

构建城市低空通航全域感知适配技术体系研究

王 晔

向塘机场飞行管制室 江西 南昌 330201

摘 要: 城市低空通航全域感知体系建设的最大难题不在于单一检测设备性能的最大化提升,而在于能否使多种传感器形成一种应对城市特殊电磁环境和建筑布局所匹配的检测网,本文从城市空间感知环境制约、多源感知资源的协同调度、感知信息融合处理三个方面来对全域感知适配技术体系的主要组成部分进行探讨。建筑物遮挡和电磁背景噪声对探测范围的缩小是整个感知体系所面临的第一大环境阻碍,固定式监测站点及移动性监测装置的配置方式可以及时对探测死角进行补充。在数据融合环节,目标关联确认以及置信度管理直接决定了感知结果是否能够服务于低空安全管理决策,这一环节的效能将最终检验整个技术体系的实用价值。

关键词: 城市低空通航; 全域感知; 适配技术; 多源融合; 目标探测

引言: 城市低空通航的业务在商品运输、应急服务以及空中运输等方面的迅速发展对低空的监测能力提出了比传统的航空业监控范围更大的需求,城市本身具有的建筑物多、电磁环境复杂、飞行器繁多等特点也导致了传统的雷达监控及广播式自动相关监控方法在城市的低空使用时出现漏洞较多、丢失率较高的严重问题,目前感知系统的建设大多基于单一技术方式,各种探测装置之间缺少相互配合的调度系统,感知系统的布局一般都是按照各自的运行模式进行部署的,感知资源的空间分布和飞机的实际飞行活动区域的热力图相差很大,本文旨在针对城市这种特殊环境对于感知技术的限制条件及相应的解决方法进行探讨,通过环境适配、资源适配以及信息适配三个方面对相关的问题进行逐一梳理。

1 城市低空感知的环境约束及其技术适配

1.1 密集建筑群对电磁探测的遮蔽与多径干扰

城市低空区别于开阔空域的本质特征在于密集建筑群构成的空间形态对电磁波传播施加了强烈的边界约束,这种约束从信号衰减与多径叠加两个方向同时削弱常规探测设备的有效覆盖能力。建筑物立面充当电磁波的反射面将发射信号拆解为直射波与多条反射波,各路径信号抵达目标与接收端时的相位差异在叠加后形成幅度衰减或增强的干涉图样,该图样的空间分布随接收位置变化而剧烈变动。街道峡谷区域两侧的高层建筑将探测电磁波限制于狭窄空间内,街道走向与波束入射方向的夹角直接决定了遮蔽区的宽度与延伸距离,夹角趋于垂直时遮蔽区迅速扩展至整条街道范围。

1.2 城市电磁背景噪声的时空变化与频段选择约束

城市空间内广泛分布的移动通信基站、广播电视发射塔与各类无线终端共同构成了强度持续变化的电磁背景噪

声场,该噪声场的频谱占用状态在昼夜之间与不同功能区之间存在数量级的差异,对探测设备的工作频段选择施加了苛刻限制。探测系统的工作频率须部署于背景噪声相对洁净的频谱窗口之中,窗口的位置与宽度随城市功能区类型与时段变化而漂移,固定频率的单模探测设备必然在某些时段面临信噪比急剧恶化至探测阈值以下的困境^[1]。频段选择的另一约束来自航空无线电导航与通信业务对特定频段的独占性保护要求,可供低空探测使用的频率资源在排除上述保护频段之后所剩极为有限。

1.3 低空飞行目标多样性对探测参数的多目标适配要求

城市低空通航飞行器覆盖了从微型多旋翼无人机到中型电动垂直起降飞行器的广阔范围,各类目标在雷达散射截面、飞行速度与典型巡航高度等参数上相差数个量级,一套固定的探测参数组合无法同时适配全部目标类型。微型无人机的散射截面可低至飞鸟量级,为捕捉此类目标而提高接收增益将不可避免地抬升系统对建筑物回波与气候杂波的敏感程度。不同飞行器的任务剖面占据不同的高度层与航路走廊,高度层的分布差异要求探测系统在垂直方向上具备可调变的波束指向与扫描策略以将能量聚焦于目标密度最大的空域层次。

2 多源感知资源的协同部署与动态适配调度

2.1 雷达与光电探测手段在城市街谷环境中的互补边界

雷达探测与光电探测在工作机理上分别依赖电磁波反射与目标热辐射或可见光反射,两种手段在城市街谷环境中的效能互补关系建立在各自失效条件的时空错位基础之上,这种错位为协同探测提供了基本的逻辑依据。雷达波束能够穿透一定程度的雨雾与烟尘,在恶劣

气象条件下维持基本的目标探测与测距能力,但城市密集建筑群造成的多径反射使雷达在街谷环境中面临目标镜像与虚警激增的困扰,目标真实位置与镜像位置之间的几何关系随建筑物布局变化而改变,从回波数据中剔除镜像需耗费大量计算资源且难以彻底根除^[2]。光电探测设备依靠目标与背景的温度差异或光照反射差异形成图像对比度,其空间分辨率远高于常规雷达因而能够提供目标外形轮廓与运动姿态的精细信息,但光电设备的工作效能严重受制于能见度条件与光照角度,夜间低照度与大雾天气下探测距离急剧压缩至仅剩百米量级。两种手段的互补在时间维度上表现为雷达全天候可用而光电在晴朗日间可达最佳状态,在空间维度上则表现为雷达在开阔空域覆盖范围广而光电在狭窄街谷中对遮蔽区后方的目标完全无能为力,互补关系的实际利用须在具体空域网格中动态评估两种手段的可用置信度并按置信度分配各自的目标确认权重。

2.2 固定感知节点与机动补盲单元的联动覆盖策略

固定感知节点以雷达站与光电转台为主要形态,其布设位置经过前期空域覆盖仿真优化后基本确定了各节点的监视责任区,但固定节点的覆盖范围在建筑物遮蔽区与电磁阴影区内存在无法通过增加发射功率加以填补的永久性盲区,此类盲区的空间分布随城市建设的推进而持续变动。机动补盲单元借助车载或系留气球平台搭载轻量化探测设备,可依据空域管理系统的实时指令移动至盲区附近实施定向补盲,补盲单元与固定节点之间的联动成效取决于盲区位置的快速定位精度与补盲单元到达目标位置的时间响应速度。补盲资源的数量相对于城市中动态涌现的遮蔽盲区而言极为有限,补盲单元的调度须遵循优先级规则以将有限资源投入安全风险最高的盲区位置,优先级排序的依据涵盖盲区内飞行活动的预期密度、盲区与周边关键设施的距离以及盲区的持续时长。固定节点与补盲单元之间的数据链路质量决定了补盲效果能否被有效整合进入全域态势图像之中,补盲单元处于移动状态时其自身定位精度与数据传输稳定性均较固定节点有所下降,补盲数据在融合处理时须降低其权重系数以避免低质量数据污染整体态势判断。

2.3 空域动态需求变化驱动下的感知资源重分配机制

城市低空飞行活动的时空分布并非均匀恒定,工作日早晚时段配送无人机集中起降形成特定的通勤航路走廊,周末商业区的低空游览飞行增加而配送需求减少,大型活动期间特定空域的瞬时飞行密度可达到日常水平的数倍以上。感知资源若以最大需求状态作为部署基准则将在大部分时间内处于严重闲置状态,若以平均需求

状态部署则在需求峰值时段面临感知能力不足的安全风险,动态需求驱动机制的目标在于使感知资源配置与空域使用强度之间维持实时的匹配关系。重分配机制的实施需建立空域需求短期预测模块与感知资源配置优化模块之间的闭环连接,预测模块依据历史飞行计划与实际航迹数据推演未来数小时内的空域占用热力分布,优化模块以热力分布为输入调整各感知节点的工作模式与扫描策略^[3]。重分配的执行受到物理设备响应能力的制约,雷达天线的波束扫描范围调整受制于伺服机构的转动速率,光电设备的变焦与云台转向需要数秒至数十秒的稳定时间,机动补盲单元的位移速度更是直接限制了重分配的空间覆盖速率,感知重分配方案必须将上述执行层面的动态响应时延纳入约束条件加以求解。

3 感知数据的融合处理与目标状态精准判定

3.1 多传感器目标航迹的时空配准与关联确认

同一个目标在不同的传感器视场中所得到的观测值在时间标记、空间坐标及属性描述上都存在着很大的差异,要将这些观测值准确地分类到同一个目标的航迹关联过程中需要对时空基准进行调整,校准的质量直接影响到关联的结果。时间配准问题来源于各传感器自身的授时系统独立工作以及信息传播时延不同步的问题,同一时间发生的事件在不同的传感器采集的数据中可能会有几十毫秒甚至几秒钟的时间差,对于快速飞行的目标来说这个时间差会使它的位置观测沿着航迹的方向偏移几十米。空间配准就是把不同的传感器所使用的地理坐标系统以及海拔高度基准线都统一到一个参考系统之下,雷达测量结果是基于天线所在地的极坐标系下的坐标值给出的,光学传感器的结果是以视场中心为原点的像素坐标系下的坐标值给出的,ADS-B报文是以经纬度、高度的世界坐标系中的坐标值给出的,各种坐标系之间的转换参数如果有细微的错误,那么在城市建筑物林立的情况下就会把目标关联到错误的建筑物上。传统的关联判定方式以航迹之间的空间接近度和速度相同性作为主要标准,但是在城市里多次反射形成的大量的虚假航迹情况下依靠空间距离判断容易把虚警误判为真实的目标,关联后的可信度还需要借助目标属性特征进行二次检测,目标的雷达散射截面积变化规律以及光学图像中的形状特征都可以作为身份识别的补充材料。

3.2 低信噪比环境下目标检测置信度的可控提升途径

城市低空探测中目标回波信号经常因传播衰减与背景干扰的共同作用而沉入噪声基底之下,常规的固定阈值检测方法在此类低信噪比条件下将面临检测概率骤降或虚警概率激增的两难处境,检测置信度的可控提升须

从信号处理与数据处理两个层面协同发力。信号处理层面将多脉冲相干积累与非相干积累加以组合运用,相干积累利用目标回波相位的确定性特征实现信号功率的信噪比增益,积累脉冲数目的增加可使检测阈值在不提升虚警率的前提下显著降低,但积累时间窗口的延长将削弱雷达对机动目标的跟踪连续性。数据处理层面则采用航迹起始与航迹维持的门限逐级放宽策略,单次检测的置信度设置较低以保留微弱目标的初始发现机会,同一目标在连续多个扫描周期中均被观测到之后才将其确认为真实航迹,时间维度的累积确认机制以延迟输出为代价换取了虚警率的有效压制^[4]。检测置信度的提升存在明确的收益递减拐点,越过该拐点后继续增加信号积累量或延长航迹确认时间所获得的置信度增量趋于微小,代价则是跟踪数据率的持续下降与系统反应时间的持续延长,最优置信度区间的选取须根据目标速度与机动性设定差异化标准。

3.3 融合态势图像生成中的不确定性量化与传递抑制

多源感知数据融合的产出成果是将各传感器的不完整观测加以整合后形成的统一态势图像,该图像的不确定程度取决于输入端各观测值的不确定性与融合算法对各输入数据权重分配方式的综合作用,不确定性在融合过程中的传递与放大效应若是失控将使最终的态势判断失去可靠依据。各传感器观测值的不确定性来源互不相同,雷达测距误差源于计时精度与信号传播速度的标定偏差,光电测角误差源于云台指向精度与振动干扰,ADS-B位置误差源于卫星导航系统本身的定位漂移,各类误差的统计分布特征在融合之前须以协方差矩阵的形式加以量化描述。融合算法中常用卡尔曼滤波框架以预测状态与观测值之间协方差矩阵的相对大小来动态调节增益系数,协方差矩阵估计的准确性直接决定了增益系

数的优化程度,过于乐观的协方差估计将使滤波器过度信赖预测而忽视观测中的真实信息,过于保守的估计则使滤波器对观测噪声过度敏感^[5]。不确定性在航迹维持时间轴上的传递表现为滤波器估计协方差的逐次递推积累,当传感器观测出现中断时协方差矩阵在预测步骤中单调膨胀直至下一帧观测抵达才能被压缩,中断时长若超出临界值则协方差膨胀至目标位置散布范围覆盖整个城市街区,此时恢复跟踪须从头执行目标捕获程序而不是依赖已发散的状态预测。

结语

城市低空通航全域感知适配技术体系的本质是将感知资源配置从静态规划转变为对空域需求动态变化的响应过程,这种转变要求突破传统监视系统中各类探测设备各自独立运转的架构惯性。城市电磁环境的时变性要求感知体系具备频率资源的自适应调整能力,多源异构数据的融合须跨越时空基准统一与目标关联确认两道门槛之后方能服务于低空安全管理决策,感知体系的设计须将适配于覆盖率之上作为首要原则加以贯彻。

参考文献

- [1]张宏权,杨恒,李虎军,等.基于通信感知一体化的多基站无源协作感知技术[J].中兴通讯技术,2026,32(2):27-35.
- [2]黄雨欣,赵国锋,徐川,等.孪生仿真系统下低空无人机通信图谱及路径规划[J].电讯技术,2026,66(4):584-591.
- [3]蔡铭,马川淇,朱华飒,等.低空运行安全保障技术研究综述[J].交通运输工程与信息学报,2025,23(3):1-26.
- [4]夏仕达,王琦,杜加懂,等.面向低空经济的数字化网络架构及标准化研究[J].移动通信,2026,50(4):24-33.
- [5]顿友军.5G-A低空通感技术网络规划及应用方案研究[J].通讯世界,2026,33(1):24-26.