

关键特点：

- **精准识别：**可识别主流品牌无人机以及对应的位置、速度、高度等信息；
- **察打一体：**探测与打击一体化设计，单台设备即可完成无人机的探测和打击；
- **多种干扰效果：**定向驱离，区域拒止，区域禁飞。



▲ 图3.11 便携式察打一体盾

主要应用场景：
可适应不同场景，包括城市执法、活动安保等多种应用场景。

便携式察打一体盾的优点：便携式，非敏感形外观、灵活部署；可精准打击，避免大范围干扰。
便携式察打一体盾的缺点：携带载荷低，只能携带有限的电子信息设备和侦察打击模块。

表3.8 典型便携式察打一体盾性能	
基本性能指标	便携式察打一体盾
工作方式	无线电探测、无线电干扰
侦测频段	300Mhz-6000Mhz
侦测距离	>5km
干扰频段	300Mhz-6000Mhz
干扰距离	>2km

机动车载察打系统

车载式无人机侦测反制系统基于频谱侦测和无线电干扰等技术，实现对黑飞无人机的侦测与反制功能。系统可在车辆行进过程中或停靠时，迅速发现四周接近的无人机，并通过破坏遥控、图传和导航链路对其进行管控。车载式无人机侦测反制系统可以根据任务需要快速部署，为任务保障提供全天时、全天候、立体化无人机防御手段。典型的机动车载察打系统如图3.12所示，其性能指标如表3.9所示。

机动车载察打系统具有以下特点：

- **机动灵活**：基于车载设计，便于在不同场景下的快速部署和撤离;机动性强，适用于各类移动式、伴随式低空安防场景。
- **无源侦测**：采用无源侦测技术，被动接收信号，不主动发射信号，无辐射。
- **反制手段**：系统具备定向、全向的反制能力。可以通过破坏无人机的遥控、图传和导航链路，实现返航和迫降功能，确保目标区域的安全。
- **侦打一体**：高度集成，探测预警、干扰处置、指挥控制于一体。
- **无人值守**：可自主运行，无需干预，自动预警处置。
- **实时校北**：在车辆行驶中实时校准车头方向，实时标校角度提高了系统打击方向的准确性和稳定性。
- **配置可选**：系统可根据使用需求选择不同配置(高配、中配低配)，以满足不同场景下的低空防御需求。



▲ 图3.12 机动车载察打系统

主要应用场景：

机动灵活，可适应不同场景，包括警卫任务、活动安保等多种应用场景。

机动车载察打系统的优点：基于车载设计，便于在不同场景下的快速部署和撤离;机动性强，适用于各类移动式、伴随式低空安防场景。

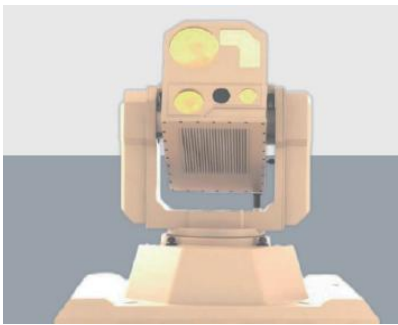
机动车载察打系统的缺点：成本较高； 依赖车辆供电，持续作战时电力供应不足； 车载空间有限，无法携带大功率干扰设备或多类型反制载荷。

表3.9 典型机动车载察打系统性能

基本性能指标	车载察打系统
工作方式	无线电探测、无线电干扰
侦测频段	20Mhz-6000Mhz
侦测距离	>5km
干扰频段	300Mhz-6000Mhz
干扰距离	>3km

激光摧毁

激光反无人机系统以激光拦截为核心技术，实时融合多传感器数据，实现目标识别、轨迹预测与自动决策，并支持人工复核和联合指挥，配合自适应聚焦和高速动态转台，对飞行器关键部位进行热破坏，确保精准击落。典型激光摧毁装置如图3.13所示，其性能指标如表3.10所示。



▲ 图3.13 激光摧毁装置

关键特点：

- **高精度：**利用高能量密度的激光束对目标进行精确打击，能够在极短的时间内精确锁定目标，误差极小，确保了对目标的精准打击；
- **快速响应：**激光摧毁系统能够在发现目标后迅速启动，实现实时拦截；
- **远作用距离：**激光摧毁的作用距离远，能够在目标尚未接近敏感区域前便进行有效干预。

主要应用场景：

军事防御：

边境哨所部署“致盲+毁伤”双重防护系统，可拦截高速无人机，对抗蜂群攻击；

民用防护：

- 机场净空区：可实现无人机识别、驱离与拦截；
- 关键基础设施：电网变电站场景中精准清除挂载导电物的穿越机，避免输电线路短路事故。

激光摧毁技术的优点：自动化，可察打一体；没有电磁干扰；反制距离远。

激光摧毁技术的缺点：设备成本高；无人机坠毁可能造成地面伤害。

表3.10 典型激光摧毁装置性能

基本性能指标	激光打击
工作方式	光电跟踪、激光打击
系统功率	6000W
毁伤距离	>2km

无人机网捕

无人机网捕技术是一种针对非法或违规无人机的物理拦截手段，通过发射或部署特制网具来捕获目标无人机。无人机网捕设备主要有网弹发射器、 无人机搭载捕网设备两大类，其性能指标如表3.11所示。

1) 网弹发射器

网弹发射器主要通过发射携带捕捉网的弹体实现目标捕获，覆盖范围达10-50米，可精准缠绕无人机旋翼或机身。适用于低空慢速无人机（如消费级多旋翼机型），需配合多传感器进行目标锁定。典型的单发式手持网弹装置如图3.14所示。



▲ 图3.14 单发式手持网弹装置（图片来源于互联网）

2) 无人机搭载捕网设备

无人机搭载捕网设备是通过飞手控制反制无人机携带网捕工具靠近黑飞无人机进行抓捕的方式。该方式可以在飞手视距范围内远距离精准捕捉黑飞无人机。按照投捕方式来分，又分为机载网捕无人机、旋翼挂载式网枪等。

机载网捕无人机

专用拦截无人机配备折叠式捕捉网，通过近距离（5-15米）抵近释放，适用于复杂电磁环境下的精确拦截。与侦查无人机组成“察打一体”集群，实现目标跟踪-拦截全流程自动化。机载网捕无人机如图3.15所示。



▲ 图3.15 机载网捕无人机（图片来源于互联网）

旋翼挂载式网枪

在四旋翼无人机上加装压缩空气驱动网枪，射程约20-30米，支持手动或自动触发。

主要应用场景：

- 针对不便于采用电磁压制或者电磁压制不起作用的黑飞无人机抓捕；
- 主要用于城市重点管制区域或重大活动安保中，通过抓捕无人机避免隐私泄露与安全威胁。

无人机网捕的优点：

- 机械式精准抓捕，安全环保，避免造成空中电磁干扰。
- 可完整抓捕无人机，获取证据做取证分析等；

无人机网捕的缺点：

- 非自动反制，反制时间最长；
- 实施抓捕的飞行员及无人机要求高，人力成本高。

表3.11 典型无人机网捕设备性能

基本性能指标	物理拦截
工作方式	网捕
工作距离	10-50米（不含反制无人机飞行距离）

反制技术对比

表3.12给出了各类低空反制技术汇总对比情况。通过分析可知，不同无人机反制技术需要结合不同侵入对象、不同场景来针对性配置。针对低空安防需求，需要设计低空综合防控系统，基于多种探测技术融合协同，采用多种拦截手段，比如电磁压制、激光摧毁、无人机网捕等，实现对关键区域的低空飞行无人机的全天候、全区域实时预警、目标识别、动态跟踪及精准拦截。

表3.12 低空反制技术对比			
指标	电磁压制	激光摧毁	无人机网捕
反制模式	驱离/迫降/诱导	地面精准击毁	空中抓捕
反制范围	>3km	>2km	视距范围内机动抓捕
优点	• 可自动化，可察打诱一体 • 定向打击避免大范围干扰，可避免坠机造成伤害	• 自动化，可察打一体 • 没有电磁干扰 • 360° 转向实施反制	机械式精准抓捕，安全环保
缺点	• 设备成本较高 • 有电磁干扰，尤其全向电磁压制会有较大干扰破坏	• 设备成本高 • 无人机坠毁可能造成地面伤害	• 非自动反制，反制时间最长 • 实施抓捕的飞行员及无人机要求高
适用场景	重点禁飞区防控区域，适合于大部分场景，并可根据场景需求进行配置调整	高级别禁飞区防控区域，边境防御，机场净空，能源设施防御	城区普通执法，大型活动安保，要地防护

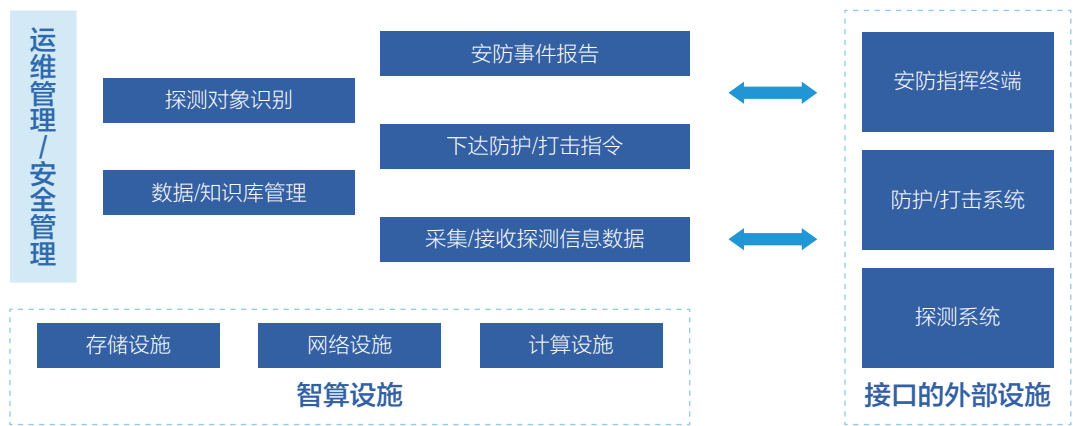
3.4 低空探测管控平台

3.4.1 概述

低空探测管控平台是实现采集/接收探测信息数据、对探测对象识别、报告安防事件、决策并下达防护/打击等安防指令的中枢性平台。

低空探测管控平台的核心功能，首先是具备多种探测技术接入和探测数据处理的能力，其次是具备平台自身的管理功能以及算力、存储、安全、高可用性等基础设施能力。

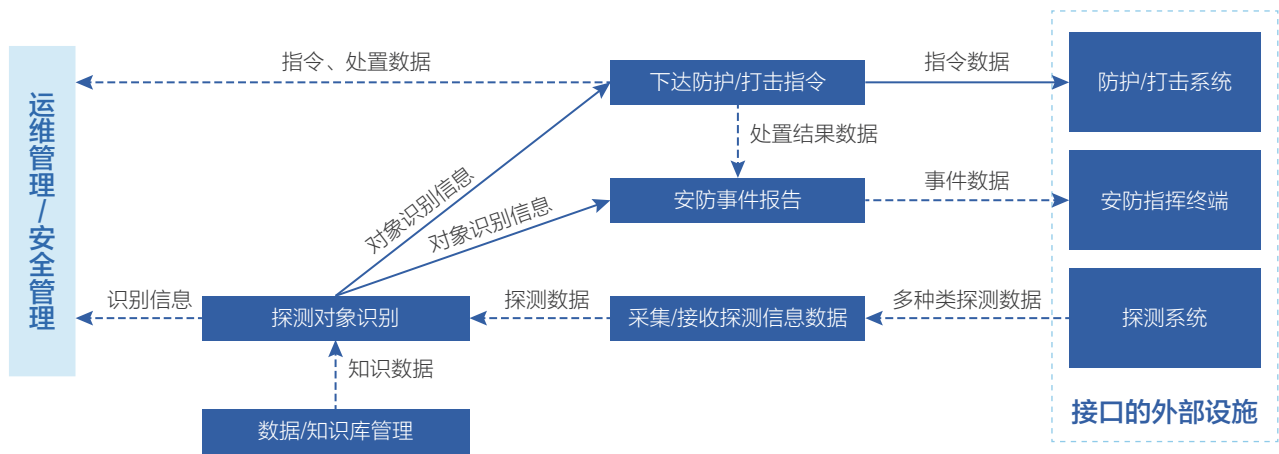
低空探测管控平台功能示意图如图3.16所示，实线框图表示的是具体的功能模块；“智算设施”虚线框图表示的是平台功能运行所依赖的物理系统，包括：存储系统、智算系统、网络系统等；“接口的外部设施”虚线框图表示的是与平台有接口交互的设施系统。



▲ 图3.16 低空探测管控平台功能示意图

低空探测管控平台主要功能模块包括：

- 安防事件报告，支持多种终端的报告方式；
- 探测对象识别，包括支持多种识别技术、识别算法；
- 下达防护/打击指令，支持手动、自主等方式，这项功能还要求低空探测监管平台支持与打击/防护系统的多种接口；
- 采集/接收探测信息数据，要求低空探测监管平台支持各类探测系统探测数据的接入；
- 数据/知识库管理，提供对静态数据如空间数据、地理信息数据、各类设备信息配置数据等的存储与管理，提供对动态数据如飞行器飞行数据等的存储；
- 运维管理/安全管理，除了常见的设备运维等管理，还需要能够提供对探测记录、探测处理过程、探测处理结果等的记录、查询和分析。



▲ 图3.17 低空探测管控平台功能模块间数据、控制流程示意图

图3.17简单示意了功能模块之间的数据信息、控制指令流向，反映了功能模块之间的联系。由于低空探测监管平台不是孤立的系统，与低空中其他系统有多种接口联系，因此相关的接口标准化也是低空探测管控平台发展建设中的重要一环，低空探测管控平台的接口设计标准需要满足支持开放、统一的要求。

此外，低空安防探测和反制技术仍处在不断发展更新当中，低空探测监管平台在设计、部署时需要从开发、系统升级等方面支持新技术、新算法等能力的更新扩充，包括：

- 支持智算资源的动态申请、释放、扩展；
- 持新增算法功能等模块的融合、部署；
- 提供全局数据集/知识库的共享、计算。

3.4.2 多种探测技术接入及处理能力

低空探测管控平台需要具备支持5G-A通感、雷达、频谱侦测、RID远程识别、光电探测等多种探测技术接入的功能，并具备多源数据处理能力，包括：

- **感知数据整合处理：**实时采集飞行器的三维坐标、航速、姿态等动态数据，以及气象、空域流量等环境数据。数据管理功能通过分布式存储系统实现对TB级数据的实时写入，确保采集飞行轨迹等数据的连续性。在无人机物流场景等中，IMU（惯性测量单元）和GNSS数据需要支持每秒数百次频率存储，为算法提供精准输入。
- **多模态数据融合处理：**结合5G-A、雷达、频谱侦测、RID远程识别、光电探测等多源异构数据，可以通过数据湖架构实现非结构化与结构化数据的统一存储，提升目标识别精度。

同时，平台需要能够管理5G-A通感、雷达、频谱侦测、RID远程识别、光电探测等探测设备，包括：

- 新增、移除设备，包括设置设备位置、设备使用权限等；
- 设置、修改设备能力参数，设置、修改设备接口协议、探测参数集等。

此外，平台在设计上需要支持灵活扩展支持多种同构、异构探测技术设备，支持增加新型探测技术。

3.4.3 探测对象威胁判断及处置

低空探测管控平台通过多源探测数据融合，给出防控区域多目标的特征信息，比如位置、飞行轨迹、目标类别等，并通过AI等技术应用进行威胁等级判定（侦察/攻击意图），最终给出相应的处置决策。

平台根据处置决策结果，再进行相应的处置行动，具体包括：

- **报告分发：**将探测识别结果根据预定义的策略分发到对应的终端、运维中心及预定义的其他系统。
- **下达指令：**根据探测识别结果、预定义的策略等，发送预定的指令到其他系统，实现对飞行器的告警、阻拦、打击等，并需支持人工指令的下达。

3.4.4 数据存储及安全

数据存储为低空安全探测的重要基础设施，提供高容量存储、实时数据处理、智能分析支撑，为全域感知、风险预警和应急响应提供技术底座。数据存储功能对低空安全探测的具体支撑作用如下：

- 对采集的短时使用的即时数据类，支持短期存储；
- 对诸如飞行器监测、环境感知、交通流量和天气状况等感知需求，检测系统会生成大量感知数据，提供持久化数据的存储机制。

低空探测监管平台需要提供访问控制、身份认证等功能，保障数据安全，防止数据的未授权访问、泄露等；同时，提供数据备份与恢复等基本功能。

对于使用多个平台数据进行计算的场景，如利用城市治理数据、公共安全数据结合平台部署场景数据进行识别分析等，低空探测监管平台还需要支持隐私计算，如联邦学习、安全多方计算等技术，形成数据安全协作。

3.4.5 接口标准化

低空探测管控平台需要支持多种接口，与多种外部系统、设备互联，包括：

1) 数据接入接口

- **多源数据采集接口**：接收多源探测数据，支持5G-A通感基站、雷达、光电设备等数据的实时接入。
- **外部系统接口**：与监管部门系统、无人机制造商平台实现API对接，取得基础数据。

2) 功能交互接口

- **告警与反制接口**：通过开放协议，形成与无人机反制系统联动，实现对违规目标的拦截与反制。

3) 设备通信接口

- **智能运维中心**：提供各类飞行器、数据采集接收、场景态势等数据，支持运维监视等功能的实现。
- **应急响应接口**：与公安、消防系统打通，支持一键触发应急预案。

低空探测管控平台涉及的接口种类多、数据类型复杂，部分接口响应时间要求高，需求方往往与行政监管等密切相关，这些标准应符合国家标准、行业标准为宜，但目前相关国标、行标还不能完全满足低空探测管控平台的需要，例如现行有《GB/T 43570-2023 民用无人驾驶航空器系统身份识别 总体要求》、《GB/T 12182-2018 空中交通管制二次监视雷达通用规范》、《MH/T 4052-202 通用航空飞行动态数据传输规范》、《MH/T 4055-2022 低空飞行服务系统技术规范》系列标准，另外国际上《3GPP TS 23.256》等也在持续研究中，这些标准内容上涉及了低空探测管控平台相关的数据、功能，但尚未明确规定低空探测管控平台概念，相关标准也有待引进转化为我国行标。总之，低空探测管控平台接口标准化工作需要适时启动、全面推进。

04

典型场景低空安防 融合感知方案及应用案例

民航机场

边境口岸

重要活动场所



04

典型场景低空安防融合感知方案及应用案例

4.1 民航机场

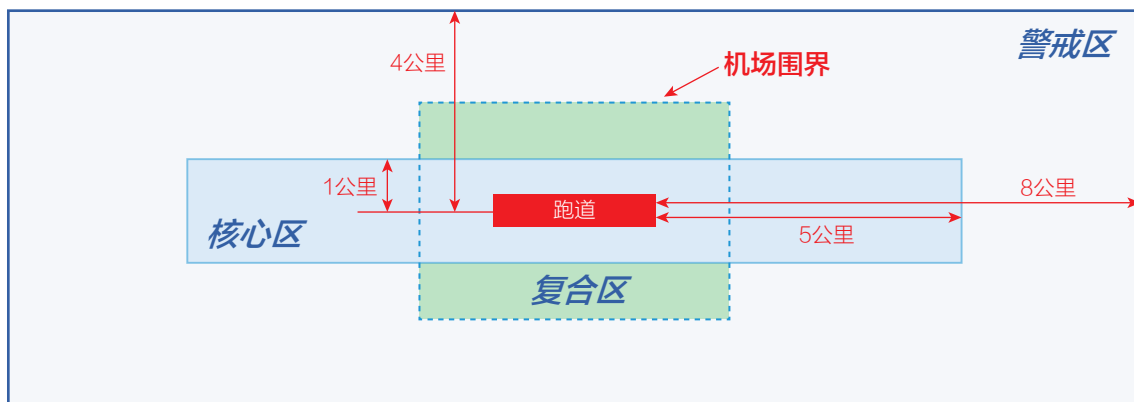
4.1.1 民航机场低空安防系统业务需求

随着无人机技术的飞速发展和广泛应用，机场低空安防面临着日益严峻的挑战。无人机“黑飞”、闯入机场净空保护区等事件时有发生，严重威胁到航班起降安全和旅客生命财产安全。比如：2024年12月韩国务安国际机场飞鸟撞机事件、2016年4月英国希斯罗机场无人机碰撞事件等。



▲ 图4.1 民航机场低空安防主要场景

民航机场低空安防主要场景如图4.1所示。根据《民用机场无人驾驶航空器探测系统通用技术要求（征求意见稿）》，民用机场无人机探测区域包含警戒区、核心区和机场围界内的复合区域，如图4.2所示。无人机扰航警戒区，简称“警戒区”，指机场每条跑道两端外延各8公里，跑道中线两侧各4公里的区域。无人机扰航核心区，简称“核心区”，指机场每条跑道两端外延各5公里，跑道中线两侧各1公里的区域。机场围界内的复合区域，指机场围界内除核心区部分的区域。



▲ 图4.2 民用机场无人机管制区域示意图

根据《民用机场无人驾驶航空器探测系统通用技术要求（征求意见稿）》，机场安防探测系统应具备对侵入机场警戒区和核心区的无人机目标的探测、跟踪、识别、信息融合、告警和记录功能。

警戒区安防功能要求：

- 系统应能跟踪以直线或者曲线轨迹飞行的单个无人机或机群，对同时出现的多个无人机或机群具有跟踪能力；
- 系统应具备监视历史数据的保存和回放能力；
- 系统应能自动、准确、及时传输监视信息，应能自动发出报警信息。
- 将探测到的目标标定在地图上，将无人机目标、疑似无人机目标、非无人机目标区分开，将清晰可辨认的运动轨迹展示在界面上；
- 提供无人机入侵记录和事件分析；
- 可进行升级维护，并定期进行校准和调整；
- 尽量降低误报率，确保系统可用；
- 系统包含的所有设备应能够组网联动，并通过融合算法将探测结果统一展示。

核心区和机场围界内的复合区域安防功能要求：

- 满足警戒区一般性功能要求；
- 系统应能自动使用光电设备对探测目标进行跟踪拍摄，并提供清晰可辨识的图像和视频，能够作为无人机目标确认的证据。

《民用机场无人驾驶航空器探测系统通用技术要求（征求意见稿）》对民用机场无人机探测系统的总体性能要求如表4.1所示。

表4.1 民用机场无人机探测系统的总体性能要求

性能指标	警戒区	核心区和机场围界内的复合区域
探测物种类	无人机、飞鸟、空飘物等	无人机、飞鸟、空飘物、车辆等
空间覆盖要求	全覆盖	全覆盖
定位误差	不大于50m	不大于30m
数据更新率	不大于2s/次	不大于2s/次
探测概率	不小于95%	不小于98%
误报率	不大于2次/天	不大于1次/天
探测延迟 (从目标进入监视区域到被系统探测的延迟)	不大于10s	不大于6s
光电确认时间 (从目标被探测到目标被拍摄并识别的平均耗时)	不大于5s	不大于3s

根据上述分析，民用机场低空安防的核心需求就是对机场及机场附近范围的空域实现实时监控和管制：

核心区和复合区：绝对严控。要求实现“即时发现，立即处置，零侵入零后果”；

警戒区：重点防控。要求阻止任何未授权的无人驾驶航空器、飞鸟等飞入管制区，实现“快速发现，快速处置，不扰航不漏网”。

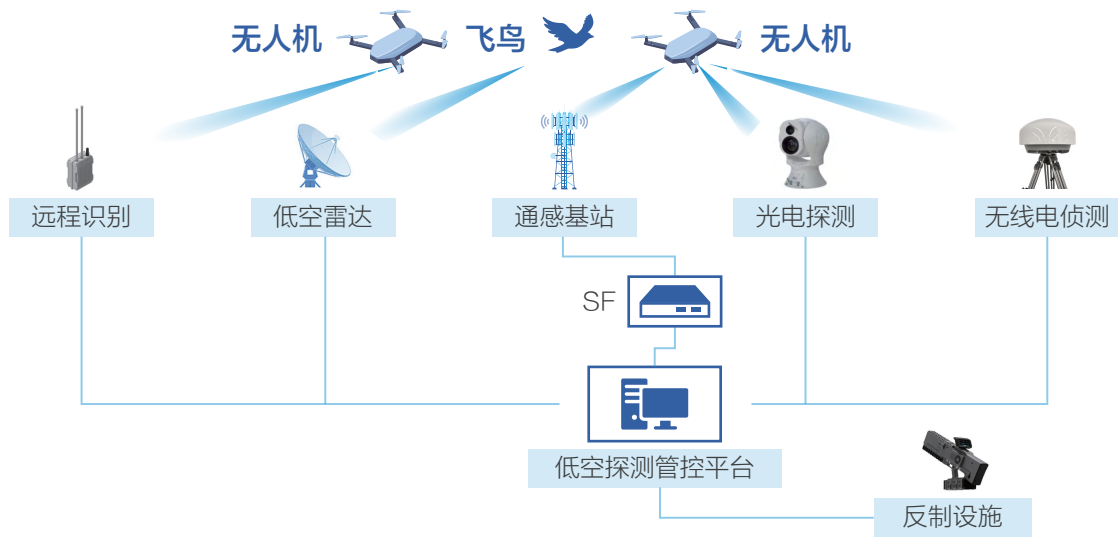
4.1.2 民航机场低空安防综合解决方案

针对机场安防隐患，民航机场低空安防综合解决方案以5G-A通感为核心，构建空地协同通感一体智能安防系统，由净空防御子系统、机场围界雷视融合警戒子系统两大子系统组成，实现对机场净空区域、围界等重要区域监测预警及管控，如图4.3所示。



▲ 图4.3 民航机场低空安防综合解决方案

净空防御子系统方案如图4.4所示。方案以5G-A通感为基础，低空雷达、无线电侦测、光电探测、Remote ID等作为补充，主被动结合探测，实时监控部署区域内的低空飞行目标，识别锁定目标后实施有效管制。

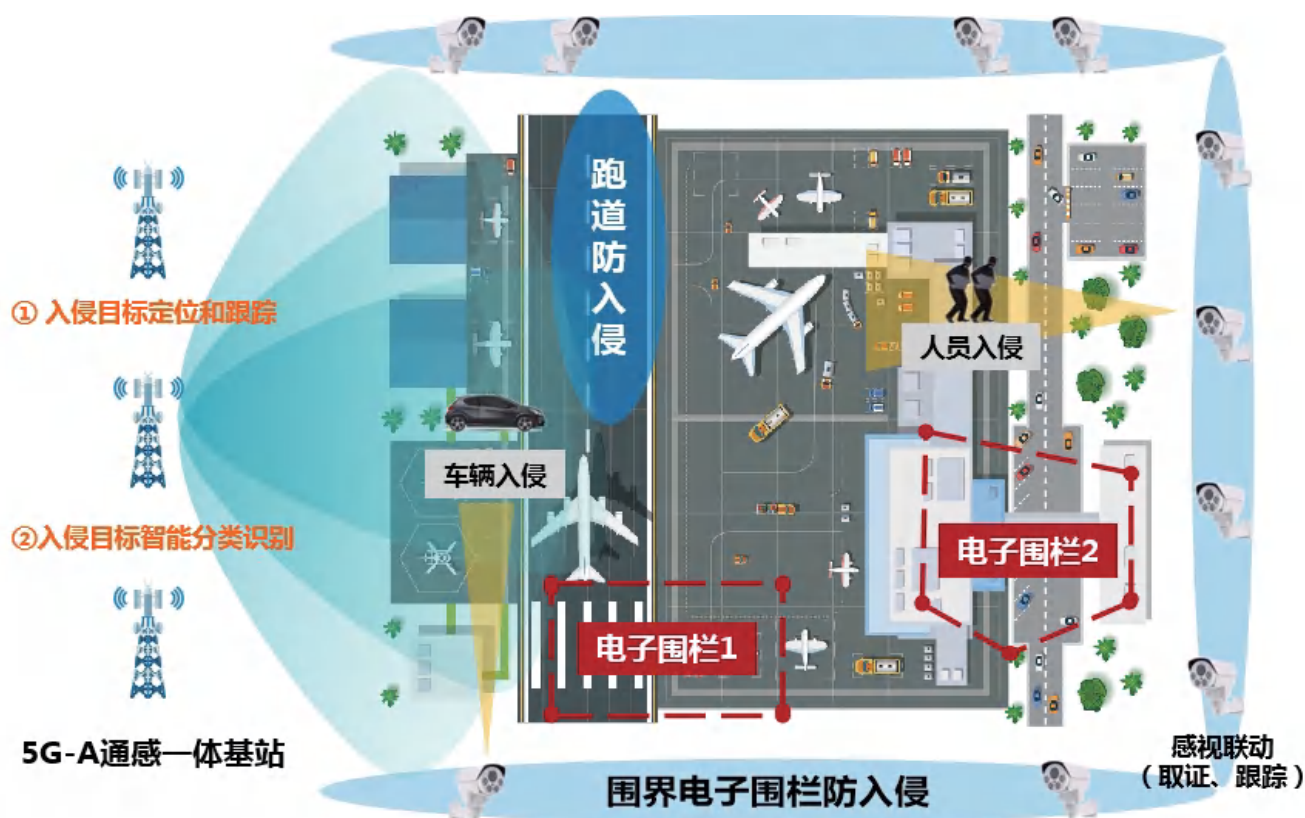


▲ 图4.4 净空防御子系统方案

方案基于5G-A通感低空安防技术能力底座，整合了低空监测雷达探测距离远的能力、无线电侦测对无人机遥控信号的实时分析预警能力、光电探测对近距离目标的精准成像跟踪能力，以及Remote ID技术对合作无人机的身份认证功能，通过多技术融合构建立体化监测网络，实现对低空目标的实时跟踪、合法与非法身份区分及飞行意图判别，形成全域智能监测的低空安防体系。作为安防体系的中枢，低空探测管控平台则对通感定位数据、雷达信号、频谱特征、光电图像等多源异构数据进行实时整合，借助态势感知建模与人工智能算法实现威胁快速研判，并联动反制设备实施分级处置，同时支持与上级监管部门及周边单位的信息共享和协同联动，构建覆盖监测、研判、处置的全域安防监管闭环。

为实现对机场低空区域的全方位无死角监控，净空防御子系统方案采用“核心区-警戒区”分级部署防护。核心区以机场跑道为中心，主要部署5G-A通感基站和光电探测设备，并辅以部署低空雷达、无线电侦测设备、Remote ID设备，通过多模态感知数据融合实现米级精度感知和对近距离目标的精准成像跟踪能力；警戒区部署5G-A通感基站和光电探测设备，辅以部署低空雷达，形成警戒区连续覆盖。

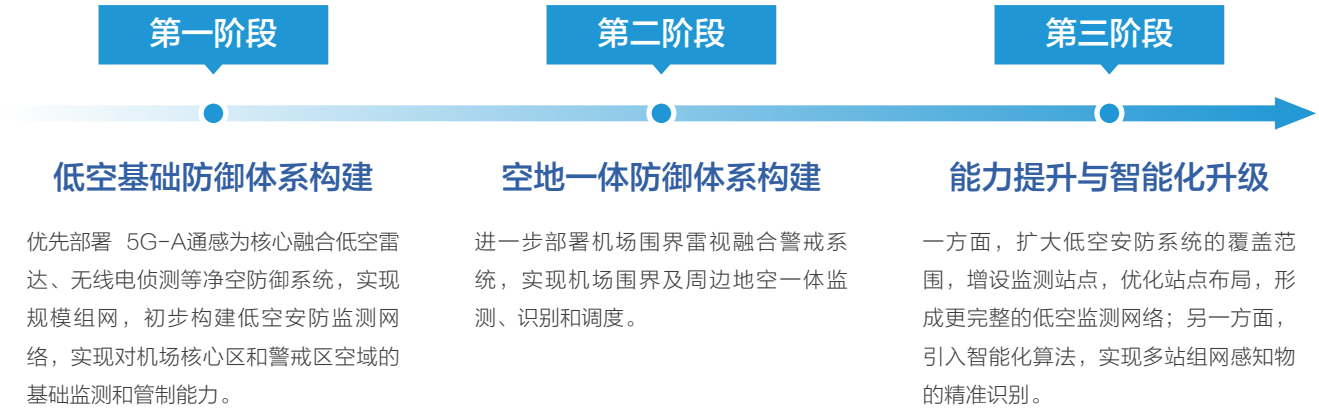
机场围界内也是机场安防的关键区域，主要采用5G-A通感+光电探测的组合方案，雷视融合警戒子系统如图4.5所示。系统依托5G-A通感一体高精度感知能力，可针对机场围界内重点地面保障区域如跑道等区域设计多个电子围栏区域，并关联最优光电探测设备，对入侵目标进行多角度精确定位、追踪和识别。机场围界雷视融合警戒子系统可与净空防御子系统协同工作，实现民航机场全天候立体化安防管控。



▲ 图4.5 机场围界雷视融合警戒子系统

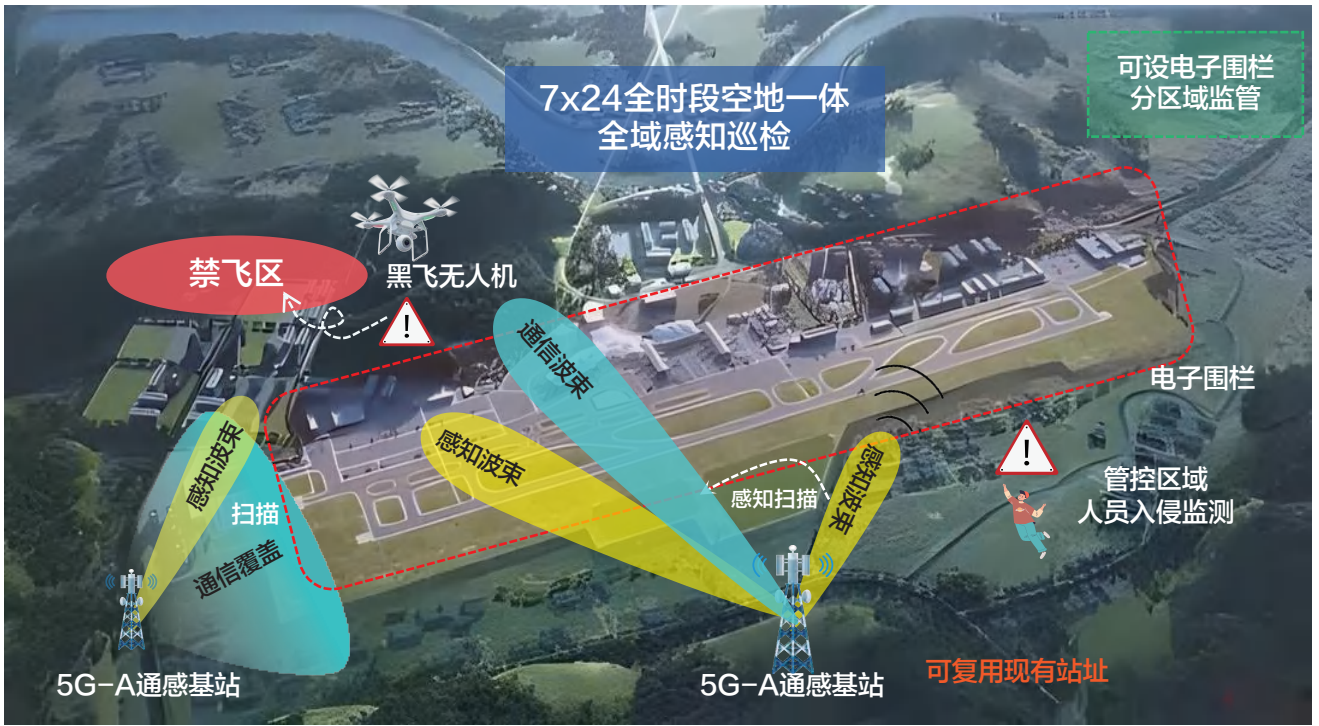
4.1.3 民航机场低空安防分阶段建设方案

民航机场低空安防建设应遵循分阶段实施的原则，逐步推进系统从基础监测到智能化监管的完善，确保建设过程的有序性和效益最大化。整体建设可分为三个阶段，分别是低空基础防御体系构建阶段、空地一体御体系构建阶段、能力提升与智能化升级阶段，最终形成全方位、智能化的低空安防体系。



4.1.4 民航机场低空安防实践案例（某市国际机场）

为了保护机场免受无人机、气球、飞鸟等“空中地雷”和非法侵入跑道上的动物、行人、车辆等“跑道杀手”两大类安全威胁，国内某市国际机场率先部署了基于5G-A通感一体技术的低空安防系统，如图4.6所示。



▲ 图4.6 某市国际机场低空安防实践案例

该系统通过多个5G-A通感基站的联合感知处理，突破了单基站探测距离、感知精度、响应速度的瓶颈，实现高可靠的目标检测，最终达成感知的广覆盖和高检测率。对低空无人机感知，在不同高度、不同速度下，RCS=0.01m²的无人机感知水平/垂直精度8~12m，虚警率和漏检率均<5%；对地面车辆感知，水平/垂直精度6~7m，虚警率和漏检率均<5%；航迹跟踪起始时延6~8s，且轨迹完整。具体测试验证数据见表4.2。

表4.2 某市国际机场低空安防系统测试验证数据

测试高度	测试目标	速度范围	水平精度	垂直精度	虚警率	漏检率	航迹起始时延	空间覆盖率	轨迹完整度
100m	无人机	5-10m/s	11.82m	10.41m	4.70%	4.57%	6s	97.19%	95.43%
200m			8.07m	9.30m	3.33%	2.43%	6s	96.68%	97.57%
300m			10.29m	10.63m	4.72%	1.03%	6s	99.05%	98.97%
地面	车辆	0-10m/s	7.00m	6.69m	3.22%	0.00%	8s	/	100%

该系统实现了机场场景的无人机飞行轨迹感知实时监测+电子围栏功能，能实时追踪机场感知覆盖区域内无人机的运动轨迹、速度和位置并针对入侵无人机进行反制驱离，实现区域内全天候、无死角、高精度的低空安防感知监测。

该系统基于AI目标识别算法，实现对无人机、飞鸟、悬浮物等低空飞行物体的识别区分，目标识别准确率>95%，从而提供了更丰富的类别信息，支撑机场安防管控场景下对感知目标应对措施的实施。

4.2 边境口岸

4.2.1 边境口岸低空安防业务需求

边境口岸的低空空域安防因其特殊性和复杂性，成为维护国家安全与边境稳定的关键环节。随着低空飞行器的普及，边境口岸低空空域安防因小型无人机、轻型飞机等低空飞行器频发的非法入侵、走私和侦查行为，将面临严峻挑战。

边境口岸低空安防场景示意图如图4.7所示。构建高效、精准、实时的低空监控与反制系统，是边境口岸低空安防的核心目标。边境口岸低空安防系统需具备精准态势感知能力，以实时掌握低空飞行物位置、速度及轨迹，从而及时发现异常，同时通过分析外形、信号特征等，对入侵目标进行识别分类，以判断潜在威胁并采取对应措施；需与地面监控系统、检查站等协同形成空地一体化防控网络，确保发现目标后迅速联动地面力量拦截驱离。



▲ 图4.7 边境口岸低空安防场景示意图

鉴于边境复杂地理环境（山地、河流等）和多变气象条件（大风、雨雾等）对监测难度和设备性能的影响，安防系统必须具备良好的可靠运行能力，并具备稳定高速低延迟的通信链路保障能力，形成与系统间实时信息传输及协同指挥；系统未来应具备良好的可扩展性和灵活性，以适应安全形势变化与技术发展。系统通过低空通感一体基站、低空雷达、光电探测、无线电侦测等多技术协同形成全方位感知网络，构建智能化监管平台实现数据融合与智能分析，达成“看得见、看得清、看得准、看得远、看得懂”的低空监控与反制核心目标，全方位保障边境口岸安全。

探测系统的总体性能要求如表4.3所示（根据部分项目需求）。

表4.3 边境口岸低空探测系统的总体性能要求	
性能指标	边境口岸区
物体种类	无人机、水面漂浮物、车等
空间覆盖要求	全覆盖
定位误差	不大于30m
数据更新率	不大于2s/次
探测概率	不小于90%
误报率	不大于3次/天
探测延迟（从目标进入监视区域到被系统探测的延迟）	不大于3s
光电确认时间（从目标被探测到目标被拍摄并识别的平均耗时）	不大于5s
反制处理时间（从目标被探测到目标被反制处置平均耗时）	不大于5min

4.2.2 边境口岸低空安防综合解决方案



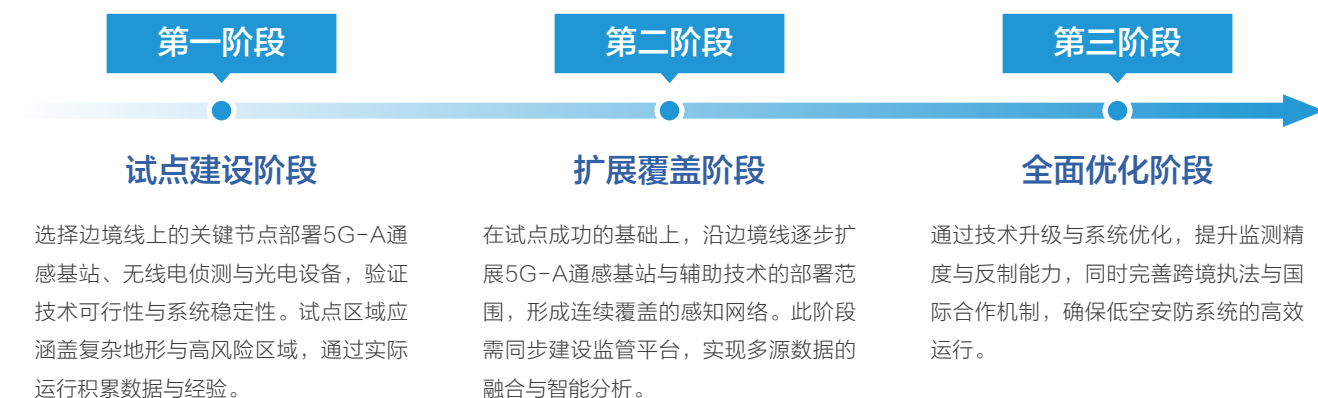
▲ 图4.8 边境口岸低空安防综合解决方案

边境口岸低空安防综合解决方案由净空无人机防范子系统与水空一体监测子系统双核心架构构成，构建起空地协同、立体覆盖的智能化安防体系，如图4.8所示。其中针对净空无人机，主要以5G-A通感一体技术为核心，融合光电跟踪、无线电侦测、RemotelD以及反制等装备，该技术通过通信与感知深度融合，在同一频段实现高速通信与高精度目标感知，解决了传统雷达与通信系统的频谱冲突问题；水空一体监测子系统聚焦边境水域偷渡防范场景，依托5G-A通感一体技术联动高清摄像头，构建水面与低空目标的智能捕捉网络。同时，系统可以灵活调度警航巡逻无人机执行动态巡检任务，实现重点区域全覆盖、高频次巡查。双系统采集的多源异构数据实时汇聚至智慧边境守护指挥中心，通过可视化大屏进行态势分析与战术指挥，支撑决策层快速制定精准应对策略。在系统部署层面，边境口岸设备布置可沿边境线线性部署的通感基站单站覆盖半径达1公里，通过组网形成连续覆盖的感知网络，在提升监测精度的同时降低了建设与维护成本。

在感知与反制层面，方案构建了多维融合体系：通感基站可有效探测低空飞行器目标；光电探测提供高分辨率图像，实现目标精准识别与跟踪；无线电侦测技术监测解码无人机控制信号，快速定位非法飞行器；RemotelD技术为合法飞行器提供身份认证与位置报告，实现合法与非法目标的区分。针对非法入侵，系统配备电磁干扰、定向声波、网捕等多元反制手段，依据威胁等级实施从非物理干扰到物理打击的分级处置，形成多层次防御能力。

4.2.3 边境口岸低空安防分阶段建设方案

边境口岸低空安防系统的建设需遵循分阶段推进的原则，以确保技术成熟度、经济可行性与实际需求的平衡。



在实施过程中，需注重技术与管理的双重创新。技术上持续优化5G-A通感一体技术，探索新型感知设备；管理上建立跨部门协同机制，确保与边境管理、海关、公安等无缝对接，推动系统从“能用”到“好用”再到“实用”的升级，全面提升边境低空安防效能。

4.2.4 边境口岸低空安防案例（云南红河）

云南红河边境线长超800公里，涵盖山地、河谷等复杂地形，年均非法低空飞行事件曾达300余起，传统安防手段监测盲区占比超40%。针对这一现状，沿红河边境线以每1.2公里间距部署5G-A通感一体基站（初期部署10个）；核心区域站点密度提升至0.8公里/站，同步配套20台光电探测设备，构建起单站覆盖半径1公里、缓冲区10公里连续监测、外围带机动补盲的立体化站点网络，实现98%的重点通道与易走私区域全覆盖，如图4.9所示。



▲ 图4.9 云南红河低空安防实践案例

系统依托 5G-A 技术实现米级定位精度（误差 ≤ 10 米）与秒级测速能力（速度识别误差 $\leq 1.5\text{m/s}$ ），每日处理数据量超20GB。通过多源数据融合算法，目标识别准确率达96.7%，能在3秒内区分民用无人机（如大疆Mavic系列）与非法改装飞行器（识别特征包括信号频率、飞行高度异常等）。实测数据显示，处置效率提升70%。

在监管平台联动机制下，实现“监测精度-识别效率-处置速度” 三维度突破，边境检查站响应时间压缩至5分钟内，视频监控自动跟踪覆盖率达100%，地面防控力量调度效率提升60%。

在实际应用中，该系统多次成功发现并处置了非法低空飞行事件，有效遏制了利用低空飞行器进行走私、非法入境等违法犯罪活动，大大提高了红河边境口岸的低空安防水平，为边境地区的社会稳定和经济发展提供了有力保障。这一案例充分展示了5G-A通感一体技术在边境口岸低空安防中的强大优势和实际应用效果，为其他边境口岸的低空安防建设提供了宝贵的经验和借鉴。

4.3 重要活动场所

4.3.1 重要活动场所低空安防业务需求

重要活动场所的低空安防对公共安全与活动顺利开展至关重要，当前因无人机等低空飞行器广泛应用，面临防范非法入侵、实时监控并精准识别分类目标、快速反制威胁等复杂挑战。

重要活动场所低空安防场景示意图如图4.10所示，其低空安防场景涵盖大型体育赛事、政治会议等类型，因活动临时性、周期短且防护重点与级别各异，系统需快速搭建、灵活配置监测站点并便于拆卸转移。精准识别分类合法与非法低空飞行器是关键，如国际马拉松赛事中需区分官方授权与未授权飞行器以避免误判。低空安防系统需与地面视频监控等安防设施深度融合，形成空地一体化网络，联动处置可疑目标并具备抗干扰能力。同时，重要活动涉及多部门协同，系统需实时共享低空态势信息，为协同指挥提供平台支持以快速启动预案消除威胁。此外，系统需满足临时空域管制等特殊需求，根据指令调整监测策略并加强禁飞区监测，同时具备可扩展性以适应不同活动安防需求。



▲ 图4.10 重要活动场所低空安防场景示意图

重要活动场所探测系统的总体性能要求如表4.4所示。

表4.4 重要活动场所探测系统的总体性能要求

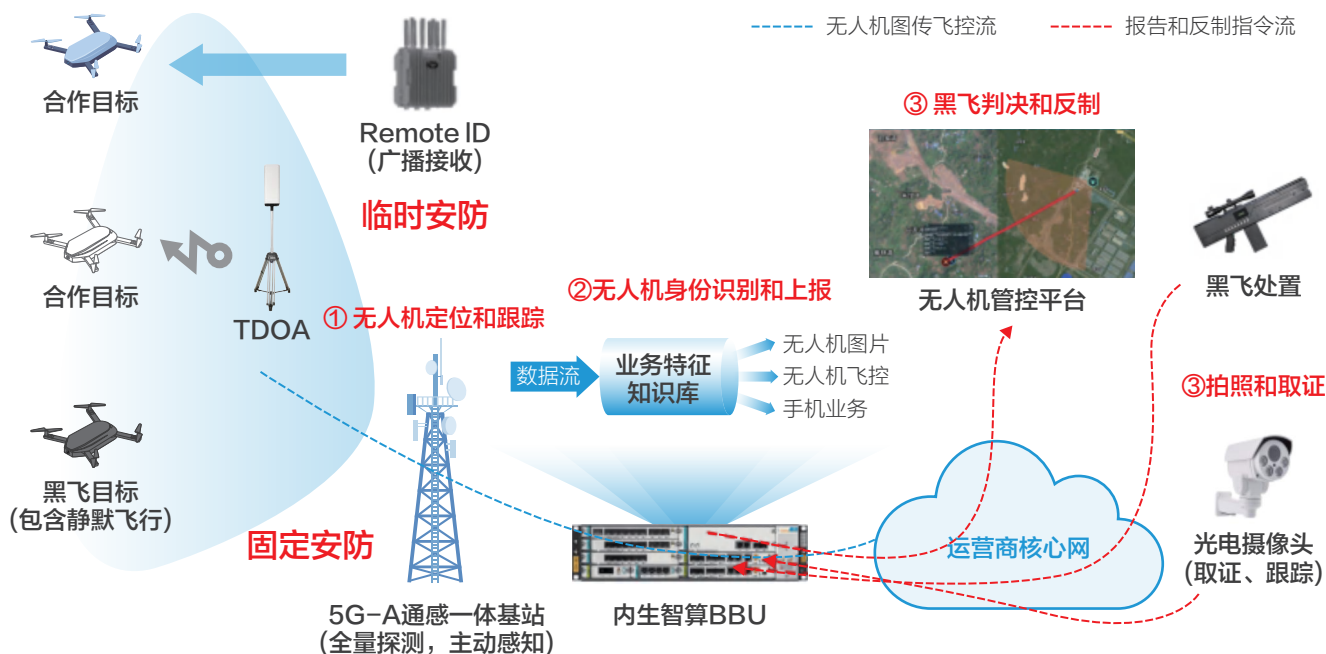
性能指标	重要活动场所
物体种类	无人机
空间覆盖要求	全覆盖
定位误差	不大于30m
数据更新率	不大于2s/次
探测概率	不小于80%
误报率	不大于5次/天
探测延迟（从目标进入监视区域到被系统探测的延迟）	不大于3s
光电确认时间（从目标被探测到目标被拍摄并识别的平均耗时）	不大于5s
反制处理时间（从目标被探测到目标被反制处置平均耗时）	不大于10min

4.3.2 重要活动场所低空安防综合解决方案

重要活动场所如体育场馆、城市广场等都是在密集城区，不适合部署低空雷达，低空安防方案以5G-A通感为主体结合光电、频谱侦测等，构建固定性与临时性结合的智能化安防体系，如图4.11所示。站点规划按场景特性分两类策略：

固定性安防：在大型体育场馆制高点、观众席上方及会议中心核心区等永久重要区域，固定部署5G-A通感一体设备，形成常态化空域监测基础网络。

临时性安防：针对露天音乐节舞台、观众聚集区或重要会议代表驻地、交通要道等临时重点区域，按需临时增设光电探测器、无线电侦测设备等，与固定设备协同构建动态监测网。



▲ 图4.11 重要活动场所低空安防综合解决方案

感知系统层面，由固定部署的5G-A通感设备实现大范围空域扫描，并结合光电探测进行目标跟踪和成像识别，无线电侦测设备监测飞行器信号频谱并定位飞手。探测管控平台层面，数据经5G-A网络汇聚至处理层，通过数据融合算法与深度学习技术，完成合作和非合作目标的分类处理、目标精准识别及威胁评估；同时，管控平台具可视化界面，支持实时态势监控、智能预警及历史数据查询。反制系统层面，系统可分级应对威胁，对小型民用无人机采用电磁干扰迫降或引导返航，对高威胁目标启用激光、高功率微波等定向能武器精准打击，并根据目标状态动态调整反制策略。

方案通过标准化接口与视频监控等系统深度联动，如发现可疑目标时，自动触发视频追踪及周界预警，形成“固定监测打底+临时增强补盲+多系统协同”的立体防护网络，高效应对不同活动场景的低空安全需求。

4.3.3 重要活动场所低空安防分阶段建设方案

重要活动场所低空安防可分两阶段建设，以“固定为主、动态补充”实现能力进阶：

基础构建阶段：在体育场馆、会议中心核心区部署 5G-A 通感基站与固定光电设备，形成“全域监测+精准识别”网络，重大活动期间临时部署无线电侦测和便携式反制系统，实现固定与临时设备初步联动。

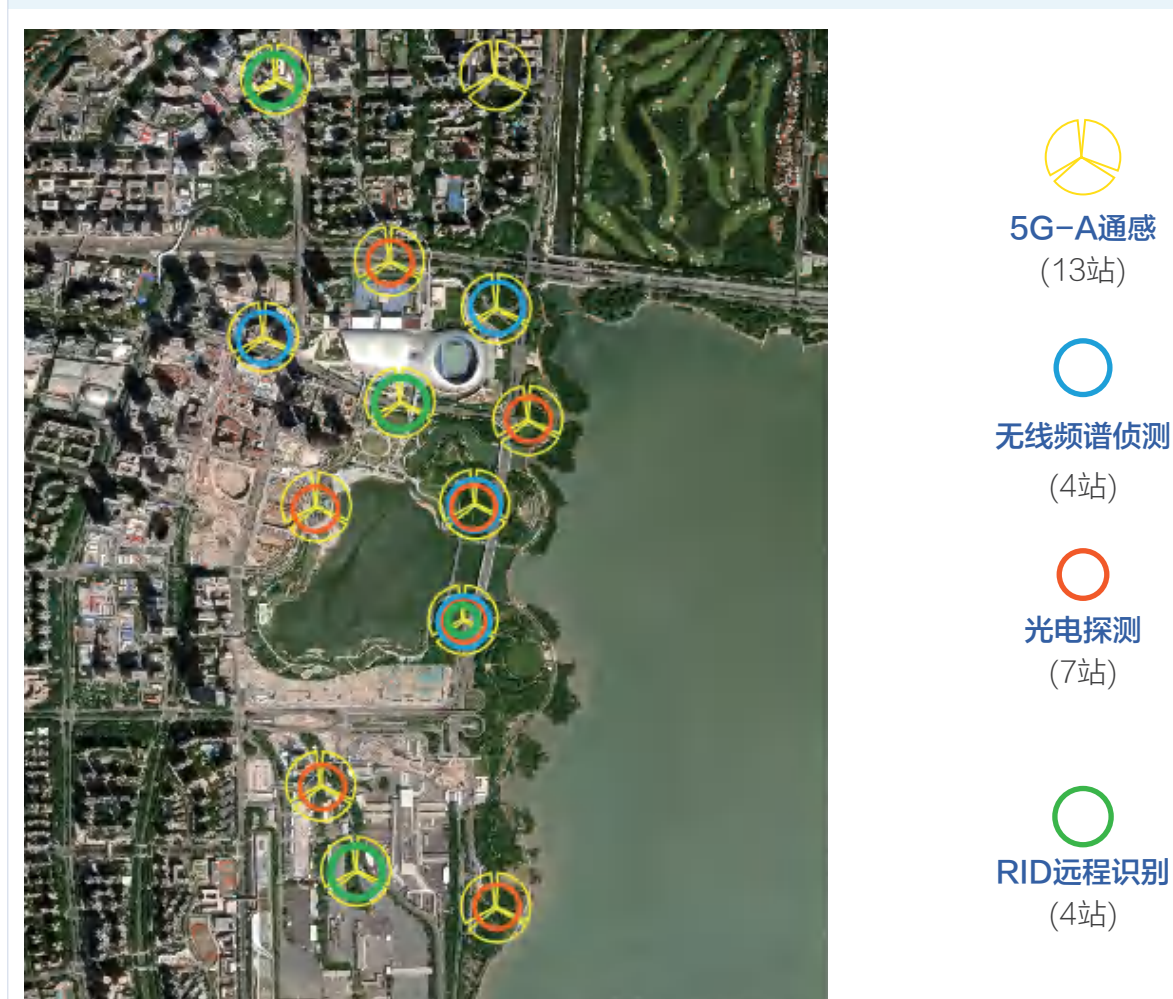
能力强化阶段：加密固定网络并增强动态响应，升级定向声波、智能网捕等固定反制设备；配置移动监测单元与车载系统，支持临时场所快组网，建立“固定预警-移动驱离-物理拦截”三级响应，实现固移设备深度协同。

4.3.4重要活动场所低空安防案例（深圳湾体育场及人才公园）

深圳南山低空经济示范区以科技创新驱动低空领域发展，目前已建成5G-A通感连片覆盖的示范网络，重点覆盖深圳湾区域，为低空经济各类场景提供关键支撑，同时保障区域低空秩序与安全。其中，深圳湾体育场和深圳人才公园作为赛事、演唱会、群体活动等人员聚集场所，对于低空安防的管控非常重要。

为了验证多元融合感知系统的性能，南山低空经济示范区规划部署了5G-A通感、无线电侦测（含TDOA+报文解析）、RID远程识别和光电探测的多系统融合组网部署。其中5G-A通感部署13个站，基本覆盖了深圳湾体育场、人才公园、深圳湾口岸全域，形成无缝的低空探测网络，在其中的7个5G-A通感站点部署光电探测设备，用于雷视联动，基于5G-A通感探测到的黑飞目标进行跟踪和拍照取证，部署4个无线电侦测站点，主要覆盖体育场周边，用于重大活动黑飞无人机和飞手侦测定位，部署4个RID远程识别基站，用于合规无人机主动上报，同时构建了以中移凌云平台为主的低空探测管控平台用于多模态探测感知系统接入和处理，如图4.12所示。

深圳湾体育场和人才公园低空安防融合感知系统部署图



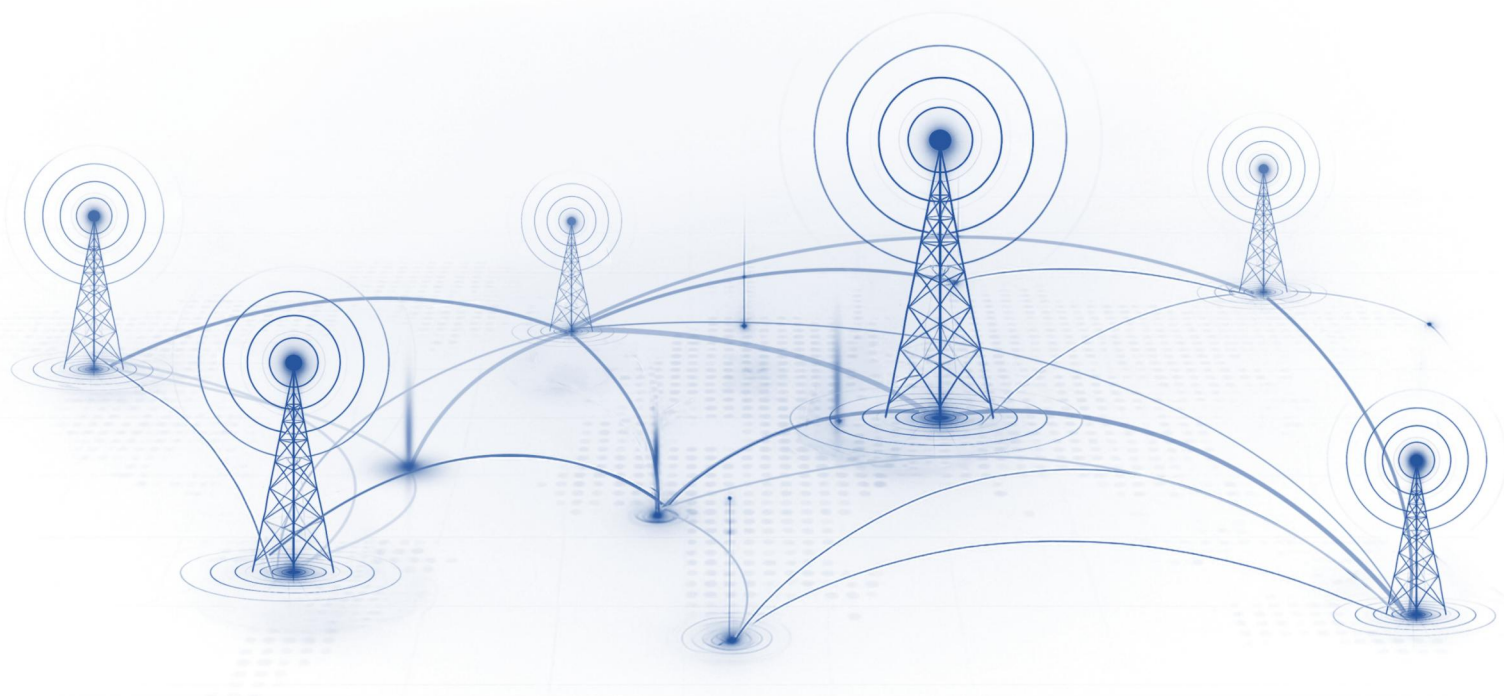
▲ 图4.12 深圳湾体育场及人才公园低空安防实践案例

05

总结与展望

随着低空经济活动的持续发展，低空安防将为低空经济安全健康发展构筑基础保障。当前，低空安防仍面临需求标准不明确、场景多样、电磁环境复杂、低慢小目标探测难等挑战，需要多种探测感知技术融合应用，提高低空安防可靠性，并实现探测与反制系统智能联动与快速处置。目前，产业各方已在部分典型场景形成一定的应用实践，在实践的基础上不断总结提升，助力低空经济安全健康发展。

展望未来，低空安防将逐步向“全域感知、智能决策、协同防控”方向发展。技术层面，5G-A通感技术不断成熟并向6G演进，AI智能识别及大模型应用等技术的不断发展，将提升低空安防的技术能力；政策层面，国家多部门协同政策推进，完善标准规范，确保有法可依、执法必严，让黑飞无人机无处躲藏，让合规无人机畅游低空。





ZTE中兴

让信任与沟通无处不在

中兴通讯股份有限公司