

复杂环境下高光谱图像伪装目标的精准检测与识别研究

彭萌萌

西北工业大学 陕西西安 710129

摘要: 高光谱成像技术凭借其独特的光谱分辨能力,在复杂环境下的伪装目标检测与识别领域展现出显著潜力。传统遥感手段难以有效应对背景干扰与目标伪装的双重挑战,而高光谱数据通过连续窄波段成像,能够捕获地物细微的光谱特征差异,为隐蔽目标的精准辨识提供物理依据。本文聚焦于高光谱图像的特性,深入探讨其在复杂环境下的目标检测与识别原理,分析其技术优势,并系统梳理当前主流的检测与识别方法。研究旨在突破传统视觉与多光谱技术的局限,通过挖掘高光谱数据的内在信息,提升对伪装目标的感知与判别能力,为国防、环境监测及资源勘查等领域提供关键技术支撑。

关键词: 高光谱图像;伪装目标;目标检测;目标识别;复杂环境

前言

随着我国《新一代人工智能发展规划》和《数字中国建设整体布局规划》的深入推进,遥感信息技术在国防安全、生态监测等领域的战略价值日益凸显。复杂环境下的伪装目标检测与识别作为遥感领域的关键技术挑战,直接关系到国家安全和资源勘查的精准化水平。高光谱成像技术凭借其独特的光谱分辨能力,能够捕获人眼无法辨别的细微光谱特征差异,为穿透视觉伪装提供了全新的技术途径。当前高光谱技术已从理论研究逐步走向工程应用,其在复杂背景干扰下依然保持优异的目标鉴别能力,成为突破传统探测手段局限性的重要技术方向。

一、高光谱图像成像的工作原理

高光谱成像基于物质与电磁波相互作用物理机制,通过成像光谱仪对地物辐射能量进行连续光谱与空间同步采集。成像系统用色散或干涉分光原理,将入射辐射分解为数百窄波段(带宽5-10 nm),光谱覆盖可见光到短波红外区域^[1]。推扫式成像通过线阵探测器逐行采集数据,记录空间点光谱信息,形成三维数据立方体。成像遵循辐射传输理论,先由光学系统收集地物反射辐射,经分光投射到探测器阵列,探测器将光信号转换为电信号并量化。为获准确反射特性,需进行辐射定标,包括绝对和相对定标,再用大气校正模型消除大气影响,得到地表真实反射率数据^[2]。高光谱成像系统性能取决于光谱、空间分辨率和辐射精度。现代成像仪用低温冷却

MCT探测器提高信噪比,用嵌入式定标光源实时校正辐射,通过GPS/IMU集成系统精确几何定位,保障光谱数据准确反映物质特征,为后续分析识别提供可靠基础。

二、复杂环境下高光谱图像伪装目标的优势分析

(一) 高光谱技术实现伪装目标精准检测的独特优势

高光谱技术在复杂环境下实现伪装目标精准检测的优势主要体现在其卓越的光谱分辨能力和特征提取能力。通过纳米级的光谱采样间隔,高光谱成像系统能够获取地物在400-2500nm光谱范围内的连续光谱信息,光谱分辨率可达5-10nm。这种精细的光谱采样能力使其能够捕获传统多光谱传感器无法探测到的细微光谱特征差异^[3]。在复杂环境背景下,尽管伪装目标在宽波段范围内模拟了自然背景的反射特性,但其材料本身的分子结构和化学成分差异会导致在特定特征波段出现独特的光谱响应。例如,人造伪装材料在短波红外区域的吸收特征与天然植被存在可量化的差异,具体表现在2150nm和2200nm处的吸收深度和波形特征上。高光谱技术通过光谱微分分析、吸收特征参数提取等算法,能够有效增强这些细微差异,实现亚像元级目标的精确检测。

(二) 高光谱技术实现伪装目标精确识别的核心优势

高光谱技术在目标识别层面的优势主要表现在其多维特征挖掘能力和物质识别能力。高光谱数据包含丰富的光谱特征信息,能够构建高维特征空间进行精确的目标分类与识别。通过提取光谱吸收特征参数(包括吸收深度、吸收宽度、吸收面积等)、光谱形态特征(如光谱斜率、曲率特征)以及光谱微分特征,可以建立详细

的目标光谱指纹库^[4]。基于这些特征,采用支持向量机、随机森林等机器学习算法,能够实现高精度的目标材质识别。特别地,高光谱技术能够应用光谱解混算法,通过线性或非线性混合模型,精确估计混合像元中各端元的丰度比例,从而实现对亚像元级目标的定量识别。这种基于物质光谱特性的识别机制,使高光谱技术能够准确区分视觉相似但材质不同的目标,如识别伪装网与真实植被、迷彩涂料与自然土壤等,为复杂环境下的目标识别提供可靠的技术手段^[5]。

三、复杂环境下高光谱伪装目标检测方法

(一) 基于光谱角制图与匹配滤波的检测方法

光谱角制图(SAM)和匹配滤波(MF)是高光谱目标检测中基于光谱特征的经典方法。SAM方法通过计算待测像元光谱与参考光谱在高维特征空间中的夹角来评估相似性,夹角越小表明与目标光谱越相似。该方法对光照强度变化不敏感,主要关注光谱形状的相似度,在已知目标光谱特性的场景中表现优异。匹配滤波方法则通过设计最优滤波器来最大化目标信号与背景噪声的信噪比,其核心思想是在抑制背景干扰的同时增强目标响应^[6]。

在实际应用中,通常需要先进行背景统计建模,然后通过滤波器输出值来判断目标存在概率。这两种方法都需要预先获取目标的纯光谱信息作为先验知识,在军事目标检测中,可通过实验室测量或野外采样获取典型伪装材料的光谱特征。应用效果表明,在背景相对均匀、目标光谱特征稳定的环境下,SAM和MF能够达到较高的检测精度,其中SAM对光谱形状变化敏感,适合区分材质相似但光谱特征有细微差异的目标;MF则对信噪比较为敏感,在低对比度环境下仍能保持较好的检测性能。然而在复杂自然环境中,由于背景杂波干扰和目标光谱变异,这两种方法的虚警率会显著升高。

(二) 基于异常检测与RX算法的检测方法

异常检测算法是针对未知目标光谱特征的重要检测手段,其中Reed-Xiaoli(RX)算法是最具代表性的方法。RX算法基于多元正态分布假设,通过计算每个像元与背景统计模型的马氏距离来检测异常点。其核心原理是将高维光谱空间中的异常检测问题转化为假设检验问题,利用全局或局部背景统计特性建立检测阈值。在实际应用中,RX算法首先需要估计背景的协方差矩阵和均值向量,然后计算每个像元的马氏距离作为异常得分。

为了适应复杂环境,研究人员提出了多种改进版本:

局部RX算法通过滑动窗口方式建立局部背景模型,更好地处理空间非均匀背景;核RX算法通过核技巧将数据映射到高维特征空间,有效处理非线性可分问题;递归RX算法则采用递推计算方式,显著降低计算复杂度。这些方法在军事侦察、环境监测等领域得到广泛应用,特别是在目标光谱特性未知或存在多种伪装类型的场景中表现出色。应用效果评估表明,RX算法及其变体能够有效检测出与背景统计特性显著不同的异常目标,对小型伪装目标和低概率目标具有较好的检测能力,但其性能高度依赖于背景模型的准确性,在复杂异构环境中容易产生虚警。

(三) 基于深度卷积神经网络的目标检测方法

深度学习方法为高光谱伪装目标检测带来突破,CNN在空谱特征联合学习表现卓越。3D-CNN可同时处理空间邻域与光谱连续特征,用三维卷积核提取空谱特征,其网络含多个卷积、池化和全连接层,能抽象多层次特征。两阶段检测框架先由区域提议网络生成候选目标区域,再精细分类和定位,在Faster R-CNN基础上针对高光谱数据优化。单阶段检测器端到端训练,直接在特征图预测目标类别和位置,如改进的YOLO和SSD可实现实时检测。

这些方法经大规模标注数据训练,能学习对光照、背景干扰有鲁棒性的特征。实际应用需用数据增强技术扩充样本,如光谱变换、空间旋转和噪声添加等。应用显示,深度学习方法在复杂环境检测精度优于传统方法,处理光谱变异等挑战优势明显。但这些方法需大量标注数据训练,计算资源需求高,实际部署要权衡性能与效率。

四、高光谱伪装目标精细识别方法

(一) 基于支持向量机与随机森林的识别方法

支持向量机和随机森林是传统机器学习中应用于高光谱伪装目标识别的重要方法。支持向量机通过构造最优分类超平面实现高维特征空间中的目标判别,其核心优势在于利用核函数技巧处理非线性可分问题,常见核函数包括径向基函数核和多项式核。在实际应用中,首先需要对高光谱数据进行特征提取和降维处理,采用主成分分析保留主要光谱特征,或通过线性判别分析增强类间区分度。随机森林方法则通过构建多棵决策树并进行集成学习,每棵树使用随机选择的特征子集和样本子集进行训练,最终通过投票机制得出分类结果。

这种方法能够有效避免过拟合,并提供特征重要性评估,有助于理解不同光谱波段对识别任务的贡献度。

在复杂环境下的伪装目标识别中，这两种方法都表现出较好的适应性。支持向量机在小样本情况下仍能保持较好的泛化能力，适用于标注数据有限的军事应用场景；随机森林则对高维数据处理表现出色，能够有效应对光谱特征间的多重共线性问题。应用效果表明，在中等复杂度的自然环境中，这两种方法能够实现较好的伪装目标识别精度，但对极端复杂环境下的光谱变异和背景干扰的适应性仍有待提升。

（二）基于光谱解混与端元提取的识别方法

光谱解混技术是针对高光谱图像中混合像元问题的重要解决方案，能够实现亚像元级别的目标识别。该方法基于线性或非线性混合模型，将每个像元的光谱信号分解为若干端元光谱及其对应的丰度系数。端元提取是解混过程的关键步骤，常用算法包括N-FINDR和顶点成分分析（VCA）。N-FINDR通过寻找能够包含所有像元的最小单形体来提取端元，而VCA则通过投影寻踪方式逐步提取最纯的端元光谱。

在实际应用中，首先需要确定图像中的端元数量，然后通过端元提取算法获取纯净物质的光谱特征，最后采用全约束最小二乘法等优化算法计算各端元的丰度分布。这种方法特别适用于低空间分辨率的高光谱数据，能够识别出尺寸小于地面采样距离的伪装目标。在复杂环境背景下，光谱解混技术能够有效区分材质相似但光谱特征存在细微差异的伪装目标与自然背景，例如识别迷彩网与真实植被的混合像元。应用效果显示，该方法能够提供精确的目标材质组成信息，生成丰度图直观展示目标的空间分布特征，但对端元提取的准确性和解混模型的适用性有较高要求。

（三）基于深度学习与空谱特征融合的识别方法

深度学习技术为高光谱伪装目标识别提供了新的突破方向，特别是空谱特征融合的方法在复杂环境下展现出显著优势。卷积神经网络通过设计三维卷积核，能够同时提取光谱维和空间维的联合特征，有效捕获伪装目标的细微光谱差异和空间上下文信息。递归神经网络则擅长处理光谱序列数据，通过长短期记忆单元捕捉光谱特征间的长期依赖关系。自编码器通过编码-解码结构学习数据的紧凑表示，可用于特征降维和异常检测。

在实际应用过程中，通常采用端到端的训练方式，

直接从未经处理的高光谱数据中学习具有判别性的特征表示。空谱联合网络架构同时利用局部空间邻域信息和连续光谱特征，通过多层次的特征抽象逐步增强目标的鉴别性特征。生成对抗网络通过对抗训练提升模型泛化能力，能生成多样训练样本以适应复杂环境。这些深度学习方法在大规模标注数据支持下，可自动学习对光照、季节和环境干扰具鲁棒性的特征表示。应用效果显示，基于深度学习的识别方法在极端复杂环境下识别精度高，处理光谱变异、遮挡和尺度变化等挑战优势明显，但对训练数据量和计算资源要求高。

结语

高光谱图像技术为复杂环境下伪装目标检测与识别提供突破性方案。本研究剖析成像机理与光谱特征，阐述其在探测伪装目标上的优势，如光谱分辨能力强、抗复杂环境干扰。检测方法上，从经典光谱特征法到现代深度学习法，推动探测精度与效率提升。识别技术结合传统机器学习与深度学习，构建多层次识别体系。不过，该技术面临实时处理、环境适应性等挑战。未来研究应聚焦算法优化、多源数据融合及硬件加速等方向，发挥其在国防安全、环境监测等领域的应用价值，为国家战略需求提供技术支撑。

参考文献

- [1]徐景余,包妮沙,郎洁双,等.优化稀疏表示的迷彩伪装目标高光谱识别方法研究[J].光谱学与光谱分析,2024,44(12):3534-3542.
- [2]王俊佟,杨华东.基于高光谱解混的伪装目标识别技术研究[J].半导体光电,2024,45(2):261-268.
- [3]黄兆男.基于偏振光谱成像的草地伪装物识别研究[J].Material Sciences,2024,14.
- [4]甘源滢,刘洲洲,景月娟,等.一种基于空-谱特征融合的高光谱伪装目标检测方法:CN202211434131.1[P].
- [5]胡怡斌,包妮沙,刘善军,等.典型伪装材料高光谱特征及识别方法研究[J].光谱学与光谱分析,2023,43(1):6.
- [6]电子科学与技术.高光谱伪装设计机理及多谱段伪装材料研究[D].2024.