

航天电子技术与应用前沿

丛书主编·吉峰

低空小型无人飞行器 探测反制技术及应用

陆文斌  编著

DETECTION AND COUNTERMEASURE
TECHNOLOGIES AND THEIR APPLICATIONS
FOR LOW-ALTITUDE SMALL-SCALE
UNMANNED AERIAL VEHICLE



上海科学技术出版社

航天电子技术与应用前沿

低空小型无人飞行器 探测反制技术及应用

陆文斌 等 编著

上海科学技术出版社

内 容 提 要

航天作为当今世界最具挑战性和广泛带动性的高技术领域之一,是国家综合实力和重要地位的重要体现。“航天电子技术与应用前沿”丛书基于“十二五”“十三五”国家重点研发计划项目等,全面、系统反映了航天电子领域的前沿研究和关键核心技术。

本书系统介绍了以民用消费级无人机为代表的低空小型无人飞行器探测和反制技术的背景、系统功能及其应用。全书主要基于探测技术和反制技术对反无人机系统进行分析,详细论述了低空小型无人飞行器探测和反制系统硬件组成;其中探测技术主要包括雷达探测、无线电侦测和监视识别(光电摄像),反制技术包括电磁干扰、无人机通信协议破解等。针对组成系统的设备,分别从技术工作原理、典型方案设计等方面进行介绍和分析;还对系统的指挥控制软件功能、典型方案设计进行了介绍。最后介绍了系统不同典型应用场景。

本书可供低空小型无人飞行器反无人机技术相关研究人员和工程人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

低空小型无人飞行器探测反制技术及应用 / 陆文斌
等编著. -- 上海: 上海科学技术出版社, 2023. 3
(航天电子技术与应用前沿)
ISBN 978-7-5478-6057-1

I. ①低… II. ①陆… III. ①无人驾驶飞行器—探测
技术 IV. ①V47

中国国家版本馆CIP数据核字(2023)第034464号

低空小型无人飞行器探测反制技术及应用
陆文斌 等 编著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海市闵行区号景路159弄A座9F-10F)

邮政编码 201101 www.sstp.cn

印刷

开本 787×1092 1/16 印张 14.5

字数 360千字

2023年3月第1版 2023年3月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-6057-1/V·39

定价: 130.00元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题, 请向印刷厂联系调换

丛书编委会

主 编 吉 峰

副 主 编 秦 琨 朱新忠 陆文斌

编 委 (按姓氏笔画排序)

于守江	王 锦	王茂森	王欣怡	王宝欣
王嘉颖	韦 杰	叶 舟	叶 曦	吕振彬
朱剑辉	刘 奎	刘世劫	许康恒	孙泽渝
苏嘉玮	李 森	李东宁	李彤琛	李曙光
肖斯雨	吴振广	吴毅杰	邱 源	邱 睿
何志敏	汪庆武	沈 奇	张 灏	张新伟
陈大吾	欧阳尚荣	罗 铿	侍述海	金玉红
周 雷	赵春雷	赵婵娟	荀 找	胡 浩
俞 彬	姚庆璐	姚崇斌	原浩娟	徐安祺
奚玉鼎	凌 云	高 虹	郭一帆	黄凯旋
黄家鹏	董彧焘	辜 鹏	程利甫	蔡凤燕
缪依展				

本书编委会

主 编 陆文斌

副 主 编 吕振彬 李曙光 侍述海

编 委 (按姓氏笔画排序)

周 雷 奚玉鼎 凌 云 黄家鹏

前 言

随着国家通航政策的落实,面向民用的低空空域逐步开放,无人机技术逐渐发展为无人机研制、生产、销售、应用、培训多环节的战略产业。一段时间以来我国在无人机技术、产品、应用和市场方面不断取得突破,发展成绩喜人。

反无人机技术伴随着无人机技术发展而越来越受到重视。近年来,无人机危害低空公安安全的事例屡见不鲜。无人机不仅会对重要安全场所如机场、核电站造成低空安全威胁,还会对大型活动现场、展会或其他群众群体集会造成威胁。我们结合近 10 年来低空防御技术的研究成果,并参考国内外学者公开发表的学术文献撰写此书,希望为从事低空小型飞行器入侵防御系统研究人员提供一本系统、全面的参考书,并推动我国低空小型飞行器入侵防御技术的发展。

低空小型无人飞行器探测反制系统主要包括探测、监视识别和反制三大部分,探测部分主要包括微波雷达探测技术、无线电侦测技术;监视识别部分即指光电探测技术,包括可见光和红外热成像技术;反制部分主要包括电磁干扰技术、无线通信协议破解技术、卫星导航诱导设备技术等。

各章内容如下:

第 1 章简要介绍无人机技术的发展和威胁、反无人机技术的背景、反无人机技术的国内外发展情况。本章还介绍了低空小型无人飞行器目标探测和反制系统的工作原理及组成。

第 2 章介绍低空小型无人飞行器目标探测技术,主要从有源探测(雷达)和无源探测(无线电信号侦测)两方面入手,介绍探测技术的系统、组成和功能。

第 3 章介绍低空小型无人飞行器目标监视和识别技术,主要阐述各种视觉监视与识别的光电跟踪系统,包括可见光摄像头、红外摄像头成像跟踪技术。

第 4 章介绍和分析低空小型无人飞行器目标反制技术,主要包括电磁干扰技术,以及无线通信协议破解技术、卫星导航诱导技术、激光毁伤技术、高功率微波毁伤技术和网捕

技术等。

第5章介绍和分析指挥控制系统及数据融合技术,从无人机探测和反制的软件角度入手,分析反无人机信息系统的工作原理与流程。

第6章对几种反无人机系统典型应用场景进行分析,主要对选址布站的要点做了介绍。

本书重点是介绍探测反制技术和指挥控制系统,尤其是雷达探测技术和指挥控制软件的多源数据融合技术。为了面向不同的叙述场合,如无特殊说明,书中所提低空小型无人飞行器、低慢小目标均指消费级无人机。

本书由陆文斌主编。具体编写分工如下:陆文斌、吕振彬、李曙光、侍述海编写第1章,侍述海、黄家鹏、吕振彬、陆文斌编写第2章,奚玉鼎、李曙光编写第3章,周雷、黄家鹏、李曙光编写第4章,凌云编写第5章,李曙光、侍述海编写第6章。在本书编写过程中,欧阳尚荣、陈大吾、姚崇斌和叶曦等专家给出了大量修改意见,在此表示感谢。

本书在编写过程中参阅了大量著作和学术文献以及互联网资料,并已尽可能列于参考文献中,在此谨向这些文献的作者表示感谢。

本书相关研究尚在不断推进、开展中,书中难免存在不妥、不足之处,敬请广大读者予以批评指正。

作 者

目 录

第 1 章 绪论	001
1.1 无人机技术发展现状	001
1.2 反无人机技术简介	002
1.2.1 反无人机技术背景	002
1.2.2 目标定义和空域分析	002
1.3 低空小型无人飞行器探测反制系统	004
1.3.1 系统组成及工作原理	004
1.3.2 布站选址原则与具体部署	005
1.3.3 设备连接关系	007
1.3.4 技术难点及解决措施	008
第 2 章 低空小型无人飞行器目标探测技术	011
2.1 雷达探测技术	011
2.1.1 雷达探测基本原理及主要组成	012
2.1.2 雷达探测关键技术	012
2.1.3 主要技术参数论证	016
2.1.4 方案设计实例	028
2.1.5 国内外典型反无人机雷达简介	042
2.1.6 发展趋势	046
2.2 无线电侦测技术	047
2.2.1 无线电侦测基本原理及主要组成	047
2.2.2 无线电侦测关键技术	049
2.2.3 主要技术参数论证	066
2.2.4 方案设计实例	069
2.2.5 国内外无线电侦测主流设备简介	073

2.2.6	发展趋势	082
第3章	低空小型无人飞行器目标监视识别技术	084
3.1	低慢小目标光电探测基本原理	084
3.2	监视识别关键技术	086
3.2.1	目标跟踪技术	086
3.2.2	目标成像技术	090
3.2.3	高精度伺服控制技术	090
3.2.4	目标识别技术	090
3.3	主要技术参数论证	090
3.3.1	摄像机探测能力论证	090
3.3.2	4A 自动控制	090
3.3.3	电子透雾	091
3.3.4	强光抑制	092
3.3.5	三维定位	093
3.3.6	高精度云台指标论证	093
3.3.7	目标追踪指标论证	094
3.3.8	图像跟踪器	095
3.3.9	技术难点及解决措施	098
3.4	方案设计实例	101
3.4.1	设备选型	101
3.4.2	可见光电视摄像头	102
3.4.3	红外热像仪	103
3.4.4	光电搜索跟踪伺服转台	103
3.4.5	监视识别系统显示与控制界面	106
3.4.6	软件使用策略	107
3.4.7	机械接口	107
3.4.8	电气接口	108
3.5	几种常见低慢小目标光电探测设备介绍	108
3.5.1	“低空卫士”激光拦截系统	108
3.5.2	“蜘蛛网”反无人机系统	108
3.5.3	黑睿公司 UAVX 无人机探测系统	109
3.5.4	土耳其 iHTAR 反无人机集成空中防御系统	110
3.6	技术发展趋势分析	111

3.6.1	多传感融合	111
3.6.2	人工智能辅助目标识别与跟踪	111
第 4 章	低空小型无人飞行器目标反制技术	113
4.1	电磁干扰技术	113
4.1.1	反无人机电磁干扰技术基本原理	113
4.1.2	电磁干扰关键技术	115
4.1.3	主要技术参数论证	132
4.1.4	方案设计实例	133
4.1.5	国内外典型电磁干扰设备	146
4.1.6	发展趋势	148
4.2	无线通信协议破解技术	148
4.2.1	无线通信协议破解技术基本原理	148
4.2.2	方案设计实例	150
4.3	无人机卫星导航诱导技术	155
4.3.1	无人机卫星导航诱导技术基本原理	156
4.3.2	方案设计实例	157
4.4	激光毁伤技术	160
4.4.1	激光毁伤技术基本原理	160
4.4.2	方案设计实例	161
4.5	便携式干扰技术	164
4.5.1	便携式干扰技术基本原理	164
4.5.2	方案设计实例	165
4.6	其他反制技术	167
第 5 章	低空小型无人飞行器目标探测反制系统指挥控制技术	169
5.1	指挥控制系统概述	169
5.1.1	指挥控制系统功能介绍	169
5.1.2	建设原则	170
5.2	系统功能需求及分析	171
5.2.1	系统功能需求	171
5.2.2	系统需求分析	173
5.2.3	系统非功能需求分析	179
5.3	系统方案设计实例	181

5.3.1	系统架构图	181
5.3.2	软件架构设计	182
5.3.3	指挥控制中心设计	185
5.3.4	工作站任务规划	186
5.3.5	声光报警设计	189
5.3.6	授时服务器	190
5.3.7	倾斜摄影模型	190
5.3.8	3D GIS引擎	192
5.3.9	高时效性消息引擎	197
5.3.10	安全机制设计	198
5.3.11	技术路线	200
5.3.12	实保系统与云数据对接	200
5.4	软件功能介绍	201
5.4.1	空情态势软件	201
5.4.2	辅助安保软件	206
5.4.3	后台软件	207
5.5	指挥控制系统发展趋势	209
第6章	低空小型无人飞行器目标防御系统典型应用场景	211
6.1	防御系统布置及方案	211
6.1.1	系统布置	211
6.1.2	探测和反制方案	211
6.2	几种典型应用场景分析	215
6.2.1	沿海应用场景	215
6.2.2	非沿海固定区域	215
6.2.3	重要周界	218
6.2.4	其他地物场景	218
	参考文献	219

第 1 章

绪 论

无人机技术的发展,增加了无人机对公共安全、重要场所安防造成威胁的风险,本章将从技术背景、无人机技术、反无人机技术及防护空域、目标分析几个方面展开相关阐述。

1.1 无人机技术发展现状

2010年8月,国务院、中央军委发布《关于深化我国低空空域管理改革的意见》,指出低空空域是通用航空活动的主要区域,深化低空空域管理改革是大力发展通用航空、繁荣我国航空业的重要举措,是我国经济社会发展的迫切需要。提出的目标是:2015年基本形成政府监管、行业指导、市场化运作、全国一体的低空空域运行管理和服务保障体系,2020年低空空域资源得到科学合理的开发利用。低空开放不仅带来通用航空业的发展,更是带来无人机行业的飞速发展。

无人机技术逐渐发展为无人机研制、生产、销售、应用、培训多环节的战略产业。一段时间以来我国在无人机技术、产品、应用和市场方面取得突破,发展成绩喜人。

无人机技术飞速发展的同时,无人机也给各场所造成了潜在的威胁。法国《欧洲时报》2018年7月4日报道,法国当地时间7月3日上午,绿色和平组织成员远程操纵一架超人外形的无人机和一架遥控微型飞机进入里昂附近的一座核电站,并故意让它们撞到核电站墙上,以此提醒公众警惕核电安全隐患。该组织还在推特主页公布视频,并且无人机被做成“超人”模样。视频中一架由该组织成员操控的一架无人机撞向了法国里昂附近Bugey核电站的一处外部墙体。两天后的7月5日,法国议会提交一份涉及核电站安全议题的报告。在这个时间点,该环保组织选择在法国东部边境附近的Bugey核电站采取“极有象征意义”的行动,希望引发公众对乏燃料(使用过的核燃料)库存池“安全脆弱性”的关注。

据英国Daily Mail报道,2018年12月19日,两架无人机袭扰伦敦第二大机场盖特威克机场,导致近百架航班备降、数千名旅客延误。盖特威克机场证实,在机场运行区域发

现两架无人机后,暂停机场运行,而关闭盖特威克机场扰乱了欧洲航班运行。

2019年1月8日,英国伦敦希思罗机场附近目击到无人机,当天下午5时,机场跑道关闭,航班暂停离境,到下午6时35分左右,跑道才重新开放。

1.2 反无人机技术简介

1.2.1 反无人机技术背景

2018年发布的《公安部关于无人机侦测反制装备列装配备的意见》(公装财[2018]668号)指出,为切实提高公安机关防范和应对无人机侵扰重要目标、重大活动的能力和水平,加快推进无人机侦测反制装备列装配备,实现重点部位常态自动巡控、临时现场移动反制的要求,提出如下列装配备意见:

无人机侦测反制装备列装配备的点位主要包括党政军政核心区、首长住地、外事活动和其他重大安保任务涉及的警卫点线周边,核电站、炼油厂、储油库等易燃易爆危险区,重大活动举办场所等。

侦测装备包括雷达、光电、频谱3类;反制装备包括定向无线电压制、全向无线电压制、网捕拦截、激光拦截和欺骗干扰5类。下面简单介绍几类常用的侦测方法:

(1) 雷达探测。指利用目标电磁波反射回波进行探测,可以探测目标的距离、速度、高度和角度信息,因为其作用距离远,所以通常作为预警探测的重要手段。但是,该探测手段容易受到地杂波、海杂波的影响。

(2) 无源侦测。指利用电磁波接收机对无人机产生的导航信号、图传数传信号进行无源侦测和定位定向。该手段的明显缺点是在无人机目标静默飞行时无法获得目标信息,另外在复杂城市或地形条件下存在遮挡问题。

(3) 光学探测。指利用目标在光学系统上成像从而对目标进行跟踪识别探测。从波段上可分为可见光和热红外两种。其缺点是受天气影响大,且在夜间效果不佳。

1.2.2 目标定义和空域分析

1) 目标定义

无人飞行器探测反制系统的防御目标是低空小型飞行器,其主要特点是“低空/超低空飞行、飞行速度较慢、目标特性不明显”。一般情况下,该类飞行器飞行高度在1000 m以下、飞行时速小于200 km/h、雷达反射面积小于 2 m^2 ,是典型的“低慢小”目标。该类目标涉及的范围比较广,包括无人机、中小型飞机、直升机、滑翔机、三角翼、滑翔伞、动力伞、热气球、飞艇、航空模型、空飘气球等通用航空器材及航空运动器材等。另外,无人飞行器探测反制系统还需要考虑特定情况下民航飞机可能造成的威胁。

根据飞行特性的不同,可以将这些防御目标分为三大类:

(1) 无人机类。主要包括无人机、航空模型、无人热气球、无人飞艇、空飘气球等,其主要特点是无驾驶员驾驶,飞行速度较慢,飞行高度一般不超过 120 m。

(2) 通航飞机类。主要包括有人驾驶的中小型飞机、直升机、滑翔机、三角翼、滑翔伞、动力伞、有人热气球、有人飞艇等,其主要特点是有驾驶员驾驶,飞行器上可能有少量乘客,飞行速度较快,飞行高度通常不超过 1 000 m。

(3) 民航飞机类。主要包括各种大中型民航飞机,其主要特点是有驾驶员驾驶,飞行器上有大量乘客,飞行速度很快;在航线上,短航线飞机的飞行高度一般为 6 000~9 600 m,长航线飞机的飞行高度一般为 8 000~12 000 m。

无人机是本系统防御的最主要目标类型。根据民航部门统计数据,截至 2018 年,无人机国内市场保有量超过 150 万台,数量远超其他类型的航空器,是本系统“重中之重”的防御目标。根据尺寸的不同,无人机目标可以进一步分为三大类:① Phantom(精灵)1~4 等便携式无人机,典型尺寸 350 mm×350 mm,目前市场保有量最大,均已停产;② Mavic(御)、Spark(晓)型口袋无人机,典型尺寸为 210 mm×90 mm;③ Inspire(悟)、MG/T16 等较大型航拍、植保行业无人机,典型尺寸为 2 520 mm×2 210 mm。

2) 空域分析

低空小型飞行器对防护区域的威胁程度,主要取决于目标到防护区域周边的距离(该距离正比于目标到达防护区域周界的时间,即预警时间)。按照该距离的不同,将空域划分为三个层次(图 1-1):

(1) 预警区。指防护区域周边 5 000 m 范围,且真高在 1 000 m 以下的区域(预警时间约为 4 min)。

(2) 警戒区。指防护区域周边 3 500 m 范围,且真高在 1 000 m 以下的区域(预警时间约为 3 min)。

(3) 处置区。指防护区域周边 1 000 m 范围,且真高在 1 000 m 以下的区域(预警时间约为 1 min)。

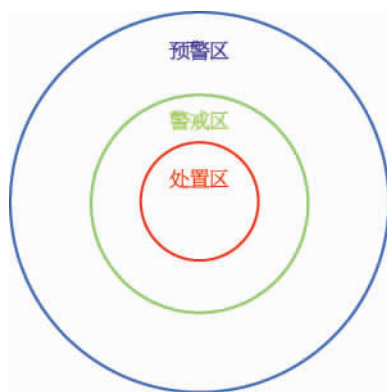


图 1-1 低空防御空域划分

在预警区,探测反制系统需要完成探测预警功能;在警戒区,探测反制系统需要完成探测预警、监视识别功能;在处置区,系统需要完成探测预警、监视识别、拦截处置功能。

1.3 低空小型无人飞行器探测反制系统

1.3.1 系统组成及工作原理

为了实现对不同空域内各种目标的防御任务,探测反制系统需要包括指挥控制分系统、探测预警分系统、监视识别分系统、拦截处置分系统和配套安保设施等(图 1-2),其功能分述如下:

(1) 指挥控制分系统。其利用技术手段实现对各种设备的综合调度、计划安排、任务交接,实现对防护空域内空情态势进行分析评估,制定相应预案,根据预案对威胁目标采取相应的响应措施,消除或降低低空小型飞行器对防护区域造成的安全威胁并进行取证;同时,对整个过程的数据进行录取、回放、分析和报表生成,完成整个打击过程的闭环,系统性地完成低空小型飞行器入侵的防御任务。该分系统以软件为主,辅助硬件设备主要包括工作站、服务器和统一授时设备。

(2) 探测预警分系统。其利用多种传感器实现对低空小型飞行器的多源探测,然后利用数据融合技术实现对目标的精确定位。传感器类型包括低空探测雷达和无线电侦测设备。其中,低空探测雷达是有源探测设备,无线电侦测设备是无源探测设备;低空探测雷达、无线电侦测设备可以实现对合作式和非合作式目标的探测。

(3) 监视识别分系统(光电设备)。其根据探测预警分系统的目标指示信息,实现对

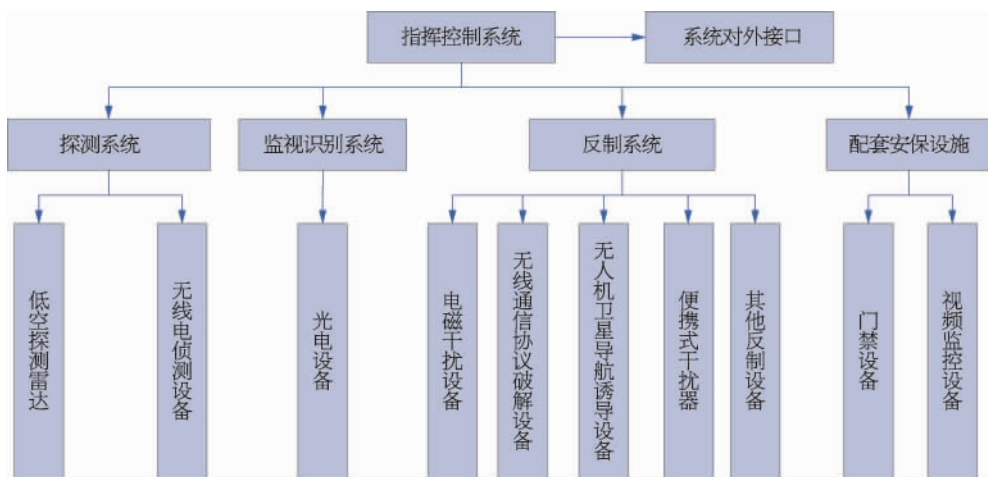


图 1-2 典型低空小型无人飞行器探测反制系统构成示意图

目标的跟踪和识别,利用人工智能技术实现对鸟等非威胁目标的剔除,然后对目标进行威胁等级评估,生成打击序列列表。该分系统承接探测预警分系统和拦截处置分系统,对系统任务的顺利交班作用至关重要,任务交班成功率是关键指标,另外,通过人工智能算法避免鸟类造成的虚警也是应用中必须解决的关键问题。

(4) 拦截处置分系统。其根据目标类型、所在空域等各种作战条件,自适应地按预案进行驱离、干扰、诱导、打击,实现区域拒止任务,同时调用空中光电取证设备实现对坠落无人机和飞手的第一时间相片和视频取证,辅助安保人员和警务人员获取无人机、抓捕黑飞飞手。拦截处置分系统主要设备包括无线通信协议破解设备、电磁干扰设备、便携式干扰器、无人机卫星导航诱导设备、强光设备。

(5) 配套安保设施。包括门禁设备和视频监控设备。门禁设备为监控室进出的安保设施,视频监控设备主要用于对监控室和设备布置阵地进行实时监控。

1.3.2 布站选址原则与具体部署

1) 选址原则

本系统布站选址的主要原则是:

- (1) 选取区域内最高或极高点部署,尽量减少反应堆等遮挡造成的盲区。
- (2) 对整个设施场地通盘考虑,优化选址,以最少的站点数实现全空域覆盖。
- (3) 应有足够的部署面积,且尽量平整,便于设备安装和调试。
- (4) 供电和有线网覆盖良好,或者容易施工。
- (5) 综合考虑客户展示、安保配套条件等其他因素。

2) 布站选址具体部署

由于物理特性的限制,雷达在顶空和近距存在一定的盲区,因此本系统应至少配备两部雷达,相互补盲,才能实现整个空域的无盲区覆盖。本系统选用的雷达的作用距离为5 km,俯仰角范围为 60° ,覆盖范围如图1-3所示。

如果只显示1 000 m以下空域的覆盖情况,则可以更清楚地看到雷达顶空盲区和近距盲区的影响,如图1-4所示。

为了实现对1 km以下空域的无盲区监视,两部雷达间距的最小值 D 如图1-5所示。其数值计算如下:

$$D = 1\,000 \times \cot 60^\circ \times 2 = \frac{\sqrt{3}}{3} \times 2\,000 \approx 1\,154.7(\text{m}) \quad (1-1)$$

根据待防护区域的地形地貌和本系统的实际需求,以某厂区为例,经卫星地图详细勘测,结合用户的实际情况,最终选择防护区域中央位置楼顶、过渡区域建筑楼顶两处作为室外设备的主要部署点,分别称之为A站、B站,两站间距约1 330 m。两部雷达的联合覆盖空域分别如图1-6、图1-7所示。

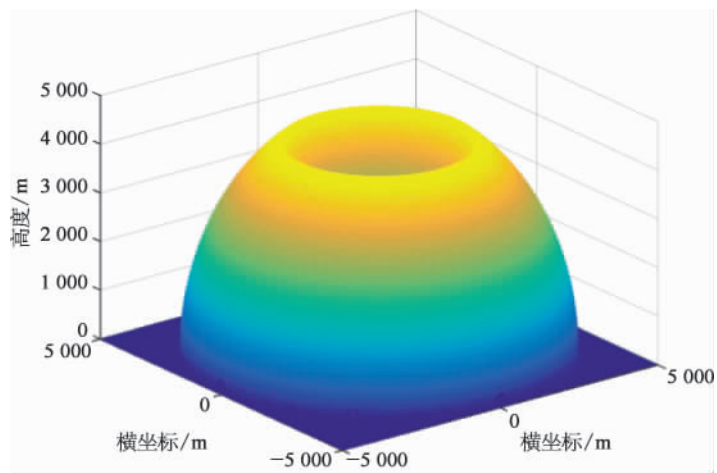


图 1-3 单部雷达空域覆盖情况

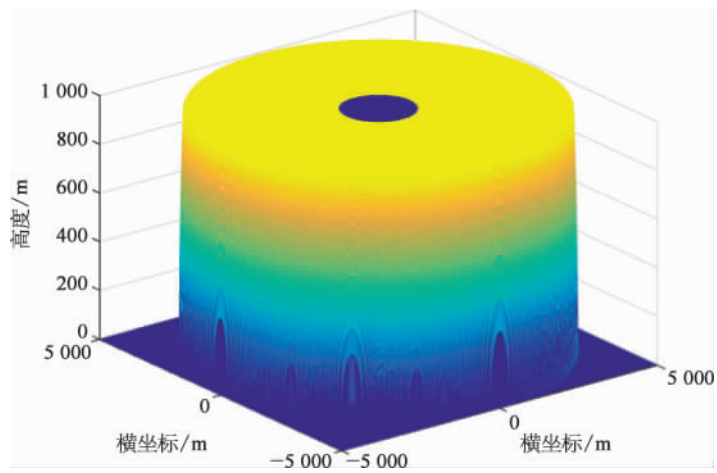


图 1-4 单部雷达对 1 000 m 以下空域覆盖情况

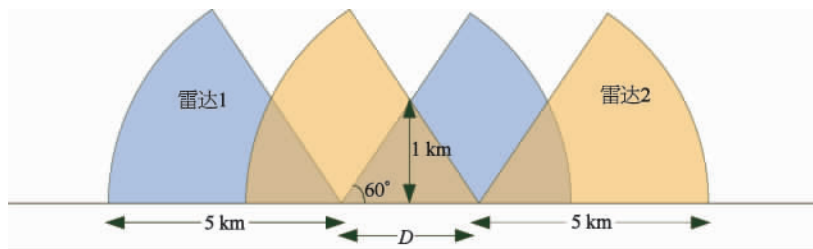


图 1-5 雷达覆盖区剖面示意图