

一种针对“低慢小”目标的栅格化感知系统设计

孙智勇¹, 陈建军², 李森¹, 肖军¹

(1. 空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051; 2. 93995 部队, 西安, 710300)

摘要 针对“低慢小”目标探测面临的问题, 提出了一种栅格化理念解决问题思路, 给出了栅格化感知系统的定义, 设计了栅格化感知系统, 包括传感器分系统、通信分系统、管理控制中心和综合保障分系统等组成和工作过程。分析了栅格化感知系统的关键技术, 包括传感器低成本设计、“低慢小”目标检测、数据融合处理等技术。研究了栅格化感知系统的部署原则, 建立部署原则模型, 对于解决“低慢小”目标探测具有现实指导意义。

关键词 低慢小; 栅格化; 航空器; 感知系统

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.02.011

中图分类号 TN95; E917 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)02-0095-05

A Design of “Low Slow Small” Targets in Rasterized Perception System

SUN Zhiyong¹, CHEN Jianjun², LI Sen¹, XIAO Jun¹

(1. Air Defense and Antimissile School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2. Unit 93995, Xi'an 710300, China)

Abstract In view of the problems lying ahead of “low slow small” target detection, a grid based concept is proposed, a definition of grid based perception system is given, and a grid based perception system is designed, including sensor subsystem, communication subsystem, management and control center, and comprehensive support subsystem. The paper analyzes the key technologies of grid based perception systems, including low-cost sensor design, “low slow small” target detection, data fusion processing, and other technologies. The deployment principles of grid based perception systems are researched and a deployment principle model is established. And the above-mentioned reasons have, to a certain extent, practical guidance significance for solving the problem of “low slow small” target detection.

Key words low slow small; rasterizer; aircraft; perception system

根据国务院、中央军委发布的《关于深化我国低空空域管理改革的意见》, “低慢小”目标是指飞行高度低(1 000 m 以下)、最大飞行速度不大于 $0.3Ma$ 、雷达散射面积较小(目前没有统一定义), 不易被

常规雷达侦测发现与识别, 具有一定载重能力, 不易管控, 易被用于实施破坏活动的通用航空器。其低廉的价格, 优异的性能在军事冲突中扮演着越来越重要的角色; 由其引发的“黑飞”现象频繁, 给民航安

收稿日期: 2023-10-19

基金项目: 陕西省科技计划项目(2023-JC-QN-0652)

作者简介: 孙智勇(1986—), 男, 陕西黄龙人, 讲师, 研究方向为系统建模与仿真。E-mail: 410555731@qq.com

通信作者: 陈建军(1987—), 男, 湖北大冶人, 硕士生, 研究方向为防空反导军事装备。E-mail: 240987631@qq.com

引用格式: 孙智勇, 陈建军, 李森, 等. 一种针对“低慢小”目标的栅格化感知系统设计[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(2): 95-99. SUN Zhiyong, CHEN Jianjun, LI Sen, et al. A Design of “Low Slow Small” Targets in Rasterized Perception System[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(2): 95-99.

全、军事安全和人身安全带来了严重威胁^[1-2]。美国政府更是将“低慢小”目标威胁列为 5 种最具有破坏力的空中威胁之一^[3]。雷达是当前探测航空器的主要手段,具有探测目标距离远、探测速度快、探测精度高等独特优势^[4-5],但雷达易受到电磁干扰,存在单一类型探测的局限性。本文提出了一种“低慢小”目标的栅格化探测系统,对解决“低慢小”目标探测具有重要现实意义。

1 “低慢小”目标探测面临的主要困难

1.1 “低慢小”目标探测的特有难题

“低慢小”目标飞行具有飞行高度低、速度慢、体积小等典型特点。飞行高度低,传感器探测目标的前提条件必须是与目标通视,受地球曲率和地形遮蔽影响,传感器对低空飞行目标通视距离较近,极大限制了性能发挥;飞行速度慢,多普勒特征不明显,目标容易混杂在地物杂波中,分辨难度大;目标外形体积小,由于新材料新技术的加持,使其雷达、光电等特征不明显,探测难度极大^[6-8]。

1.2 异构传感器探测性能分析

雷达作为一种传统探测航空器手段,具有探测目标距离远、测速能力强、测量精度高等诸多优点,长期以来是各国探测航空器的主要手段,但其主要是针对中、高速运动目标探测而设计,在探测“低慢小”目标时存在先天不足^[9]。针对“低慢小”目标探测需求,涌现了各种类型的传感器,如“低慢小”雷达、无线电、光电、声学探测等。雷达具有探测目标距离远、探测目标批次多、环境气候影响小等优势,但存在低速目标探测能力弱、“蜂群”目标分辨不足、易受电磁干扰等缺点;无线电侦测具有宽频带的侦测截获能力、快速捕获能力、高分辨率信号分选能力等优势,但存在严重依赖目标发出的电磁信息,只能测角不能测距,且测角精度普遍偏低等缺点;光电探测具有目标跟踪精度高、跟踪距离较远、目标可成像识别、取证等优势,但存在受天气因素影响大、主动发现目标能力差等缺点;声学探测易受环境影响且距离较近^[10-11]。

1.3 现有探测方案的局限性

不同传感器探测“低慢小”目标各自优势不同,单独采用任何一种传感器探测都存在一定缺陷,当前主流的探测方案是采用多传感器组合探测,将雷达与无线电结合,雷达与光电结合,雷达、光电与无线电组合等^[12-14]。同时,针对地形、地球曲率对“低慢小”探测影响,有的提出依托民用通信基站进行分布式探测组网,解决单点探测获取信息不充分、存在

探测盲区等问题;也有的提出将探测器近距离抵近航空器进行移动探测理念等^[15-16]。

综上所述,当前对“低慢小”目标探测更多针对的是单点探测,传统雷达针对“低慢小”探测需要技术升级,面临巨额成本和技术难题,且覆盖区域相比雷达探测典型目标的探测区域急剧压缩,民用通信基站和移动探测更多的是一种理念,技术上和经济上有待验证。因此,急需一种对“低慢小”目标大区域预警探测解决方案。

2 栅格化感知系统总体设计

针对“低慢小”目标探测面临的问题,提出栅格化感知系统探测“低慢小”目标,开展栅格化感知系统总体设计,包括系统概念、系统组成、工作过程和关键技术等方面。

2.1 栅格化感知系统概念

栅格化感知系统是根据“低慢小”目标探测跟踪需求,以栅格化的布站方式作为传感器的接入节点,如图 1 所示,依靠雷达、光电、无线电等传感器实现对目标的探测和跟踪,综合不同传感器的预警信息,实现多源数据融合,形成对“低慢小”目标的搜索发现、捕获、跟踪、识别,快速处置及信息分发共享等能力;同时,寻求传感器性能、成本以及部署数量之间的一种动态平衡,在解决探测“低慢小”目标难题的同时,兼顾经济效益最优^[17]。

系统具有以下优点:①抗干扰强,传感器采用多种探测手段,有效增强抗干扰能力;②生存力强,单个传感器被毁情况下,相邻传感器可以兼顾该区域,确保系统整体影响不大;③无人化,远程操控无人值守,部署条件要求低,可以针对地形特点灵活部署,最大限度降低地形遮蔽对“低慢小”目标探测的影响;④自动化,各传感器将大量探测的目标自动上报,上级进行统一目标融合,以实现大区域范围“低慢小”目标进行全自动探测。

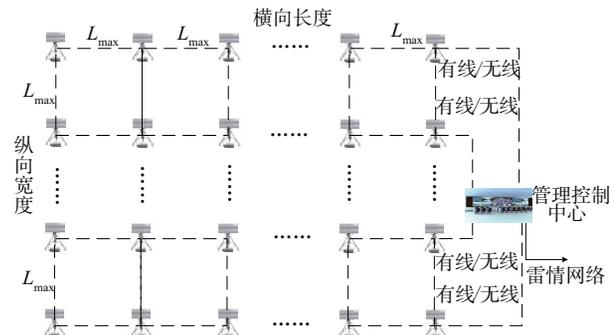


图 1 栅格化感知系统示意图

2.2 栅格化感知系统组成

为了实现栅格化感知系统对“低慢小”目标的探

测、跟踪、融合、通信及保障于一体的功能,栅格化感知系统主要由传感器分系统、通信分系统、管理控制中心和综合保障分系统等 4 个部分组成,如图 2 所示。

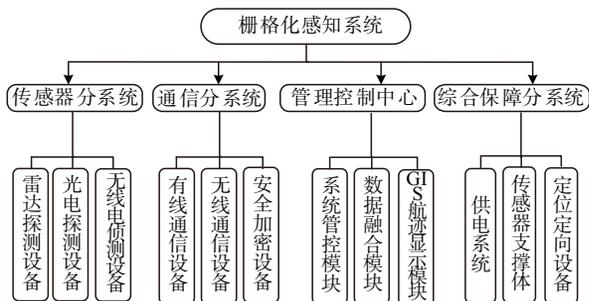


图 2 栅格化感知系统组成

2.2.1 传感器分系统

该分系统主要由雷达、光电探测和无线电侦测等传感器组成,是栅格化感知系统的核心部分,雷达是主传感器,采用 Ku 波段连续波体制,由天线、毫米波收发模块、频率源、信号处理板、电源转化、中控伺服、辅助设备等组成,能够给出目标的方位、俯仰、距离和速度等信息,选型时重点考虑经济性、功耗、近距盲区、俯仰角度、维护性等因素;无线电侦测由天线单元、信号处理单元、主控单元、显控终端、辅助设备等组成,主要通过频谱感知方式探测目标,获取目标工作电磁频段、方位、型号等信息;光电探测由全景凝视单元、光电跟踪单元和图像综合处理单元等组成,其中,光电跟踪单元由可见光探测、红外探测、激光测距 3 个子单元组成,主要对雷达、无线电侦测的目标进行小范围搜索跟踪,测角精度远高于雷达、无线电测角精度,可以大大提高对蜂群目标的分辨能力,提高整个传感器的抗干扰能力。

2.2.2 通信分系统

该分系统主要由有线通信、无线通信和安全加密设备等组成,将传感器分系统获取的跟踪数据安全、高效地送到栅格化感知系统的管理控制中心。有线通信满足条件下,首选有线通信确保足够的传输带宽、高可靠、低延迟;当有线通信不能满足条件时,可以选择无线通信进行传输;也可以通过无线通信传输到就近有线网络,通过有线网络传输到数据融合中心,在传输过程中,考虑到数据安全需要,可以在数据传输两端各安装安全加密设备。

2.2.3 管理控制中心

该分系统主要由系统管控模块、数据融合模块、GIS 航迹显示等组成,实现系统设备的远程监控与管理、多源数据融合、空情态势显示等功能。系统管控模块监视与控制栅格化感知系统各分系统工作状态;数据融合模块又分为数据初次融合模块和数据

二次融合模块,初次融合模块主要是对不同传感器数据融合,数据二次融合模块主要是对多个传感器分系统送来的初次融合数据进行二次融合;GIS 航迹显示是将数据二次融合信息进行可视化显示,监视与控制栅格化感知系统各分系统工作状态。

2.2.4 综合保障分系统

该分系统主要由供电系统、支撑组件、定位定向设备等组成。供电系统对各分系统进行统一用电保障,可以选用市电供电,也可以采用太阳能供电,油机供电可以作为备用供电手段;支撑组件是对雷达分系统和通信分系统提供架高和稳定支撑,为了克服地球曲率影响,需要根据传感器分系统探测能力确定支撑组件对传感器分系统的架设高度;定位定向设备是对传感器分系统设备进行定位和定向测量。

2.3 栅格化感知系统工作过程

通过管理控制中心远程监控各栅格点系统的工作状态,控制各系统运行,综合保障分系统向各系统供电,定位定向设备对系统进行授时定位,雷达、无线电侦测设备获取周围环境信息并存储,以便更好地在复杂环境下区分出“低慢小”目标。当目标出现在某个传感器探测区域,雷达探测到目标的方位、俯仰、距离和速度,无线电侦测到目标的方位和频谱信息,初次融合模块将雷达和无线电侦测的信息进行融合,光电探测设备利用初次融合信息进行小范围搜索目标,获得目标高精度信息一并通过通信系统送给管理控制中心,管理控制中心接收到所有栅格点传感器跟踪信息,进行数据二次融合,并将融合结果显示出来,以便指挥员实时掌握空情态势,同时,融合信息通过数据输出接口转化成标准格式,接入雷情网络,关键工作过程如图 3 所示。

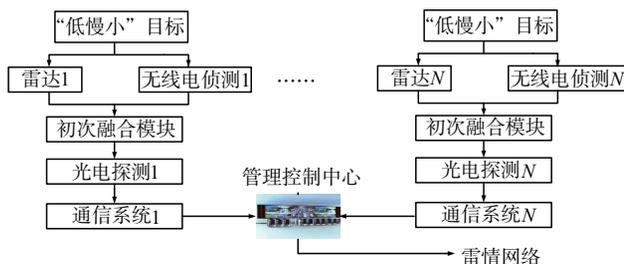


图 3 栅格化感知系统关键工作过程

2.4 栅格化感知系统关键技术

2.4.1 传感器低成本设计技术

栅格化感知系统需要传感器大规模部署,传感器的经济性至关重要,传感器中雷达是核心,成本占比最大,雷达低成本设计至关重要。线性调频连续波雷达体积小、功率低、距离分辨率高,采用基于罗

曼透镜的发射无源相控阵进一步降低成本,是一种理想选择。罗曼透镜的工程化设计难点有 2 个:一是雷达采用频段较高,罗曼透镜无法通过移项器校正相差,相控阵效果与天线设计方案容差、加工工艺精度强相关;二是需要对最优曲线与匹配结构做研究,通过罗曼透镜自身特性改善无源相控阵扫描的缺点,使得天线在扫描过程中幅度特性基本保持稳定,尤其改善宽扫描角时天线增益降低程度^[18]。

2.4.2 “低慢小”目标检测技术

“低慢小”目标的低可探测性是其显著特点,其雷达反射截面积、红外和视觉特征都很小,低空飞行背景嘈杂严重影响了目标识别和跟踪。雷达探测方面,需要综合运用多普勒滤波、超低副瓣、匹配滤波、数字波束形成、低截获概率、相参积累与非相参积累、大动态范围检测、恒虚警检测、极化信息处理等,充分利用目标与背景杂波、噪声、干扰等在某些特性上的差异以及雷达在时域、频域、空域中提供的信息等识别发现目标,并能够对目标类型进行分类。红外探测方面,需要克服复杂背景中弱小目标探测技术难题,包括目标的尺寸小、信号弱、信噪比低、背景复杂、干扰大等。可见光探测方面,小目标分为 2 类,低对比度的目标即灰度小目标,像素少的目标即能量小目标,噪声会严重干扰帧与帧之间目标的强度,检测关键在于如何抑制噪声,有效累加目标能量,基于单帧图像小目标检测方法有门限检测法、峰值检测法、空间差分法、纹理分析法等,基于多帧图像弱运动目标检测方法有时间差分法、三维匹配滤波法、多级假设检验法、最优原理的动态规划法等。无线电侦测方面,涉及信号检测技术、宽带多信号调制识别技术、信息解码技术和高效处理算法实现等技术^[18]。

2.4.3 数据融合处理技术

数据融合处理涉及数据配准、异类数据、观测数据的不确定性,数据关联、数据粒度等关键问题。数据配准,在多传感器数据融合中,每个传感器提供的观测数据都是在各自的参考框架之内,在融合前,必须变换到同一参考框架中,但多传感器时空配准引起的舍入误差必须得到补偿。异类数据、异类传感器相比同类传感器,提供的信息具有更强的多样性和互补性,但由于时间上的不同步,数据率不一致以及测量维数不匹配等,使得对这些信息的融合处理更困难。观测数据的不确定性,传感器工作环境的不确定性,使得观测数据含有噪声成分,在融合处理中需要对多源观测数据进行分析验证,最大程度降低数据的不确定性。数据关联,涉及单传感器时间域上的关联问

题,以及多传感器空间域上的关联问题。数据粒度,多传感器提供的数据,粒度级别不同,有稀疏的,也有稠密的,可能处于数据级、特征级等不同的抽象级别上,大大增加了数据融合的难度^[19]。

3 栅格化感知系统的部署原则

栅格化感知系统部署如图 1 所示,传感器分系统与传感器分系统之间的最大部署间隔为 L_{\max} ,设定传感器分系统对“低慢小”目标最大探测距离为 R_{\max} , L_{\max} 与 R_{\max} 直接相关。传感器分系统之间部署是确保“低慢小”目标在该区域的全覆盖,也就是任何“低慢小”目标在该区域内,至少有 1 套传感器分系统能够探测到。极限情况下,对于单套传感器分系统,当航空器 1 km 高度时,传感器分系统对其探测的最大水平距离为 R'_{\max} , $R'_{\max} = \sqrt{R_{\max}^2 - 1}$ (单位为 km),原理如图 4 所示。相邻 2 套对角部署的传感器,直线距离为 $2R'_{\max}$,因此, $L_{\max} = \sqrt{2}R'_{\max} = \sqrt{2(R_{\max}^2 - 1)}$ (单位为 m),如图 5 所示。

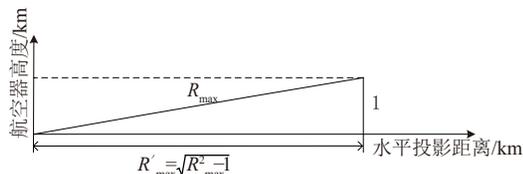


图 4 探测的最大水平距离

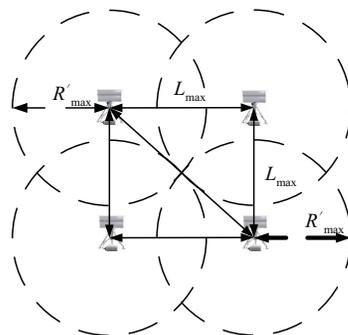


图 5 传感器部署位置关系

假设在栅格区域横向长度方向部署 M 行传感器分系统,纵向宽度方向部署 N 列传感器分系统,整个区域一共部署 MN 套传感器分系统,可以实现横向长度 ML_{\max} 、纵向宽度 NL_{\max} 区域范围的“低慢小”目标无缝隙探测。此外,需要配套 MN 套通信分系统和 MN 套综合保障分系统,以及 1 套管理控制中心。

设定单套传感器分系统成本为:

$$C(a, b, c, R_{\max}) = C_a(R_{\max}) + C_b(R_{\max}) + C_c(R_{\max}) + B \quad (1)$$

式中: R_{\max} 为最大探测距离; $C_a(R_{\max})$ 为雷达探测

设备成本; $C_b(R_{\max})$ 为光电探测设备成本; $C_c(R_{\max})$ 为无线电侦测设备成本; B 为传感器分系统中其它因素的成本。

单套通信分系统、管理控制中心、综合保障分系统与距离变化影响不大,故其成本设定为固定值。即:单个通信分系统成本为 T ,综合保障分系统成本为 Z ,管理控制中心成本为 S 。

栅格化感知系统部署,设定“低慢小”目标探测大区域范围横向长度为 X km,纵向宽度为 Y km,实现对该范围内“低慢小”目标全覆盖,所需最低成本为 $F_{\min}(X, Y)$,横向长度方向所需传感器分系统数量为 m (自然数),纵向宽度方向所需传感器分系统数量为 n (自然数)。

R_{\max} 越大,单个传感器分系统成本越高,覆盖同样范围区域,所需传感器分系统、通信分系统和综合保障分系统数量越少。

因此,需要在传感器性能和成本之间选择合适点,得到栅格化感知系统部署模型为:

$$F_{\min}(X, Y) = mnC(a, b, c, R_{\max}) + mnT + mnZ + S \quad (2)$$

式中: $m = \text{roundup}(X / \sqrt{2(R_{\max}^2 - 1)})$; $n = \text{roundup}(Y / \sqrt{2(R_{\max}^2 - 1)})$ 。

把 $C(a, b, c, R_{\max})$ 函数带入,可得:

$$F_{\min}(X, Y) = mn(C_a(R_{\max}) + C_b(R_{\max}) + C_c(R_{\max}) + B) + mnT + mnZ + S \quad (3)$$

实际上, $C_a(R_{\max}), C_b(R_{\max}), C_c(R_{\max}) \gg B, T, Z$, 上式可精简为:

$$F_{\min}(X, Y) \approx \text{roundup}\left(\frac{X}{\sqrt{2(R_{\max}^2 - 1)}}\right) \cdot \text{roundup}\left(\frac{Y}{\sqrt{2(R_{\max}^2 - 1)}}\right) C(a, b, c, R_{\max}) + S \quad (4)$$

从式(4)可以得出,栅格化感知系统中传感器分系统部署数量与 R_{\max}^2 成反比, S 是固定值,栅格化感知系统部署在传感器最大探测距离与传感器部署总数量之间选择合适的点,以实现总成本最低。当已知传感器性能情况下,栅格化感知系统部署更多的是给出覆盖某一区域的传感器数量,假定单个传感器分系统对 RCS 为 0.01 m^2 的“低慢小”目标探测距离为 5 km,对高度 1 km 目标的探测水平方向的最远距离为 4.9 km,则 16 个传感器分系统可以形成对长 27.64 km、宽 27.64 km、高度 1 km 以下 RCS 为 0.01 m^2 的“低慢小”目标的不间断探测能

力。若需要建立长 500 km,宽度 100 km,栅格化感知林带,一共需要 $15 \times 73 = 1095$ 个传感器分系统。

4 结语

“低慢小”目标探测是世界性难题,既有来自“低慢小”目标本身的影响因素,也有来自传感器探测必须遵循的客观限制,如地形遮蔽、地球曲率等因素影响。本文提出了一种栅格化解决“低慢小”目标探测方案,核心是在传感器性能和成本之间选择合适点,选择廉价且性能较优的传感器,以便于栅格化大规模部署,即可弥补部分区域“低慢小”探测盲区,也可以在关键要地建立栅格化感知林带,实现对“低慢小”目标大区域探测。需要说明的是,基于探测指标一定情况下,传感器成本直接与最大可探测距离相关,传感器与最大可探测距离模型涉及具体工艺、材料、技术等限制,文中没有具体给出,但是建立的栅格化感知系统部署模型对栅格化感知系统推广具有重要指导意义。

参考文献

- [1] 杨佳会,朱超磊,许佳,等. 俄乌冲突中的无人机运用[J]. 战术导弹技术, 2022(3):116-123.
- [2] 陈伟.“低慢小”无人机反制装备与理论探析[J]. 河南科技, 2022, 4(2):10-13.
- [3] 罗淮鸿,卢盈齐. 国外反“低慢小”无人机能力现状与发展趋势[J]. 飞航导弹, 2019(6):32-36.
- [4] 刘宏. 无人机探测反制技术及应用研究[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(25):135-137.
- [5] 蒋帅. 无人机探测技术及系统运用综述[C]//第三届体系工程学术会议论文集——复杂系统与体系工程管理. 珠海:国防科技大学系统工程学院, 2021: 354-361.
- [6] MARTELLI T, COLONE F, CARDINALI R. DVB-T Based Passive Radar For Simultaneous Counter-Drone Operations and Civil Air Traffic Surveillance[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2020, 14(4):505-515.
- [7] 韩慧孝,赵全习,杨凡,等. 防空作战中“低、慢、小”航空器不利影响因素探析[J]. 飞航导弹, 2017(3): 35-38.
- [8] 丁鹭飞,耿富录,陈建春. 雷达原理[M]. 北京:电子工业出版社, 2014:211-212.
- [9] 许道明,张宏伟. 雷达低慢小目标检测技术综述[J]. 现代防御技术, 2018, 46(1):152-159.