

低空无人机探测与反制技术研究

苏永亮 汤为伟 瞿勤阳

南京航天国器智能装备有限公司，江苏南京，210000；

摘要：针对低空无人机带来的安全风险，研究了多种探测与反制技术。探测方面，分析了雷达、光电、声学及无线电频谱探测的工作原理及应用特点。反制方面，探讨了干扰阻断、直接毁伤、拦截捕获和控制劫持等技术路径，并结合不同场景需求进行对比分析。结合当前技术发展趋势，提出了多源融合探测、智能化反制及定向打击等方向，为构建高效、精准的无人机防控体系提供技术支持。

关键词：低空无人机；探测技术；反制技术

DOI：10.69979/3041-0673.25.01.075

1 低空无人机探测技术

1.1 雷达探测

雷达探测是低空无人机监测体系中不可或缺的组成部分，通常采用脉冲多普勒雷达、合成孔径雷达和连续波雷达等形式进行目标探测与参数测量。针对小型无人机回波截面积较小的挑战，雷达系统可选用高频段毫米波或太赫兹波，以提升对微小目标的识别与分辨能力。在实际部署中，一体化雷达可结合先进算法，通过多重脉冲压缩及多普勒滤波来提取目标速度和距离特征，进而判别无人机与飞鸟或杂波的不同散射特性。

1.2 光电探测

光电探测主要利用可见光摄像机、红外热像仪以及激光测距仪等设备，通过光学成像和光谱分析来对低空无人机进行识别与跟踪。为提升感知水平，光电系统常采用多传感器融合方式，将红外探头识别目标的热特征与可见光摄像头捕捉外形信息相结合，并辅以图像增强与目标识别算法，以提高对小型、多旋翼无人机的准确检测能力。在夜间或光照条件不足的情境中，红外成像仪可通过温度差来定位目标；在强光或眩光影响下，恰当调节滤光片和曝光时间可以实现更稳定的观测。

1.3 声学探测

声学探测利用麦克风阵列记录空间噪声并提取频谱特征，进而通过特征库匹配来识别无人机特有的旋翼噪声或发动机振动声纹。虽然小型无人机噪声能量并不高，但在安静环境下可利用多通道麦克风及波束形成技术，实现目标方位和距离的粗定位。相比于雷达或光电探测手段，声学探测在强电磁干扰或遮挡严重的环境中

也能发挥一定作用；然而，其对背景噪声与天气条件的敏感度较高，在城市空域等嘈杂环境中，需要采用高效的信号处理和噪声抑制算法，才能保有较高的探测置信度。

1.4 无线电频谱探测

无线电频谱探测主要针对无人机所使用的遥控信道、数据链路和导航信号等进行实时监测，以掌握其数据传输和控制指令的特征。先进的频谱分析仪与软件无线电平台可截获 2.4GHz、5.8GHz 乃至更多频段的通信信号，对其调制方式与数据包特征进行解调和识别，从而区分不同类型的无人机及操控方式。若配备多点分布式侦测系统，便可结合到达时间差或到达角度估计手段，进一步推算目标所在位置。此类方法对低空环境下的无人机活动极具敏感度，尤其适合在机场、政府机构等关键区域部署，实现对潜在威胁的快速预警。

2 低空无人机反制技术

2.1 干扰阻断类

2.1.1 电磁干扰

电磁干扰通常通过大功率发射机向无人机遥控及数据链路的频段注入干扰信号，从而令其通信链路中断，失去外部操控或视频回传功能。实践中常见的做法是利用定向天线对特定频段进行高能量注入，或采用宽带电磁辐射手段让无人机难以维持正常指令收发。与干扰源功率及定向性密切相关的是电磁辐射对周边系统的潜在影响，因此在设计干扰设备时，要通过波束限制和功率控制来降低对友方通信系统的负面效应。

2.1.2 声波干扰

声波干扰基于大功率定向声波发生器，向无人机的传感器和动力系统施加异常声学压力波场，以破坏其飞行稳定性或控制系统。小型多旋翼无人机普遍依赖陀螺仪、气压计和声学定高模块来保持悬停与姿态，而当外界声压过大时，内部传感器测量值会出现显著偏差，导致飞控系统难以修正姿态甚至坠落。声波干扰的有效距离通常有限，且需要对不同型号无人机的噪声响应特点进行试验和标定，以获得更理想的干扰强度。

2.1.3 导航信号干扰

导航信号干扰主要针对无人机常用的GPS、GLONASS、北斗等卫星定位系统，或地面差分信号进行欺骗或阻断。常见方法包括发射伪GPS信号，令无人机在机载接收端产生错误位置判定，从而偏离预定航线，甚至飞离关键目标区域；也可采用强功率干扰覆盖卫星导航频段，让无人机无法获取精准定位数据，出现漂移或返航故障。某些高端无人机具备多源导航能力，如惯性导航与视觉导航互补，单一干扰手段可能难以使之完全丧失定位功能，因此实际应用中往往结合电磁干扰和GNSS欺骗信号，共同削弱无人机的航迹稳定性。

2.2 直接毁伤类

2.2.1 传统防空武器毁伤

使用常规防空武器（如防空火炮、高射机枪和小口径导弹）对低空无人机进行直接射击或爆破是最传统的反制方式。相对于大型有人飞行器，小型无人机的飞行速度较低、外形脆弱，一旦被弹片或高速弹丸击中便容易发生结构损坏。然而，由于低空无人机通常体型较小、雷达散射截面不足，以及可能在城市环境或人口密集区内活动，传统防空火力在瞄准精度与附带损伤方面面临严峻考验。为增强作战效果，可借助小口径速射炮与光电火控系统实现高精度点射，但仍需评估对周边环境的连带破坏，尤其在敏感区域或公共场所更须审慎使用此类毁伤手段。

2.2.2 激光武器毁伤

激光武器通过高能激光束集中照射无人机外壳或敏感部件，能够在极短时间内造成材料过热熔化或传感器干扰。相比常规火力，激光打击具有速度快、精度高的优势，且可在较短的反应时间内对目标实施定点“烧蚀”。在实际部署中，高能激光系统常配合光电跟踪平台，实现目标捕获与稳态照射。不过激光束在远距离大气传输过程中会受到衰减和散射影响，对气象条件要求

较高，雨、雾或大风等环境中实战效能会明显下降；另外，由于激光武器设备造价昂贵，对能源供应和冷却系统也有一定依赖，需要在固定或车辆平台上才能稳定运行。

2.2.3 微波武器毁伤

微波武器借助高功率微波束作用于无人机的电子电路和飞控系统，从而令其处理器、电机控制模块产生过载或烧毁。与激光武器相比，高功率微波在目标精确度上略有不足，但具备较强的面杀伤能力，能够在一定范围内同时削弱多架无人机的电子功能。同时，微波武器对气象干扰的敏感度相对较小，一旦产生足够的辐射功率，便可覆盖一定空域，迫使低空无人机无法正常工作。

2.3 拦截捕获类

2.3.1 抛网捕捉

抛网捕捉采取在无人机或地面设备上搭载网弹发射装置，当侦测到目标接近时，通过远程激发网弹，让捕捉网包裹并缠绕敌方无人机的旋翼或机身，进而使其无法维持正常飞行状态而坠落或被拖拽。此方法针对飞行速度较慢、机动灵活性有限的多旋翼无人机效果较好，且对周围环境的附带损伤相对可控。值得注意的是，若目标无人机配备较高功率的动力系统或外壳结构坚固，抛网的强度与材质应经过严格设计，以实现有效捕捉而不被轻易挣脱。

2.3.2 鸟类捕捉

利用训练有素的捕食性猛禽（例如鹰或隼）来拦截小型无人机是颇具创新性与可行性的方法。猛禽对空中移动物体极为敏感，且具备相当的速度与抓握能力，当它们受到指令或自身识别后，即可对疑似目标发起攻击，将无人机摄入利爪或直接击落。此方式对低空、小型多旋翼机的捕获效率较高，同时不会在地面造成大规模损毁。然而，鸟类对环境因素及本身状态的依赖度较高，其训练成本也不容忽视，实际使用需要综合考虑鸟类的健康与作战需求，并配合其他技术手段以构建更完善的反制体系。

3 发展趋势

3.1 探测技术发展趋势

在探测技术方面，未来会倾向于多源融合与智能感知的发展路径。具体而言，雷达、光电、声学和无线电

频谱等不同类型的传感器通过数据共享与深度融合，能提高探测的多样性与准确度；同时借助人工智能与大数据分析，对海量监测信息进行实时处理与目标识别，以缩短预警反应时间。随着高分辨率传感器的出现以及网络化布设的普及，分布式多平台协同感知将成为主流，通过在城市建筑、高山哨所和移动载具上部署小型传感器节点，实现对重点区域的24小时全域监控。

3.2 反制技术发展趋势

3.2.1 “软杀伤”

未来“软杀伤”类反制手段将强化干扰精度与多频段协同，利用更高智能化的电磁干扰系统针对特定通信协议或导航信号进行精细化阻断，从而在干扰强度与辐射安全之间维持平衡。与此同时，基于协议识别与仿真注入的劫持技术也在不断升级，开发者会在无人机内部植入更多加密算法和姿态容错机制，反制系统则需通过高级算法与快速响应硬件来与之对抗。在城市安全与公共活动防护中，更可考虑采用轻量化、定向性更强的干扰设备，以免对周边合法无线电通信造成广泛影响。

3.2.2 察打一体

传统的探测与拦截往往分属不同系统，然而在应对高速或群体化无人机威胁时，分布式察打一体平台将展现显著优势。此类平台可在执行巡逻或安保任务时，实时侦测周边空域情况，并在判定危险目标后，立即采用内置的微型导弹或激光武器进行打击，缩短反应链路并减少指挥延迟。随着无人机蜂群作战模式的兴起，察打一体平台的快速机动与多目标处理能力变得愈发关键，

它们不仅要在极短时间内完成目标识别，还需实现快速火控分配与毁伤评估。

3.2.3 定向打击

定向打击技术注重高能束流（如激光、微波等）的能量聚焦与瞄准效率，通过多种传感器配合精准光学或微波天线，对目标实施快速而精确的能量投送，以损毁关键部件或令其电子设备当机。随着新型光束控制与相干合成技术的成熟，高能激光器的效能比也将得到改进，微波武器在峰值功率与射束覆盖范围上会持续提升。

4 结语

低空无人机对社会经济与军事领域均具有重要意义，但其潜在威胁不容忽视。为应对小型、多样化的无人机给公共安全和国防安全带来的挑战，需要在探测环节和反制环节展开深入研究。雷达、光电、声学及无线电频谱等探测手段正不断融合并引入人工智能算法，干扰阻断、直接毁伤、拦截捕获和控制劫持等反制方式也在持续升级。面向未来，智慧化、网络化与协同化将成为低空无人机管理和防护系统的重要发展方向，不论是在军用还是民用场景中，都应构建多层次立体防控体系，以便稳步维护空域秩序并合理利用无人机所带来的技术红利。

参考文献

- [1] 吴浩,徐婧,李刚.无人机探测与反制技术发展现状及建议[J].飞航导弹,2020,(09):89-95.
- [2] 房印闻,韩辉云,张华.低空无人机探测反制的关键技术研究[J].中国新通信,2020,22(22):55-56.