



图2 政务人工智能工程治理闭环模型

4 结论

本文结合广州市“穗智政”案例，提出城市级政务人工智能生态系统的构建模式，研究得出三点结论：首先，未来政务人工智能发展的核心是形成城市级智能能力生态，而非建设更多孤立应用；其次，人工智能基础设施、工程化治理和生态运营是城市 AI 发展的关键机制；最后，中国城市人工智能治理正形成从技术创新驱动转向生态治理创新的新路径，从“盆景”到“森林”，不仅是人工智能应用规模的扩大，更是政府治理模式从项目逻辑向生态逻辑的深层转型。

参考文献

- [1] 黄璜. 数字政府建设的理论逻辑与实践路径[J]. 中国行政管理, 2021(5):6-12.
- [2] 张新平,陈潭. 人工智能赋能政府治理现代化研究[J]. 公共管理学报,2022(3):1-14.
- [3] Dunleavy P, Margetts H, Bastow S, et al. Digital era governance: IT corporations, the state, and e-government[J]. Journal of Public Administration Research and Theory,2006,16(3):467-494.
- [4] OECD. Digital Government Review of China: Towards a Data-

Driven Public Sector[R]. Paris: OECD Publishing,2023.

- [5] 中共中央、国务院. 数字中国建设整体布局规划[Z].2023.
- [6] Janssen M, Kuk G. The challenges and limits of big data algorithms in public administration[J]. Government Information Quarterly,2016,33(3):371-377.
- [7] Mergel I, Edelman N, Haug N. Defining digital transformation: Results from expert interviews[J]. Government Information Quarterly,2019,36(4).
- [8] Tapscott D. The Digital Economy[M]. New York: McGraw-Hill,1996.
- [9] Moore J F. Predators and prey: A new ecology of competition[J]. Harvard Business Review,1993,71(3):75-86.
- [10] Yin R K. Case Study Research and Applications: Design and Methods[M].SAGE,2018.
- [11] Wirtz B W, Weyerer J C, Geyer C. Artificial intelligence and the public sector[J]. International Journal of Public Administration,2019,42(7):596-615.
- [12] Tiwana A. Platform Ecosystems: Aligning Architecture, Governance, and Strategy[M].Morgan Kaufmann,2014.

Development and Future Perspectives of Spatial Low-Contrast Target Recognition Technologies

Zhengguang Zhao Chunguang Du Lingchong Dong

Taiyuan Satellite Launch Center, Taiyuan, Shanxi, 036000, China

Abstract

With the increasing frequency of human spaceflight activities, the number of weak-signal small space targets continues to grow, posing significant challenges to space situational awareness. Weak-signal targets are characterized by low image signal-to-noise ratios, small pixel proportions, complex backgrounds, and sharp luminance variations; consequently, traditional image processing methods struggle to achieve stable detection and accurate recognition. This paper analyzes the fundamental theoretical models for imaging weak-signal space targets, compares the current state of technological development both domestically and internationally, examines mainstream image recognition techniques for weak-signal space targets, focuses on identifying the core bottlenecks in current technological advancements, and outlines potential future directions for technological development. This research can serve as a theoretical foundation for the development of space weak-signal target monitoring systems, the optimization of associated algorithms, and the practical implementation of related engineering solutions.

Keywords

spatial faint targets; image recognition; signal-to-noise ratio; spatial situational awareness

空间暗弱目标图像识别技术发展与展望

赵争光 杜春光 董凌冲

太原卫星发射中心, 中国·山西 太原 036000

摘要

随着人类航天活动的日益频繁, 空间暗弱小目标数量持续增长, 空间态势感知面临严峻挑战。暗弱目标具有成像信噪比低、像素占比小、背景复杂、亮度起伏剧烈等特征, 传统图像处理方法难以实现稳定检测与精准识别。本文分析了空间暗弱目标成像基础理论模型, 对比国内外技术发展现状, 剖析空间暗弱目标图像识别主流技术, 重点探讨了当前技术发展的核心瓶颈, 展望了未来技术发展方向。相关研究可为空间暗弱目标监测系统研制、算法优化与工程落地提供理论参考。

关键词

空间暗弱目标; 图像识别; 信噪比; 空间态势感知

1 引言

21 世纪以来, 全球航天发射活动呈现爆发式增长, 低地球轨道 (LEO) 及地球同步轨道 (GEO) 上的在轨物体数量急剧增加, 且每年仍以显著速度增长。空间暗弱目标的精准识别具有极高的战略价值与工程意义。空间暗弱小目标的图像识别技术成为了空间态势感知 (Space Situational Awareness, SSA) 的核心环节。所谓“暗弱”目标, 通常指在成像传感器上信噪比极低、占据像素极少 (通常小于 10×10 像素甚至仅 1-2 像素)、且背景杂波强烈的目标。实现对此类目标的高精度、高实时性检测与识别, 不仅关乎国家航天资产的安全防护, 也是提升国家在国际空间领域竞争力和话语权的重要战略支撑。

【作者简介】赵争光 (1979-), 男, 中国陕西乾县人, 本科, 工程师, 从事光电测量及航天测控技术研究。

空间暗弱目标图像识别流程一般包含图像预处理、背景抑制、微弱信号增强、目标检测提取、轨迹关联、目标分类识别与物理特性反演。早期算法以时域差分、空间滤波、匹配滤波为主, 适合简单星空场景; 随着算力提升, 卷积神经网络、Transformer 等深度学习模型逐步应用于微弱目标检测, 在复杂背景、低信噪比场景下表现出更强的泛化能力。

2 空间暗弱目标成像特性

提升空间暗弱目标的识别精度和识别效率, 我们首先要深入理解空间暗弱目标在成像过程中的物理特性及其面临的各种干扰因素。

2.1 天基复杂背景

天空复杂背景是空间目标光学观测中主要干扰源, 天基图像的背景并非均匀黑体, 而是由多种干扰源叠加而成的复杂场, 包含天光辐射、恒星背景、大气扰动等, 会直接降低暗弱空间目标的图像信噪比, 制约目标检测与提取能力。

地基光电观测系统中,天光背景由大气对太阳光、月光的散射形成。月夜、晨昏时段天光亮度显著抬升,图像整体底噪声增大,暗弱目标微弱信号容易被背景淹没。对于低轨道观测平台,地球反照是主要干扰源。云层、海洋、陆地对太阳光的反射率各异,尤其是高反照率的云层,可能导致探测器局部饱和,淹没附近的暗弱信号。

恒星背景是星空观测固有干扰。视场内大量恒星呈现点状像元,部分暗星亮度与空间碎片接近,极易被误判为目标。

大气湍流会造成背景光斑抖动、图像弥散模糊,背景灰度随机起伏,产生大量类目标伪信号。云层、薄雾会带来局部高亮遮挡,不仅直接遮蔽目标,还会引入大面积非均匀背景,进一步加大背景抑制难度。

CCD/CMOS 传感器的固有噪声包括暗电流噪声、热噪声及读出噪声。此外光学系统的像差和杂散光也会导致图像模糊,降低目标特征的清晰度。

复杂天空背景下,传统图像处理方法效果受限,需要采用多帧差分,抑制恒星与天光干扰等技术,才能对空间进行有效识别。

2.2 空间暗弱目标特性

空间暗弱目标尺寸小、距离远、光学信号微弱,具备成像质量差、易受背景干扰等典型特性,探测识别难度远高于常规空间目标。空间暗弱目标信号强度,通常与背景噪声处于同一数量级,远低于传统检测算法所需的阈值(通常 $SNR > 5$)。

在辐射特性上,暗弱目标无自主发光能力,仅依靠反射太阳光、地球大气散射光成像。其有效反射面积积极小。空间目标在远距离成像时,往往只占据几个像素,甚至呈现为亚像素点源,传统的基于边缘或轮廓的检测方法完全失效,只能依赖灰度分布和运动轨迹进行判断。

空间目标遵循开普勒轨道运动规律,运动特性是其重要特征。暗弱目标多处于高低不同轨道,相对观测平台存在高速角运动。其运动轨迹受轨道类型(LEO、GEO等)、观测视角及相对速度影响,表现为直线、曲线或不规则轨迹。长曝光下会产生运动模糊,进一步降低能量集中度,增加检测难度。

3 空间暗弱目标成像基础理论模型

3.1 光电成像信号模型

光电探测器获取的图像像素灰度可以表达为目标信号、星空背景、大气杂光与噪声的叠加模型:

$$I(x, y, t) = S(x, y, t) + B(x, y, t) + N(x, y, t)$$

式中: $I(x, y, t)$ 为 t 时刻像素 (x, y) 的成像灰度值; $S(x, y, t)$ 为暗弱目标有效信号; $B(x, y, t)$ 为星空背景与杂散光分量; $N(x, y, t)$ 为系统噪声,包含光子散粒噪声、读出噪声、暗电流噪声。暗弱目标的核心特征就是目标有效信号较弱,

目标信号淹没在背景与噪声之中。

3.2 成像信噪比计算公式

目标回波光子的能量决定信号强度,综合各类噪声,信噪比表达式:

$$SNR = \frac{S}{\sqrt{S + B + N_{read}^2 + N_{dark}^2}}$$

B 为背景光子数; N_{read} 为读出噪声; N_{dark} 为暗电流噪声。当 $SNR < 2$ 时,目标属于典型暗弱目标,肉眼难以分辨,必须依靠专门的微弱信号处理算法提取。

3.3 运动拖尾退化模型

低轨目标过境角速度大在积分曝光期间目标在焦平面产生位移,形成拖尾图像。拖尾会造成能量分散,单位像素信号进一步降低,信噪比恶化。传统点目标检测算法失效,需要针对线状拖尾目标设计专用识别算法。

4 空间暗弱目标图像识别主流技术

4.1 星空背景抑制预处理技术

背景抑制是暗弱目标识别的前置关键步骤,目的是去除恒星、渐变天光背景、固定噪声。

(1) 空间域滤波: 包括中值滤波、高斯滤波、双边滤波、形态学滤波。采用开运算、闭运算剔除点状恒星,平滑渐变背景。

(2) 时域差分法: 利用连续多帧图像,恒星属于静止目标,空间碎片属于运动目标,通过帧间差分运算抵消静态背景。三帧差分公式:

$$D_t(x, y) = |I_{t+1}(x, y) - I_t(x, y)| - |I_t(x, y) - I_{t-1}(x, y)|$$

差分后保留运动目标信号,抑制静止星空。

(3) 背景建模法: 包括滑动平均背景、高斯混合模型、局部背景估计,对局部邻域像素统计拟合背景曲面,原始图像减去估计背景得到残差图像,突出微弱目标。

4.2 微弱目标增强与匹配滤波检测

匹配滤波是针对特定形状目标的最优检测方法,对点目标、拖尾目标设计对应的模板。二维匹配滤波输出:

$$O(x, y) = I(x, y) * h(x, y)$$

$h(x, y)$ 为目标模板; $*$ 代表卷积运算。当模板与目标形状匹配时输出能量达到峰值,完成目标增强。针对线状拖尾目标,采用方向可变的线积分滤波、霍夫变换检测,沿着运动轨迹积分积累微弱能量,提升信噪比。

4.3 轨迹关联识别技术

单帧图像很难区分噪声尖峰和真实目标,需要多帧轨迹关联。基于卡尔曼滤波对候选目标轨迹进行预测,建立代价函数完成数据关联,将零散的候选点串联成连续轨迹,剔除随机噪声造成的虚假目标,实现真实空间目标的确认识别,该技术广泛应用于光电观测系统的后端处理流程。

4.4 基于深度学习的智能识别算法

随着人工智能技术发展,YOLO、Faster-R-CNN、U-Net、