



专栏：低空通信

# 低空无人机侦测、察打设备电磁兼容性分析及部署方案

王锋<sup>1</sup>, 沈伟丽<sup>2</sup>, 李益锋<sup>1</sup>, 周亮<sup>1</sup>, 俞彬<sup>1</sup>

(1. 华信咨询设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310000;  
2. 中国电信股份有限公司湖州分公司, 浙江 湖州 313000)

**摘要:** 随着低空经济的快速发展, 低空无人机应用越来越广泛, “黑飞”事件频频发生, 如何科学部署侦测、察打设备成为当前亟待解决的关键问题。围绕低空无人机防控需求, 首先, 开展低空无人机侦测、察打设备电磁兼容性分析, 梳理电磁兼容性计算流程并输出结论, 为设备部署提供参考。其次, 分析无人机侦测、察打原理, 并基于不同设备在仿真实验场景下的特性, 给出不同设备站间距部署参考指引。最后, 基于上述研究结果, 提出低空无人机侦测、察打设备的部署方案, 以期为后续规划与研究提供工作提供参考。

**关键词:** 低空无人机; 侦测设备; 察打设备; 电磁兼容; 部署

中图分类号: TN03; V279

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.DXKX250505

## Electromagnetic compatibility analysis and deployment scheme of low-altitude UAV detection & countermeasure equipment

Wang Feng<sup>1</sup>, Shen Weili<sup>2</sup>, Li Yifeng<sup>1</sup>, Zhou Liang<sup>1</sup>, Yu Bin<sup>1</sup>

1. Huaxin Consulting Design & Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310000, China  
2. Huzhou Branch of China Telecom Co., Ltd., Huzhou 313000, China

**Abstract:** With the rapid development of the low-altitude economy, the application of low-altitude unmanned aerial vehicles (UAV) has become increasingly widespread, and the frequent occurrence of "illegal flights" has made the scientific deployment of detection and countermeasure equipment an urgent issue to be addressed. Focusing on the requirements for low-altitude UAV prevention and control, the electromagnetic compatibility (EMC) analysis of low-altitude UAV detection and countermeasure equipment was first conducted. The EMC calculation process was systematically examined, and conclusions were drawn to provide a reference for equipment deployment planning. Subsequently, the principles of UAV detection and countermeasures were analyzed. Based on the characteristics of different equipment under simulated experimental scenarios, guidelines for the station spacing deployment of various devices were proposed. Finally, based on the above research results, a deployment scheme for low-altitude UAV detection and countermeasure equipment was presented, aiming to offer insights for subsequent planning and research work.

**Key words:** low-altitude UAV, detect equipment, countermeasure equipment, electromagnetic compatibility, deployment

收稿日期: 2025-08-21; 修回日期: 2026-01-06

通信作者: 李益锋, liyf.hx@chinaccs.cn

## 0 引言

随着 5G 网络的日趋完善与无人机技术的日益成熟，无人机应用范围不断拓展。无人机在日常物流配送、城市治理、应急救援等领域得到了广泛应用，也在军事行动中发挥着关键作用。例如，在俄乌冲突中，无人机被大量用于侦察、电子对抗等。然而，在日常应用场景中，由于部分操作人员法律意识淡薄、监管难度大，无人机“黑飞”行为频频发生，导致航班秩序扰乱、敏感信息泄密等事故频发，对国家公共安全造成严重威胁。例如，2024 年，天津机场附近曾发生无人机“黑飞”事件，致使多架次航班延误或被迫备降<sup>[1]</sup>。常见无人机干扰情形见表 1。

为有效管控无人机，无人机侦测与反制技术<sup>[2-6]</sup>相继发展，主要手段包括无线电侦测与察打一体化处置等。然而，这些方法在复杂电磁环境下的信号识别仍面临挑战，且实际部署方案的选择也存在一定困难。本文首先围绕无人机系统电磁兼容性，分析其理论基础与评估流程，通过天线隔离度的计算，为系统规划提供理论参考。其次，研究无线电侦测技术的基本原理、常用设备及相关仿真方法，以期为无人机管控部署方案提供参考与建议。

## 1 无人机侦测、察打设备电磁兼容性分析

### 1.1 电磁兼容性分析流程

在设备部署区域（如机场）内，通常已存在

各类无线电设施，包括运营商基站、航空无线电导航台、检测雷达以及内部通信与监测设备等。在部署无人机侦测、察打设备时，为避免新旧设备间互相产生干扰，必须对其安装位置进行合理规划。电磁兼容性分析的核心目标是计算设备间的天线隔离度。天线隔离度指两个天线终端间的路径损耗，即从干扰站发射单元输出端口到被干扰站的路径损耗。无人机系统的电磁兼容性分析流程如图 1 所示。

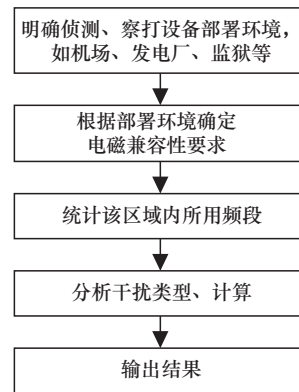


图 1 电磁兼容性分析流程

从图 1 可以看出，电磁兼容性分析需紧密结合实际部署区域展开。首先，应明确该区域内所有在用无线电频率，可通过扫频仪等设备进行频段检测。然后，参照国家针对不同区域制定的电磁兼容性要求，对潜在的干扰类型进行分析。最终，基于上述步骤输出电磁兼容性分析结果，为设备部署提供依据。

系统干扰示意图如图 2 所示。由图 2 可知，

表 1 常见无人机干扰情形

类型	区域	潜在后果
航空安全威胁	机场禁飞区 低空冲突	“黑飞”无人机可能撞击客机，导致航空事故 干扰直升机救援、军事演习等低空飞行任务
关键设施入侵	政府/军事区域 能源设施	窃密或破坏 靠近变电站、油库可能引发系统故障或爆炸
公共安全事件	人群密集区 住宅、酒店等私人场所	无人机失控坠落可能砸伤行人 隐私侵犯
恶意行为	边境/高价值设施附近 特殊设施周边	运输违禁品、爆炸物 干扰通信、导航系统



系统间的干扰类型主要有杂散干扰、互调干扰和阻塞干扰。

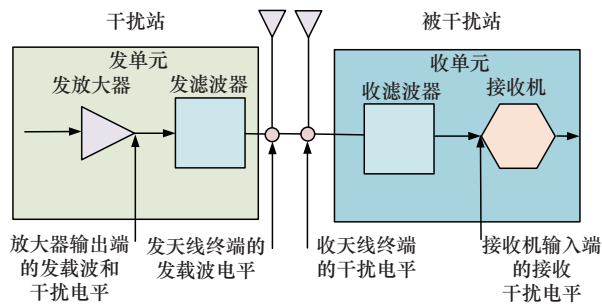


图2 系统干扰示意图

### 1.2 电磁兼容性计算过程及结论

无人机使用频段见表2<sup>[7]</sup>。表2显示，国内无人机使用的无线电通信频率包括：1 430~1 444 MHz、2 400~2 476 MHz、5 725~5 829 MHz。无人机侦测、察打设备涵盖主要的常用频段范围，且在频段范围内实施电磁干扰，因此在频段外应配置高性能带通滤波器，确保自身的杂散不会外泄，以免影响其他通信。

国内4大运营商所用频段分布图如图3所示。根据图3，4大运营商低频包含700 MHz、800 MHz、900 MHz，中频包含1.8 GHz、2.1 GHz、2.3 GHz、2.6 GHz，高频包含3.5 GHz、4.9 GHz以及毫米波。根据表2，国内无人机侦测、察打设备使用的无线电通信频率包含1 430~1 444 MHz、2 400~2 476 MHz、5 725~5 829 MHz，949~960 MHz

与1 430~1 444 MHz频段间隔最近为470 MHz，1 715~1 735 MHz与1 430~1 444 MHz频段间隔最近为266 MHz，2 320~2 370 MHz与2 400~2 476 MHz频段间隔最近为30 MHz，2 515~2 675 MHz与2 400~2 476 MHz频段间隔最近为39 MHz，4 900~4 960 MHz与5 725~5 829 MHz频段间隔最近为765 MHz。

根据上述频段间隔分析，无人机侦测、察打设备与现有基站所用频段最小间隔为30 MHz。为保证无人机侦测、察打设备与现网设备之间不会产生互相干扰，需对2 320~2 370 MHz系统与2 400~2 476 MHz系统之间的干扰隔离进行分析。当前无人机侦测、察打设备使用Wi-Fi Beacon方式广播发射识别信息，并由地面无人机侦测、察打设备接收Wi-Fi Beacon信号。

系统间的天线隔离度通常用最小耦合损耗（minimum coupling loss, MCL）表示。MCL指发射基站到接收基站之间的路径损耗，包括天线增益和馈线损耗。为实现足够的隔离度，需要遵守以下3条规避准则。

(1) 杂散干扰规避准则：被干扰站从干扰站接收到的杂散辐射信号功率应比它的接收机噪底低7 dB，被干扰终端接收到的杂散辐射信号强度应比它的接收机噪底低0 dB。

(2) 互调干扰规避准则：在被干扰站处生成

表2 无人机使用频段

频率	频段范围	主要使用范围	频谱许可	等级	备注
433 MHz	433.05~434.79 MHz	欧洲	CE	民用	
868 MHz	863~870 MHz	欧洲	CE	民用	
915 MHz	902~928 MHz	美国	FCC	民用	
1.4 GHz	1 430~1 444 MHz	中国	SRCC	民用/警用	
2.4 GHz	2 400~2 476 MHz	中国	ISM 频段	民用	
5.1 GHz	5 030~5 100 MHz	日本	MIC	民用	
5.8 GHz	5 725~5 829 MHz	中国	ISM 频段	民用	
600 MHz	—	—	—	政府/军用	特种无人机
L波段	1~2 GHz	—	—	军用/专业级	军用无人机加密遥控、卫星中继通信
C波段	4~8 GHz	—	—	军用/专业级	高端无人机高清图传或雷达信号

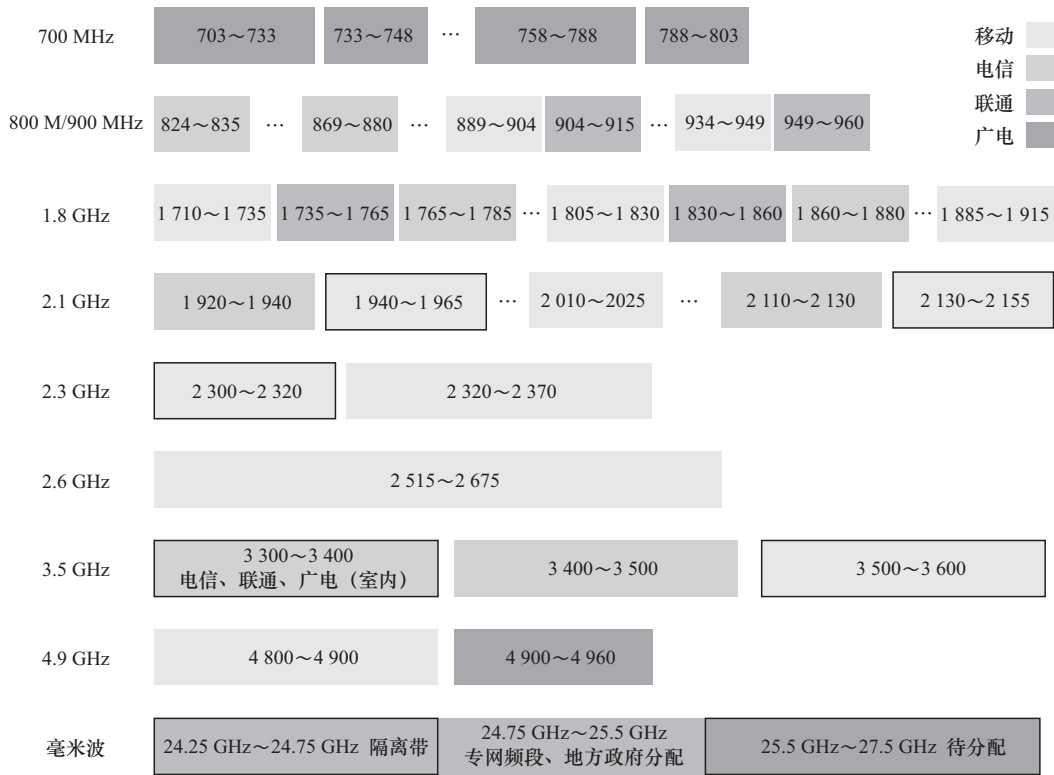


图3 国内4大运营商所用频段分布

的三阶互调干扰电平低于其接收机噪底 7 dB。

(3) 阻塞干扰规避准则：被干扰站从干扰站接收到的总载波功率应比接收机的 1 dB 压缩点低 5 dB。

如果满足了这个隔离度，被干扰基站的接收机灵敏度只下降 0.8 dB，被干扰终端的接收机灵敏度只下降 3 dB，这对于绝大多数系统来说都是

可以接受的<sup>[8]</sup>。杂散干扰和阻塞干扰计算示例如图 4 所示。

由于两系统间存在 30 MHz 的隔离频带，在考虑其共站部署时，需重点分析杂散干扰和阻塞干扰。

(1) 杂散干扰

依据我国无线电管理机构型号核准相关标

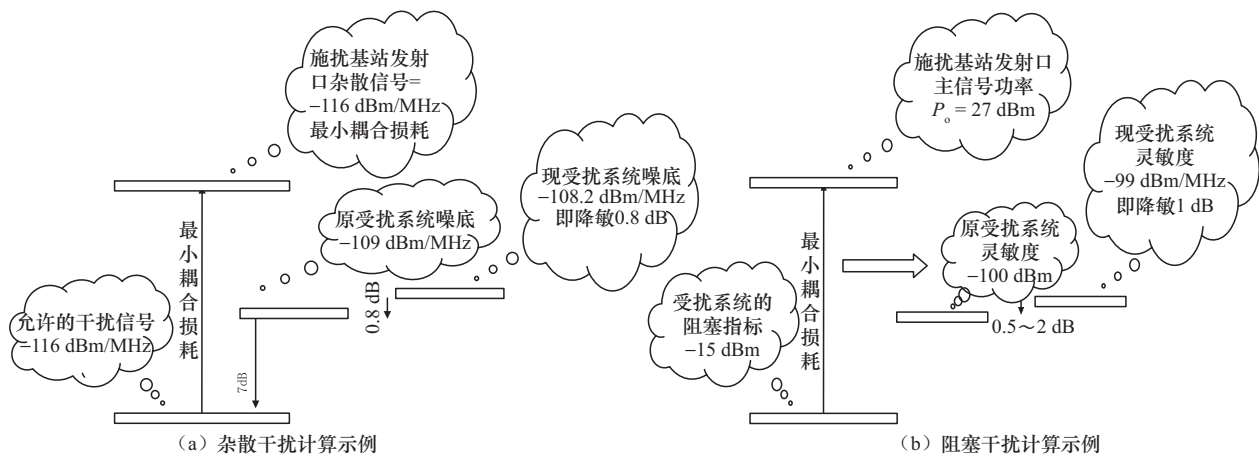


图4 杂散干扰和阻塞干扰计算示例



准，工作在2 400~2 483.5 MHz频段的系统，其杂散指标为-30 dBm/MHz。

假设2 300~2 370 MHz系统接收机的噪声系数为5 dB，则在1 MHz带宽内的噪底为： $-174+10\lg(1\text{ MHz/Hz})+5=-109\text{ dBm}$ 。

按照规避准则，发射杂散信号经空间耦合后，应低于接收机噪底7 dB。因此，所需最小空间耦合为： $-30-(-109-7)=86\text{ dB}$ 。

## (2) 阻塞干扰

根据3GPP协议36.104中的指标，2 300~2 370 MHz系统在和2 400~2 483.5 MHz系统共存时，其接受阻塞指标为-15 dBm。

2 400~2 483.5 MHz系统最大发射功率为27 dBm，可得到2 400~2 483.5 MHz系统对2 300~2 370 MHz系统产生阻塞干扰所需要的最小隔离度为： $27-(-15)=42\text{ dB}$ 。考虑到2 400~2 483.5 MHz系统为高峰均比的宽带信号，此隔离度可再提高至57 dB。

综上所述，2 300~2 370 MHz系统对2 400~2 483.5 MHz系统的杂散干扰和阻塞干扰分别为：86 dB、57 dB。同理，参考上述过程可计算出2 400~2 483.5 MHz系统对2 300~2 370 MHz系统的杂散干扰和阻塞干扰分别为75 dB、66 dB，即隔离度要求不小于86 dB。因此，部署无人机侦测、察打设备时，应充分考虑隔离要求，防止其影响现有设备运行。

为进一步指导无人机侦测、察打设备的部署，通过量化分析，确定了实际工程中设备部署所需的垂直与水平隔离距离参考，为优化规划方案提供数据支撑。垂直与水平隔离距离的计算表达式如式(1)、式(2)所示。

$$H=28+40\lg(c/\lambda) \quad (1)$$

其中， $H$ 表示发射天线与接收天线之间的隔离度(单位为dB)； $c$ 表示发射天线与接收天线之间的垂直距离(单位为m)； $\lambda$ 表示波长(单位为m)。

$$H=22+20\lg(s/\lambda)-G_t-G_r \quad (2)$$

其中， $s$ 表示发射天线与接收天线之间的水平距离，(单位：m)； $G_t$ 、 $G_r$ 表示发射天线与接收天线连线方向上的增益。

根据上述隔离度计算结果和式(1)、(2)，可得垂直隔离距离和水平隔离距离分别为4 m、400 m。

在实际部署中，除运营商基站，某些特定区域还会使用特定频段进行通信。例如，根据《航空无线电导航台(站)电磁环境要求》(GB 6364—2013)，机场导航台使用108~117.975 MHz、225~400 MHz、5 031.0~5 090.7 MHz等频段进行通信；变电站等场所内的电力电子设备可能产生50/60 Hz低频磁场，对周边设备造成干扰。因此，在部署无人机侦测、察打设备时，需要针对特定区域的电磁环境开展电磁兼容性分析，以确保原有设备的正常运行。

## 2 无人机侦测设备仿真实验及部署方案

### 2.1 侦测原理及侦测设备简介

根据《民用无人驾驶航空器系统安全要求》(GB 42590—2023)关于识别信息报送的规定，无人机可分为合作类和非合作类两类。合作类无人机指主动报送识别信息的机型，通常称为“国标类”。非合作类指不对外主动报送识别信息，需要通过被动方式进行监测的机型。依据其所采用的通信技术，非合作类无人机可进一步分为合规无线电类、非合规无线电类和非无线电类(如有线、惯性导航、预编程等)，非合作目标是当前防控工作的重中之重<sup>[9]</sup>。无线电侦测系统示意图如图5所示。在工作过程中，侦测系统通过信号检测技术获取目标信号特征，进而解析出无人机机型、工作频段、方位等信息，并通过声光报警等方式对无人机的探测结果进行预警。侦测结果经网口传送至控制终端，最终在监管控制软件

上呈现。终端在接收到侦测结果后，可根据侦测到的无人机位置与频谱特征，自动触发无人机反制设备，对目标区域实施精准电磁压制，阻断其通信信号，迫使无人机返航或紧急降落，从而消除安全隐患。

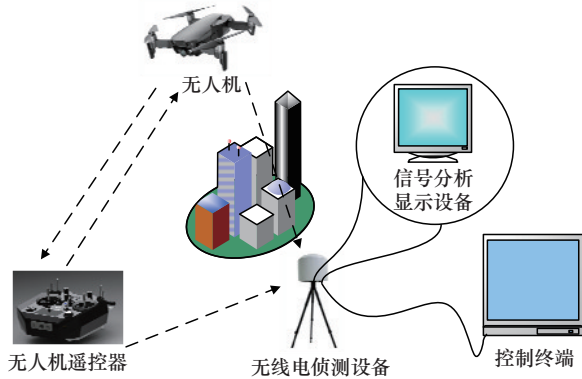


图5 无线电侦测系统示意图

常见探测技术可分为有源和无源两类<sup>[10-13]</sup>。有源技术指主动发射信号，经目标反射后接受其回波，经数字信号处理反推出目标的距离、方位、俯仰、速度及尺寸等参数，从而实现对目标的探测。无源技术不主动发射信号，而是被动接收目标辐射或反射的信号，获取目标状态信息，能够做到全天候连续监测。雷达是典型的有源探测设备，但是其难以探测非导体材料、慢速移动目标。光电设备、国际报文解析、协议解析及无线电频谱侦测等设备为无源设备，但其性能常受部署环境的影响。除此之外，常见的反制设备还包括无线电干扰、无线电欺骗、网捕及穿越机撞击等<sup>[14]</sup>。常见低空无人机侦测、察打设备如图6所示。

在实际设备选型与部署过程中，不仅要考虑探测精度，还要关注周边环境。例如，政府部门多位于市区，若部署有源设备可能引发周边居民投诉，则优先选择无源设备进行部署；而在机场周边，则可利用周边山体等地理条件布设雷达，以延伸探测距离，并结合无源设备

辅助识别“黑飞”无人机，形成多层次、互补的监测体系。



图6 常见低空无人机侦测、察打设备

## 2.2 仿真研究

### 2.2.1 仿真条件

为更精确模拟无人机侦测、察打设备覆盖效果，分区域进行设备部署，采用更加精确的Walfisch-Ikegami (WIM) 模型（也称WLL模型，Walfisch-Leeson-Lee）<sup>[15]</sup>和自由空间模型<sup>[16]</sup>进行仿真。其中，WLL模型支持2 GHz及以下频段范围，分为视距（line of sight, LOS）和非视距（non-line of sight, NLOS）两种情况，自由空间模型则支持全频段范围。

WLL模型LOS路径损耗如式（3）所示。

$$L_{LOS} = 42.6 + 26\lg(d) + 20\lg(f) \quad (d \geq 20\text{m}) \quad (3)$$

其中， $d$ 表示距离（单位为km）； $f$ 表示频率（单位为MHz）。

WLL模型NLOS路径损耗如式（4）所示。

$$L_{NLOS} = L_0 + L_{rts} + L_{msd} \quad (4)$$

其中，基础自由空间损耗 $PL_0$ 如式（5）所示。

$$L_0 = 32.4 + 20\lg(d) + 20\lg(f) \quad (5)$$

屋顶到街道的绕射损耗 $L_{rts}$ 如式（6）所示。



$$L_{rts} = -16.9 - 10\lg(w) + 10\lg(f) + 20\lg(h_{\text{roof}} - h_{\text{UE}}) + L_{\text{ori}} \quad (6)$$

其中， $w$  表示街道宽度； $h_{\text{roof}}$  表示建筑物宽度； $h_{\text{UE}}$  表示无人机高度； $L_{\text{ori}}$  表示街道方向修正， $L_{\text{ori}}=0$  dB 代表正交， $L_{\text{ori}}=-10$  dB 代表平行。

多重屏绕损耗  $L_{\text{msd}}$  如式 (7) 所示。

$$L_{\text{msd}} = L_{\text{bsh}} + k_a + k_d \lg(d) + k_f \lg(f) - 9\lg(b) \quad (7)$$

其中， $b$  表示建筑物间距， $L_{\text{bsh}}$  表示基站高度修正 ( $h_{\text{BS}} > h_{\text{roof}}$  时为 0)， $k_a$ 、 $k_d$ 、 $k_f$  表示环境相关系数 (城市核心区： $k_a = 54, k_d = 18, k_f = -4$ )。

### 2.2.2 仿真结果

为进一步指导工程实践，基于 Matlab 平台开展仿真分析。仿真基本参数设定如下：无人机飞行高度范围为 100~500 m，场景设置为城市环境；多面阵雷达部署高度 20 m，工作频段为 5.8 GHz，发射功率 30 dBm、采用 4 面阵结构，仿真半径为 5 km，信号传播模型选用自由空间模型。国际报文设备部署高度为 10 m，工作频段为 1.4 GHz、

发射功率 20 dBm，仿真半径为 2 km，传播模型采用 WLL 模型。

低空多面阵雷达仿真示意图如图 7 所示，国际报文仿真示意图如图 8 所示，低空多面阵雷达不同高度参考信号接收功率 (reference signal received power, RSRP) 统计结果见表 3，国际报文不同高度 RSRP 统计结果见表 4。

仿真结果表明，在 5 km 半径范围内，低空多面阵雷达不同高度下的平均最小 RSRP 为 -100.6 dBm。在低空区域内，平均 RSRP 随高度降低而下降，存在低空近距离探测盲区。因此，在实际部署中，如若要求覆盖区域的 RSRP 达到传统地面网络 -100 dBm 的标准，低空多面阵雷达站间距应小于 10 km。在 2 km 半径范围内，国际报文系统的平均最小 RSRP 为 -94.6 dBm。为实现有效覆盖，实际部署时国际报文设备的站间距应小于 4 km。因篇幅所限，仅展示上述两类设备的仿真结果。其他设备的部署间距可参照类似方法进行

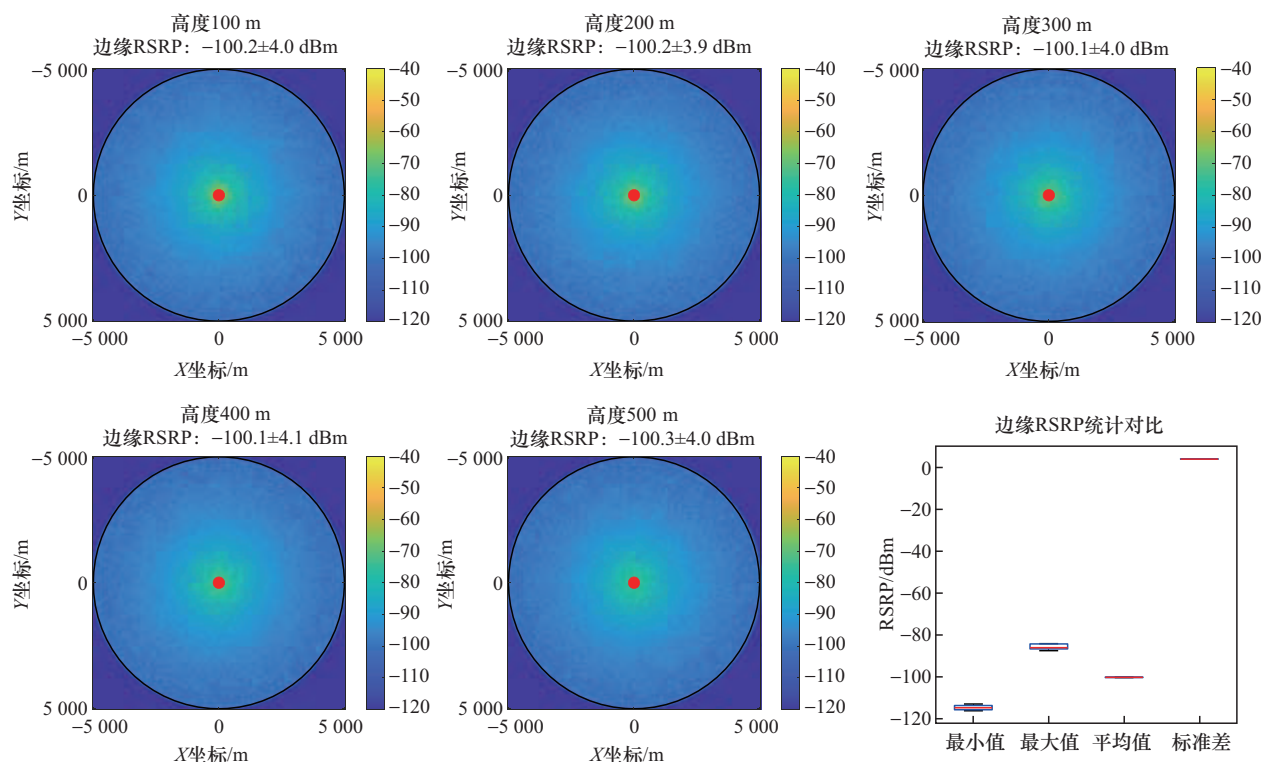


图7 低空多面阵雷达仿真示意图

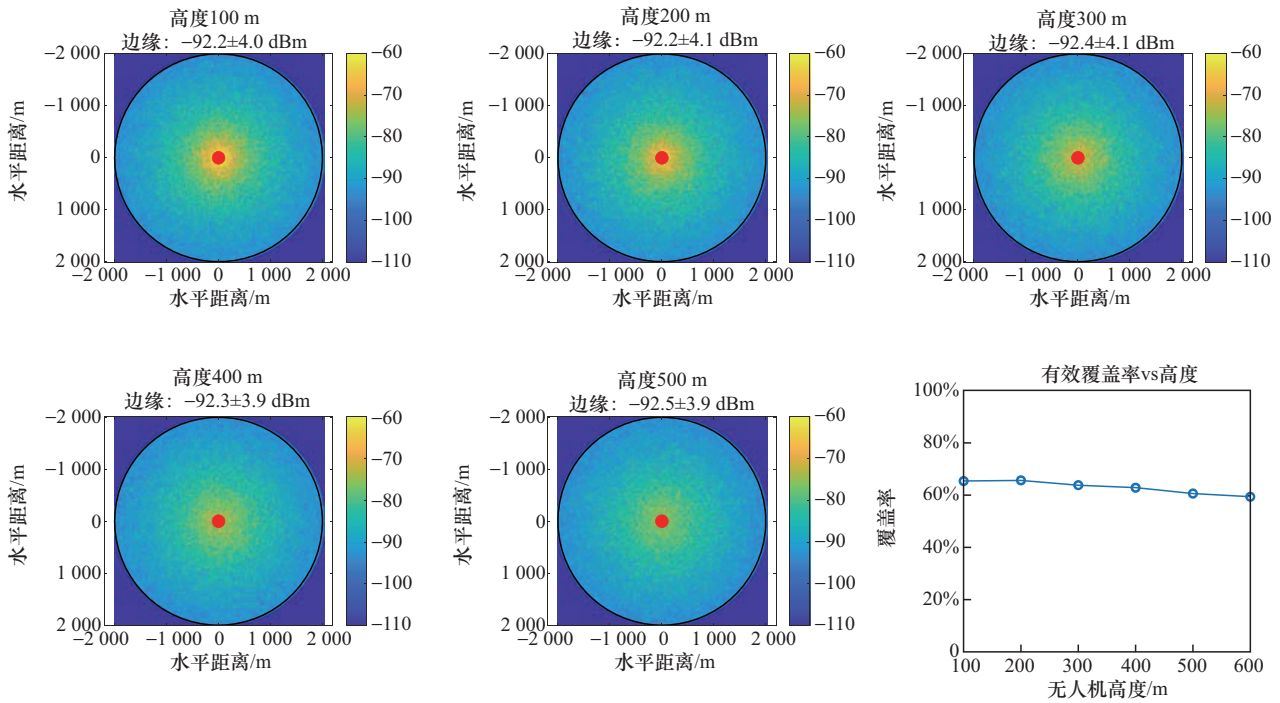


图8 国际报文仿真示意图

分析。基于相应仿真结果，建议光电探测设备的站间距小于 4 km、协议解析设备站间距小于 10 km、无线电频谱设备站间距小于 8 km。

表3 低空多面阵雷达不同高度 RSRP 统计结果

高度/m	最小/dBm	最大/dBm	平均/dBm
100	-114.4	-85.4	-100.6
200	-112.9	-87.5	-100.2
300	-115	-86.6	-100.1
400	-116.1	-84.1	-100.1
500	-115.7	-86.6	-100.3
600	-113.6	-84.2	-100.5

表4 国际报文不同高度 RSRP 统计结果

高度/m	最小/dBm	最大/dBm	平均/dBm
100	-108.2	-77.5	-92.2
200	-106.7	-78.4	-92.4
300	-107.1	-76.6	-93.1
400	-109.1	-78.9	-93.3
500	-108.2	-77.3	-93.5
600	-107.3	-79	-94.6

## 2.3 部署策略及方案研究

### 2.3.1 总体策略

针对不同威胁等级的“黑飞”场景，应合理部署侦测、察打设备。以“空间全覆盖、对象全覆盖”为目标，针对国标类、合规无线电类和非合规无线电类，运用固定式电子压制设备与便携式察打一体设备实施联合反制。针对非无线电类无人机（如采用有线、惯导、预编程等方式控制），则可依托管理单元部署网捕系统、撞击无人机、拦截无人机等硬毁伤手段，并可结合实际运用可移动激光硬毁伤设备，同步配备反制车等备勤移动设备。不同区域应采取不同的防控策略，依据风险等级实施分类分级重点监管。例如，在核心重点区域，可密集部署多种侦测和反制设备，构建多层次防御体系；一般区域，则侧重部署支持动态监控与快速介入管控的设备，提升监管精准度。

### 2.3.2 分区域、分场景部署

以机场为例，根据《无人驾驶航空器飞行



管理暂行条例》及相关空域管理规范<sup>[17]</sup>，部署无人机侦测、察打设备时，需合理划分部署区域，区域划分示意图如图9所示。根据图9，水平方向划分为核心区、巡视区、警戒区。核心区为绝对禁飞区，其面积可通过式(8)进行计算。

$$\text{核心区} = a \times b \quad (8)$$

巡视区为围绕核心区的外围区域。无人机飞行需特殊审批，一般用于安保监控或应急响应，假设巡视区的宽度为 $d_1$ ，则巡视区面积的计算如下：

$$\begin{aligned} \text{巡视区长} &= a + 2 \times d_1 \\ \text{巡视区宽} &= b + 2 \times d_1 \\ \text{巡视区面积} &= (a + 2 \times d_1) \times (b + 2 \times d_1) - a \times b \end{aligned} \quad (9)$$

警戒区为最外围的预警区域。无人机飞行需报备或遵守高度限制，避免误入核心区，假设警戒区宽度为 $d_2$ ，则警戒区面积的计算如下：

$$\begin{aligned} \text{警戒区长} &= a + 2 \times (d_1 + d_2) \\ \text{警戒区宽} &= b + 2 \times (d_1 + d_2) \\ \text{警戒区面积} &= (a + 2 \times d_1 + 2 \times d_2) \times (b + 2 \times d_1 + 2 \times d_2) - \text{巡视区面积} - a \times b \end{aligned} \quad (10)$$

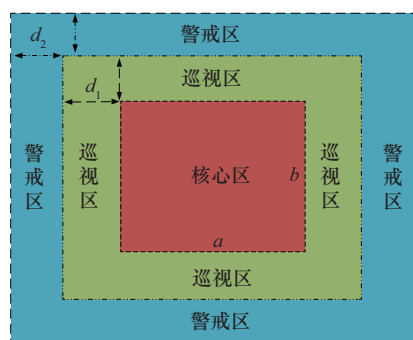
上述表达式中 $d_1$ 、 $d_2$ 的取值需结合对应场景，例如，机场周边，参考民航规定，跑道两侧各5 km为核心区， $d_1$ 取3 km，剩余区域为巡视区。在大型活动时， $d_1$ 一般取100 m， $d_2$ 一般取

300 m。规划设计人员可根据场景类型选取合适 $d_1$ 、 $d_2$ 值，进而部署不同类型侦测、察打设备。在垂直方向上，同样需根据场景划分适合无人机飞行的空域。

其他场景可参考上述机场部署策略，依据区域重要程度划分不同部署类型。在部署无人机侦测、察打设备时，宜采用圈层布设与分级防控相结合的梯度防御策略。该策略应建立不同圈层、不同层级之间的防御联动机制，明确信息共享流程与协同作战方式，从而实现整体防控系统的高效协作，最大限度提升防控效果与响应效率。在设备选择方面，应综合前文仿真结果和厂家技术指引，合理选择适合实际场景的设备。

### 3 结束语

为应对当前低空无人机“黑飞”威胁，常规措施是在重点区域部署侦测、察打设备。然而，如何合理部署相应设备并深入理解其工作原理，成为规划设计及可行性研究领域的核心挑战。针对上述问题，本文系统分析了低空无人机侦测、察打设备的电磁兼容性分析流程，并基于仿真与理论分析，提出了设备部署的间隔建议。同时，本文给出了具体的部署策略与分区域、分场景下的部署方案，为后续规划人员、可研人员的具体工作提供参考。



(a) 水平方向区域划分示意



(b) 垂直方向区域划分示意

图9 区域划分示意图

## 参考文献:

- [1] 王宇龙, 双睦融, 周丽莎, 等. 基于人工智能的侦测无人机算法研究综述[J]. 测控技术, 2024, 43(9): 35-44.  
Wang Y L, Shuang M R, Zhou L S, et al. Overview of detecting UAV algorithms based on AI[J]. Measurement & Control Technology, 2024, 43(9): 35-44.
- [2] Lin X X, Niu Y S, Yu X R, et al. Paying more attention on backgrounds: Background-centric attention for UAV detection[J]. Neural Networks, 2025, 185: 107182.
- [3] Kaur D, Battish N, Bhavsar A, et al. Analysis of vision-based air-to-air UAV detection using YOLO based architectures[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2025, 193: 105074.
- [4] Alshaer N, Abdelfatah R, Ismail T, et al. Vision-based UAV detection and tracking using deep learning and Kalman filter[J]. Computational Intelligence, 2025, 41(1): e70026.
- [5] Gao L Y, Wang S Y, Hou Y Z, et al. Relay selection and optimal deployment for mmWave-FD UAV-assisted 6G communication systems over N-Rayleigh channels[J]. Science China Information Sciences, 2025, 68(10): 202301.
- [6] 何自芬, 王启刚, 张印辉, 等. 动态特征聚合与多层次协同的无人机红外目标实例分割[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(8): 20250209.  
He Z F, Wang Q G, Zhang Y H, et al. Dynamic feature aggregation and multi-level collaboration for UAV infrared target instance segmentation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2025, 54(8): 20250209.
- [7] 何丽莎, 吴霞, 马方立. 无人机用频的无线电监测方法[J]. 中国无线电, 2020(5): 38-41.  
He L S, Wu X, Ma F L. Radio monitoring methods about frequency-safe of unmanned aerial vehicles for major activity[J]. China Radio, 2020(5): 38-41.
- [8] 陈博, 王佳果. 民用通信与PIS系统共建引入4G/5G改造隔离度分析[J]. 中国宽带, 2025, 21(7): 4-6.  
Chen B, Wang J G. Isolation analysis of introducing 4G/5G transformation into civil communication and PIS system[J]. China Broadband, 2025, 21(7): 4-6.
- [9] 王安平. 基于无线电侦测的无人机检测识别方法研究与实现[D]. 上海: 上海大学, 2023.  
Wang A P. Research and implementation of UAV detection and identification method based on radio monitoring[D]. Shanghai: Shanghai University, 2023.
- [10] 房印闯, 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.  
Fang Y C, Han H Y, Zhang H. Research on key technology of detection and countermeasure for low-altitude UAV[J]. China New Telecommunications, 2020, 22(22): 55-56.
- [11] Shin D H, Jung D H, Kim D C, et al. A distributed FMCW radar system based on fiber-optic links for small drone detection[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(2): 340-347.
- [12] 闫雨坤, 蒋清富. 飞行器集群探测、定位、通信一体化波形技术发展综述[J]. 现代防御技术, 2025: 1-14.  
Yan L K, Jiang Q F. Overview of the development of integrated waveform technology for detection, positioning and communication of aircraft swarm[J]. Modern Defence Technology, 2025: 1-14.
- [13] 王奕天, 李建华, 万政祺. 基于频谱监测技术的“低慢小”无人机探测定位系统设计[J]. 现代电子技术, 2025, 48(15): 11-17.  
Wang Y T, Li J H, Wan Z Q. Design of low-slow-small UAV detection and positioning system based on spectrum monitoring technology[J]. Modern Electronics Technique, 2025, 48(15): 11-17.
- [14] 曾理. 反无人机战车系统智能化对抗关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2024.  
Zeng L. Research on key technologies of intelligent countermeasure for anti-UAV combat vehicle system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024.
- [15] 翟蕾, 朱宗玖, 宋从超. 基于Walfisch-Ikegami模型对节点优化定位的研究[J]. 煤矿机电, 2014, 35(5): 18-22.  
Zhai L, Zhu Z J, Song C C. Research on mining node optimization localization based on walfisch-ikegami model[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2014, 35(5): 18-22.
- [16] 路峥, 杨骏腾, 李新利, 等. 在用固定无线电监测站监测灵敏度测试方法研究分析[J]. 中国无线电, 2025(2): 33-36.  
Lu Z, Yang J T, Li X L, et al. Research and analysis of monitoring sensitivity test methods for fixed radio monitoring stations in use[J]. China Radio, 2025(2): 33-36.
- [17] 祝鑫海. 《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》解读及对应急

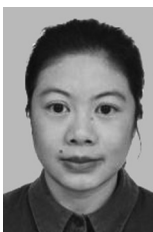


管理无人机飞行管理的思考[J]. 中国减灾, 2025(5): 34-35.  
Zhu X H. Interpretation of “provisional regulations on flight management of unmanned aerial vehicles” and thoughts on emergency management of UAV flight management[J]. Disaster Reduction in China, 2025(5): 34-35.

[作者简介]



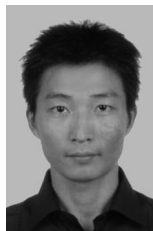
**王锋**（1993-），男，华信咨询设计研究院有限公司工程师，主要从事低空、无线通信的规划与设计工作。



**沈伟丽**（1987-），女，现就职于中国电信股份有限公司湖州分公司，主要从事低空、云计算、IP承载网、接入网运营运维。



**李益锋**（1977-），男，华信咨询设计研究院有限公司高级工程师，主要从事低空、无线通信的咨询、规划、设计工作。



**周亮**（1985-），男，华信咨询设计研究院有限公司高级工程师，主要从事低空、无线通信的咨询、规划、设计工作。



**俞彬**（1989-），男，华信咨询设计研究院有限公司高级工程师，主要从事低空、无线通信的咨询、规划、设计工作。