

系统仿真学报
Journal of System Simulation
ISSN 1004-731X, CN 11-3092/V

《系统仿真学报》网络首发论文

题目：天基空间小目标复杂场景数字成像仿真
作者：李鹏飞，徐伟，朴永杰，方应红，石敦攀
DOI：10.16182/j.issn1004731x.joss.24-0900
收稿日期：2024-08-14
网络首发日期：2024-10-15
引用格式：李鹏飞，徐伟，朴永杰，方应红，石敦攀. 天基空间小目标复杂场景数字成像仿真[J/OL]. 系统仿真学报.
<https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.24-0900>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

天基空间小目标复杂场景数字成像仿真

李鹏飞^{1,2,3}, 徐伟^{1,3*}, 朴永杰^{1,3}, 方应红^{1,3}, 石敦攀^{1,2,3}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100039;
3. 中国科学院天基动态快速光学成像技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 针对天基空间目标检测技术研究对空间图像数据源的普遍需求, 重点面向智能算法训练数据不足以及传统算法使用数据单一等问题, 以生成空间小目标复杂场景下动态数字序列图像为目的, 设计了一种基于天基观测平台的可见光数字成像仿真系统。提出了一种小目标成像模型, 基于二维形状特征点描述法及成像解析模型, 对空间目标进行数字建模及成像模拟; 设计了一种背景恒星成像方法, 经过视场恒星选取、成像坐标转换和亚像素级位置建模, 可实现精度达 ± 0.005 像素的星点目标位置成像建模; 设计了空间环境下多种光照背景的动态模型, 并进行了成像噪声分析及建模, 拓扑了空间目标检测图像的场景种类及鲁棒性检测的试验条件。最后, 在运动仿真算法设计中加入了目标灰度动态变化、目标曲线运动、运动拖尾以及平台抖动等成像仿真功能。仿真结果表明, 该仿真系统可生成定制化的动态数字图像序列。经必要性与充分性验证评估, 本数字仿真系统满足空间目标检测算法开发对多元图像数据的需求, 对空间目标检测算法研究有一定使用价值。

关键词: 空间小目标; 复杂场景; 成像模型; 图像处理; 动态仿真

中图分类号: TP391.9; TP751.1 文献标志码: A

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.24-0900

Digital Imaging Simulation of Complex Scene of Space-based Space Small Target

Li Pengfei^{1,2,3}, Xu Wei^{1,3*}, Piao Yongjie^{1,3}, Fang Yinghong^{1,3}, Shi Dunpan^{1,2,3}

(1. Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physice, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Key Laboratory of Space-Based Dynamic & Rapid Optical Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;)

Abstract: In response to the universal demand for space target detection technology research in space image data sources, this study focuses on the problems of insufficient training data for intelligent algorithms and the use of single data for traditional algorithms, with the goal of generating dynamic digital sequence images of small space targets in complex scenes. A visible light digital imaging simulation system based on a space observation platform is designed. In this paper, a small target imaging model is proposed, which is based on *two-dimensional shape feature point description and imaging analysis model* to carry out digital modeling and imaging simulation of space targets. A background star imaging method is designed. Through the selection of stars in the field of view, the transformation of imaging coordinates and *the sub-pixel position modeling*, the accuracy of the star point target position imaging modeling can reach ± 0.005 pixels. *The dynamic models of various light backgrounds in space environment* are designed, and the imaging noise analysis and modeling are carried out. The types of

收稿日期: 2024-08-14 修回日期: 2024-09-23

第一作者: 李鹏飞(2000-), 男, 硕士生, 研究方向为空间目标检测。

通讯作者: 徐伟(1981-), 男, 研究员, 博士, 研究方向为成像电子学。

scene and the test conditions of robustness detection of space target images are topologies. Finally, the imaging simulation functions such as *dynamic change of target gray level*, *target curve movement*, *motion trailing and platform jitter* are added to the design of motion simulation algorithm. The simulation results show that the simulation system can generate customized dynamic digital image sequences. After the necessity and adequacy verification and evaluation, the digital simulation system can meet the demand of multiple image data for the development of spatial object detection algorithm, and has certain practical value for the research of spatial object detection algorithm.

Keywords: space small target; complex scene; imaging model; image processing; dynamic simulation

0 引言

近年来, 航天器入轨数量呈现增长趋势^[1], 特别是小卫星技术广泛应用后, 入轨的航天器数量大幅增加^[2]。由此, 导致空间轨道占用率提高, 空间碎片与废弃卫星数量增加, 航天器在轨碰撞风险提高, 对正常在轨卫星的安全运行构成了严重威胁。因此, 迫切需要卫星等航天器具备在轨自动感知周围空间目标的能力, 基于图像的空间目标检测技术具有重大的工程应用价值^[3]。

空间目标检测技术包括基于人工智能和传统图像处理两类技术途径^[4], 两者技术开发与研究均对待检测图像数据有较大依赖, 特别是基于深度学习的人工智能方法需要大量图像数据输入参与模型训练^[5]。由于天基成像图像获取难度较大, 并且大部分天基观测器的图像数据涉及一定军事敏感性而不易公开, 故导致可用于空间目标监视系统设计及验证的天基空间目标成像数据集十分紧缺, 限制了检测算法面向实际应用需求的优化发展。

空间目标成像仿真技术是提供待检图像的最佳途径之一, 在技术研究与工程实现中也被常用于设备及其算法的地面端验证^[6]。该技术最初源于星图模拟器设计, 主要被用于星敏传感器地面试验^[7], 随着空间目标监测技术的发展, 面向空间目标的成像仿真技术被逐渐重视并发展起来。李骏等^[8]实现了对空间目标运动拖尾问题的优化仿真, 所生成的仿真图像序列可反映空间点扩散和帧内运动特性。陈维真等^[9]对空间目标运动性质进行了仿真建模, 并基于天基可见光探测器 (SBV) 实拍图像数据对所生成的仿真序列图像进行定性验证。张伟等^[10]

对恒星成像信号强度及成像特性进行了研究, 建立了详细的仿真计算模型, 可生成较大星等 (星等 > 10) 的星空背景图像。李星等^[11]提出了四棱锥分区检索恒星算法, 使实时仿真星图刷新率提高至 110Hz。夏胜夫等^[6]基于空间轨道位置模型对相机凝视及跟踪成像模式进行了仿真分析。杨晋生等^[12]基于卫星表面材料的双向反射分布函数 (BRDF) 进行光线反射计算模型设计, 实现空间面目标实时、高质量两种模式的成像仿真。张威等^[13]通过引入抖动及运动先验误差的仿真系统设计, 实现对真实星空环境成像误差的分析。经过多年技术研究, 空间目标成像仿真的设计框架逐步清晰, 仿真效果也更接近实际成像, 但现有仿真图像仍存在成像仿真元素单一、成像背景局限、成像仿真动态性不足等问题, 缺乏对目标检测算法的鲁棒性检验能力。

本文以可见光相机为仿真模拟对象, 以复杂光照空间小目标动态成像图像为仿真目标, 针对空间复杂的光照场景进行空间目标成像仿真研究。主要创新如下: 1. 在小目标模拟方面, 提出了基于二维形状特征点描述法和成像解析模型的小目标数字化及成像建模方法; 2. 在恒星背景模拟方面, 基于相机成像机理, 简化了传统星图模拟复杂的坐标转化步骤, 设计了一种简易的视场恒星选取方法并结合亚像素级点目标灰度成像位置建模, 实现较高精度的背景恒星成像模拟; 3. 在光照场景模拟方面, 建立了多种动态光照背景模型并引入噪声计算模型, 可生成目标局部信噪比动态变化的数字序列图像; 4. 建立了目标曲线运动、灰度动态变化、成像拖尾及平台抖动等动态模型, 最大程度模拟真实空

间场景下的天基观测平台成像效果。本文重点面向智能算法训练数据不足以及传统算法使用数据单一等问题, 为实际应用的空间目标监测系统设计及检测算法研究提供数据输入。

1 成像仿真系统设计

空间目标可见光探测成像图像一般由目标、恒星、光照背景以及噪声等图像元素组成, 可由式(1)表示。当目标距离较远或相机空间分辨率较大时, 目标在所成图像上仅占据几个到十几个像素, 表现为典型的小目标特征, 是空间目标检测技术中的重点及难题之一^[14]。由此, 针对此类应用需求, 该成像仿真系统中提出的空间目标仿真算法主要适用于空间小目标。

$$I(x, y) = T(x, y) + B(x, y) + G(x, y) + N(x, y) \quad (1)$$

式中, I 表示尺寸为 $M \times N$ 像元数的图像, $I(x, y)$ 表示图像 I 中 (x, y) 位置处的像素灰度值; $T(x, y)$ 表示图像 I 中 (x, y) 位置处目标的像素灰度值; $B(x, y)$ 表示恒星的像素灰度值; $G(x, y)$ 表示光照背景的像素灰度值; $N(x, y)$ 表示噪声的像素灰度值。

成像仿真系统依据可见光探测成像图像组成元素构建仿真元素, 以探测系统的物理特性及可见光相机的成像参数为理论原型, 对空间场景下天基成像平台进行数字化模拟, 最终生成模拟对天成像的仿真图像序列。

仿真系统设计内容及流程如图 1 所示。首先依据仿真系统参数进行成像模型设计, 实现三维坐标空间物体位置、亮度等信息到图像二维坐标空间的理论映射, 模拟相机光学系统成像过程; 然后建立大小为像素分辨率 $N \times M$ 的仿真图像原始容器, 各像素值初始设为零; 仿真图像主要由目标、恒星、背景光照以及噪声等图像仿真元素综合叠加而成, 由此生成仿真图像序列的第 i 帧; 按照仿真时间戳更新图像仿真元素状态信息 (包括目标位置、目标灰度值、背景光照和噪声变化参数、成像平台抖动偏移量等时变参数), 最后通过总帧数, 来确定图像生成循环次数, 最终得到指定光照场景及成像系

统参数下的空间目标图像序列。

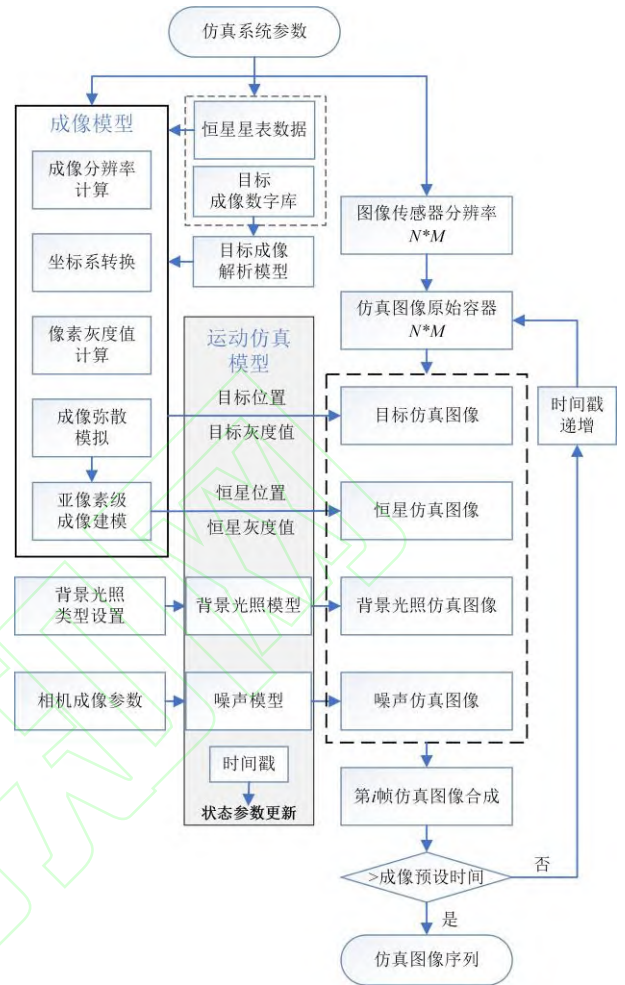


图 1 仿真系统设计框图

Fig. 1 Block diagram of simulation system design

系统成像模型的输入参数为: 图像传感器像元尺寸 P 、图像传感器像元数 $N \times M$ 、成像相机曝光时间 T 、图像传感器量子效率 η 、图像传感器增益 K 、图像传感器灰度偏置 I_{offset} 、图像传感器量化等级 ADC 、光学系统透过率 τ 、光学系统通光口径 D 、相机焦距 f , 其他输入参数包括相机光轴赤纬 C_w 、相机光轴赤经 C_j 、目标星等 m 、目标距离 L 、成像时间 T_{total} 等。利用以上参数进行仿真模型及算法设计, 通过其预设值对仿真系统进行初始化。

2 空间小目标成像仿真

采用二维形状特征点描述法建立目标成像数

字库，设计目标成像解析模型导出目标成像的轮廓掩膜，然后建立目标成像模型，由目标亮度信息解算成像灰度值，最后加入弥散处理来模拟真实光学系统固有衍射现象。

2.1 目标数据建模

空间目标以典型卫星为例，对其具有明显形状特征的正视图进行数字建模设计。

2.1.1 二维形状特征点描述法

将视图中目标的粗轮廓分解为若干个基本形状，如圆形、矩形、平行四边形、多边形等，对每种基本形状分别设计包含真实尺寸、位置及形状信息的特征描述法，最后综合构建为目标视图轮廓的数字库。由二维形状特征点描述法构建的数字库架构及规则如表 1、表 2 所示。

对于每个目标数字库的首行约定如表 2 首行所示，其中 W 指目标成像容器矩形的宽度， H 指其高度，目标成像容器矩形至少包含目标轮廓的最小外接矩形。特征点描述坐标系的原点为目标成像容器矩形的中心， X 、 Y 轴指向为默认 XY 坐标系指向，如图 2 所示。点坐标即表示特征点的坐标信息，数字库中每个序号表示数字库的一行，每个特征点的描述信息用一行表示，即每个序号指向特定的特征点信息。描述同一个基本图形形状的特征点

构成一组，如圆仅有 1 个特征点（圆心）、水平矩形有 3 个特征点（左上角、右上角、左下角）、倾斜矩形有 4 个描述点（4 个顶点）。

表 1 基于二维形状特征点描述的数字库架构

Table 1 Digital library architecture based on two-dimensional shape feature point description

序号	名称	含义
1	序列号	从 1 开始，每行依次递增
2	点坐标	该特征点 X 轴与 Y 轴的坐标值
3	属性值	对该点描述的形状属性的补充值， 如：圆半径
4	属性	对基本图形形状种类的描述， 如：圆、矩形、...
5	识别号	某属性每组特征点排序号，同属性同组特征点识别号相同，此外依次递增
6	元素号	同组特征点组内各个元素点排序号
7	类别	对该点表示的图形类型的描述， 如：线、面

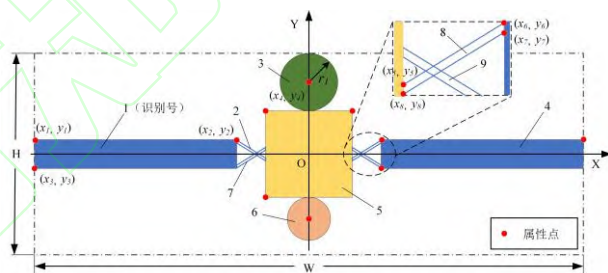


图 2 卫星正视投影粗轮廓分解及坐标建立

Fig. 2 Decomposition and coordinate establishment of the coarse contour of the satellite frontal projection

表 2 基于二维形状特征点描述的数字库构建规则

Table 2 Digital library construction rules based on two-dimensional shape feature point description

序列号	点坐标	属性值	属性	识别号	元素号	类别
1	(W,H)	0	0	0	0	0
xx	(X,Y)	圆: R	1: 圆	xx	xx	1: 面 2: 线
		水平矩形: 0	2: 水平矩形			
		倾斜矩形: 0	3: 倾斜矩形			
		平行四边形: 0	4: 平行四边形			

2.1.2 目标数据的成像解析模型

在给定上述目标数字库的基础上，利用目标数据成像解析模型对目标数字库进行像素级平面绘图，得到目标在特定像元分辨率 GSD 下的目标轮

廓掩膜，即目标区域内像素点值为 1，其余部分为 0 的二维像素矩阵。

解析过程以数字库的序列号为索引，依次逐行解析。首先解析序列号为 1 的目标数字库首行，得

到目标成像容器矩形的宽度 W 与高度 H , 利用式(2)对数字库中所有点坐标进行坐标计算, 实现特征点描述坐标系到成像容器像素坐标系的转换。成像容器像素坐标系定义如图 3 所示。

$$\begin{cases} C_k = \frac{x_k + W/2}{GSD} + N_{offset} \\ R_k = \frac{-y_k + H/2}{GSD} + N_{offset} \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots \quad (2)$$

式中, C_k , R_k 为成像容器像素坐标系下列、行坐标值; x_k , y_k 为特征点描述坐标系下特征点的 XY 坐标值; N_{offset} 为边缘偏移值; k 为数字库中第 k 个点。

(1) 圆形解析模型

圆形有 1 个特征点, 在数字库中占位 1 行。在该行数据信息中查询得到圆心坐标 (x_c, y_c) 及半径值 r_c , 坐标值通过式(2)进行坐标转换得到 (R_c, C_c) , 半径值通过式(3)转换。

$$r_{pix} = UpInt\left(\frac{r_c}{GSD}\right) \quad (3)$$

式中, r_{pix} 为成像容器像素坐标系中圆半径所占像素数; $UpInt(\cdot)$ 为向上取整。

其在成像容器像素坐标系中最小遍历范围为:

$$\begin{bmatrix} R_{min} & R_{max} \\ C_{min} & C_{max} \end{bmatrix} = UpInt\left(\begin{bmatrix} R_c - r_{pix} & R_c + r_{pix} \\ C_c - r_{pix} & C_c + r_{pix} \end{bmatrix}\right) \quad (4)$$

式中, R_{min} 、 R_{max} 分别为遍历范围最小、最大行坐标; C_{min} 、 C_{max} 分别为遍历范围最小、最大列坐标。

掩膜生成判据为:

$$\begin{cases} T_{model}(i, j) = 1, & (i - R_c)^2 + (j - C_c)^2 \leq r_{pix}^2 \\ T_{model}(i, j) = 0, & (i - R_c)^2 + (j - C_c)^2 > r_{pix}^2 \end{cases} \quad (5)$$

$$R_{min} \leq i \leq R_{max}, C_{min} \leq j \leq C_{max}$$

式中, $T_{model}(i, j)$ 为该遍历范围内 i 行 j 列掩膜标记。

(2) 水平矩形解析模型

水平矩形有三个特征点, 在数字库中占连续三行。水平矩形的宽和高分别与特征点描述坐标系的 X 和 Y 轴平行, 设左上角顶点坐标为 (x_1, y_1) 、右上角为 (x_2, y_2) 、左下角为 (x_3, y_3) 。通过式(2)得到成像容器像素坐标系下的坐标值分别为: (R_1, C_1) 、 (R_2, C_2) 、 (R_3, C_3) 。

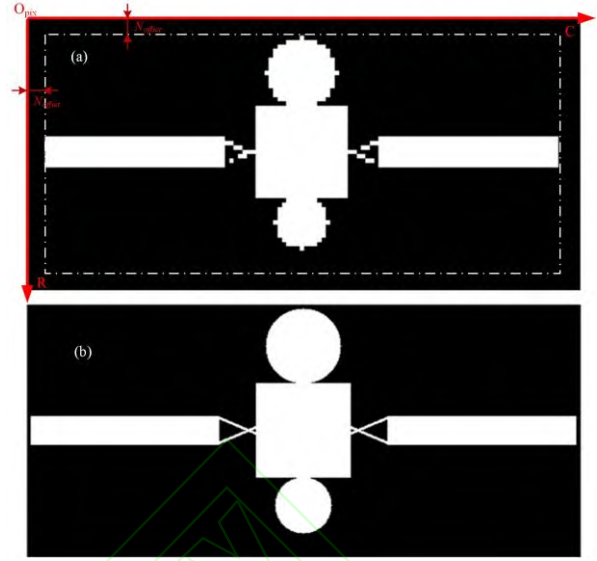


图 3 成像解析模型计算得到目标掩膜示意

Fig. 3 Target mask calculated by imaging analytic model

确定该水平矩形在成像容器像素坐标系中最小遍历范围为:

$$\begin{bmatrix} R_{min} & R_{max} \\ C_{min} & C_{max} \end{bmatrix} = UpInt\left(\begin{bmatrix} R_1 & R_3 \\ C_1 & C_2 \end{bmatrix}\right) \quad (6)$$

对于水平矩形, 最小遍历范围即为该形状的掩膜区域, 故掩膜生成判据为:

$$T_{model}(i, j) = 1 \quad R_{min} \leq i \leq R_{max}, C_{min} \leq j \leq C_{max} \quad (7)$$

(3) 倾斜矩形及平行四边形解析模型

倾斜矩形及平行四边形可归类为非规则四边形解析模型, 共有四个特征点, 在数字库中占连续四行。设该类四边形顺时针环绕连续四个顶点坐标为: $P_5(x_5, y_5)$ 、 $P_6(x_6, y_6)$ 、 $P_7(x_7, y_7)$ 、 $P_8(x_8, y_8)$, 通过式(2)得到成像容器像素坐标系下的坐标值分别为: (R_5, C_5) 、 (R_6, C_6) 、 (R_7, C_7) 、 (R_8, C_8) 。

确定该类四边形在成像容器像素坐标系中最小遍历范围为:

$$\begin{bmatrix} R_{min} & R_{max} \\ C_{min} & C_{max} \end{bmatrix} = UpInt\left(\begin{bmatrix} R_{k,min} & R_{k,max} \\ C_{k,min} & C_{k,max} \end{bmatrix}\right) \quad (8)$$

$$k = 5, 6, 7, 8$$

式中, $\min$ 表示数组中的最小值元素; $\max$ 表示数组中的最大元素。

掩膜生成判据为:

$$\begin{cases} T_{\text{model}}(i, j) = 1 & S_{5,6,7,8} \geq S_{\Sigma} \\ T_{\text{model}}(i, j) = 0 & S_{5,6,7,8} < S_{\Sigma} \end{cases} \quad (9)$$

$$R_{\min} \leq i \leq R_{\max}, C_{\min} \leq j \leq C_{\max} \\ S_{\Sigma} = S_{5,6,(i,j)} + S_{6,7,(i,j)} + S_{7,8,(i,j)} + S_{8,5,(i,j)} \quad (10)$$

式中, $S_{5,6,7,8}$ 为以 P_5 、 P_6 、 P_7 、 P_8 四点所构成的四边形的面积; $S_{5,6,(i,j)}$ 为以 P_5 、 P_6 、 $P_{(i,j)}$ 三点构成的三角形的面积。

基于上述成像解析模型, 将图 2 构建的目标数字库解析得到的目标掩膜如图 3 所示, 其中图 3(a)、(b)的 GSD 分别为 0.5m、0.1m, N_{offset} 取 5。

2.2 目标成像模型

目标成像模型基于空间相机的物理成像特性及自身参数, 描述目标尺寸及亮度特征的相机成像过程, 得到模拟图像传感器传出的目标数字图像。

目标尺寸的成像映射主要与相机空间分辨率 GSD 有关, GSD 计算见式(11), 将其代入上文目标成像解析模型, 得到目标轮廓掩膜的数字图像。

$$GSD = \frac{L \cdot P}{f} \quad (11)$$

式中, L 为目标到相机光学镜头的距离; P 为相机图像传感器像元尺寸; f 为相机的焦距。

在目标轮廓掩膜的基础上建立目标亮度到目标成像灰度值的映射模型。对于远距离的空间小目标使用星等描述其亮度, 设目标视星等为 m , 目标到达相机光学系统外的辐照度 $E_m(\text{kw}/\text{m}^2)$ 为:

$$E_m = E_s \cdot 10^{0.4(-26.73-m)} \quad (12)$$

式中, E_s 为地球大气层外太阳辐照度, 对应此时太阳的视星等为 -26.73 等。

设光学系统通光口径为 D , 透过率为 τ , 相机光学系统接收目标产生的总光通量 $P(W)$ 为:

$$P = E_m \cdot \tau \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (13)$$

设相机仿真曝光时间为 T , 则相机光学系统接收到目标产生的总能量 $Q(J)$ 为:

$$Q = P \cdot T = E_m \cdot \tau \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot T \quad (14)$$

单个光子的能量 E_{ph} 为:

$$E_{ph} = \frac{hc}{\lambda} \quad (15)$$

式中, 普朗克常量 $h=6.6260693 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$, 光速 $c=3 \times 10^8 \text{m/s}$, 可见光平均波长 λ 为 550nm。

在相机曝光时间 T 内, 图像传感器接收到的总光子数 N_{ph} 为:

$$N_{ph} = \frac{Q}{E_{ph}} = \frac{E_m \cdot \tau \cdot (D/2)^2 \cdot T}{E_{ph}} = \frac{E_m \cdot \tau \cdot (D/2)^2 \cdot T \cdot \lambda}{hc} \quad (16)$$

设图像传感器在 λ 处量子效率为 η , 则曝光时间 T 内目标在图像传感器上产生的总电子数 N_e 为:

$$N_e = N_{ph} \cdot \eta = \frac{E_m \cdot \tau \cdot (D/2)^2 \cdot T \cdot \lambda}{hc} \cdot \eta \quad (17)$$

设图像传感器增益为 K (e^-/DN), 则产生的总数字量 D_e 为:

$$D_e = \frac{N_e}{K} = \frac{E_m \cdot \tau \cdot (D/2)^2 \cdot T \cdot \lambda}{hc \cdot K} \cdot \eta \quad (18)$$

远距离时, 空间目标所成的数字图像通常仅占用几个到几十个不等的像素单位, 表现为小目标特征, 故单个目标像素产生的数字量可用平均数字量近似表示。设目标在像面的数字图像共有 n 个像素, 则单个像素产生的数字量 D_i 为:

$$D_i = \frac{D_e}{n} \quad (19)$$

由于圆孔衍射影响, 目标在相机焦面所成的像会产生弥散现象, 理想光学系统在像平面所成星点像的能量分布见文献[10]。考虑到计算机运算效率, 本文使用二维高斯滤波器对原图像进行卷积操作, 以实现光学系统成像的弥散效果。

2.3 仿真结果

综合目标的数据建模及成像模型, 以图 2 构建的目标为例。设目标星等 m 分别为 3 等、5 等、7 等, 在距离 L 分别为 50km、100km、200km、500km 时, 对目标进行成像仿真得到的数字图像如图 4 所示。其中, P 取 $2.5 \mu\text{m}$ 、 f 取 70mm、 T 取 10ms、 η 取 0.65、 K 取 $2e^-/\text{DN}$ 、 τ 取 0.8、 D 取 90mm、图像量化等级为 8bit、高斯卷积核尺寸取 5×5 、目标成像容器矩形的 $W \times H$ 取 $58\text{m} \times 26\text{m}$ 。

对仿真图像分析可知, 近 $60\text{m} \times 30\text{m}$ 的目标在距离 200km 处成像就已呈现小目标的特征, 其轮廓及纹理特征已经大量缺失, 在 500km 处成像时, 目标表现为点目标, 符合真实空间场景下目标在不同距离的成像效果。对于 $60\text{m} \times 30\text{m}$ 的目标, 在 100km 内成像时具有一定轮廓特征, 表现为面目标。由于本文对于目标灰度分布采用平均处理, 没有构建真实目标的材料反射特征, 故目标仿真更适用于远距离小目标的成像模拟。随着距离变大, 亮度变暗 (视星等增大), 目标成像的整体灰度偏低, 呈现为暗目标特征, 如图 4 右下角图像所示。

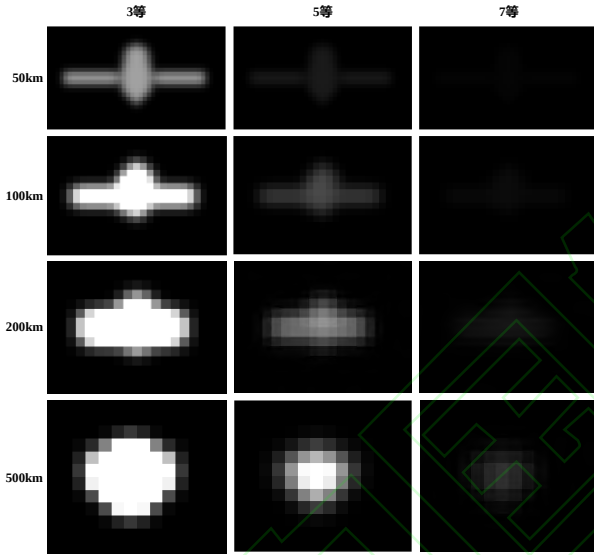


图 4 空间目标成像仿真图像
Fig. 4 Space target imaging simulation image

3 背景恒星成像仿真

空间环境中存在大量自身发光的恒星, 在进行天基成像过程中, 由于背景恒星距离遥远, 故在像面所成的像表现为与远距离目标极其相似的点光斑特征。基于此成像特性, 空间背景恒星成为干扰空间目标检测的重要因素之一。这要求仿真系统在对恒星模拟时要至少保证相机视场内较高精度的恒星相对位置及各恒星真实亮度建模, 使后续的检测任务可依据恒星位置、亮度等成像特性, 深度挖掘多维信息特征, 开发高鲁棒性的检测算法。

3.1 相机视场内恒星选取方法

为真实仿真空背景恒星, 需选取并导入天文恒星星表数据, 常用星表有: HD 星表、SAO 星表、HIP 星表等。其中, 依巴谷星表 (HIP) 包含 11 万 8 千余个恒星天体数据, 位置精度 1 毫角秒, 极限星等 13 等, 是天文观测中典型的星表之一。该成像仿真系统选用依巴谷星表 (Hipparcos-2, 高精度新缩减版^[15]) 作为空间背景恒星仿真的数据源。Hipparcos-2 星表可视化如图 5 所示, 图中将星表所有恒星投影至假设天球表面。

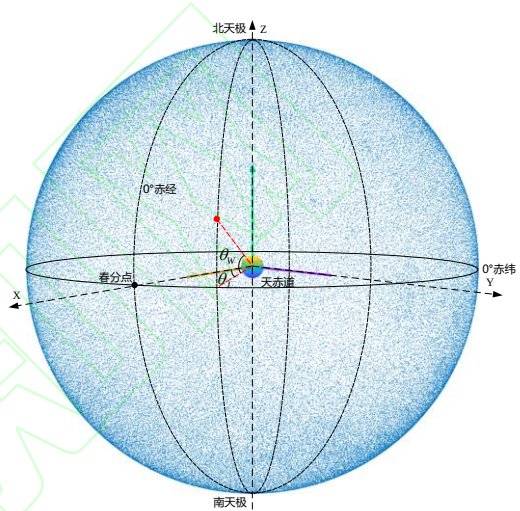


图 5 Hipparcos-2 星表天球投影可视化
Fig. 5 Visualization of Hipparcos-2 catalog projection of the celestial sphere

$$\begin{cases} x = r \sin(\frac{\pi}{2} - \theta_w) \cos \theta_j \\ y = r \sin(\frac{\pi}{2} - \theta_w) \sin \theta_j \\ z = r \cos(\frac{\pi}{2} - \theta_w) \end{cases} \quad \begin{matrix} r \geq 0, \theta_w \in [-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2}], \\ \theta_j \in [0, 2\pi) \end{matrix} \quad (20)$$

星表内包括各恒星赤经、赤纬、自行、星等信息, 赤纬变化范围为 $-90^\circ \sim +90^\circ$, 赤经变化范围为 0 时 ~ 24 时 (为简化计算, 本文将赤经范围表示为 $0 \sim 360^\circ$)。利用式(20)可将图 5 中由赤经、赤纬表示的球面坐标转化为 XYZ 轴表示的直角坐标, 其中直角坐标系 X-Y 平面与天赤道平面重合, X 轴过 0° 赤经与 0° 赤纬交点 (即春分点), Z 轴指向北天极, Y 轴与 X、Z 轴构成右手直角坐标系。

由此得到表示恒星位置的惯性系坐标, 并建立

仿真相机坐标系 $O_C-X_C Y_C Z_C$ 。以相机光轴为 Z_C 轴，光学系统中心位置为原点 O_C ，水平轴 X_C ，垂直轴 Y_C ，如图 6 所示。由于恒星距离地球极远，即 r 值极大，故可认为对恒星成像时相机坐标系原点与惯性系原点重合，坐标转换只涉及旋转，不涉及平移。通过旋转变换矩阵可将惯性系下位置坐标 $[X \ Y \ Z]^T$ 转换为相机坐标系下位置坐标 $[X_C \ Y_C \ Z_C]^T$ 。

旋转矩阵定义为：先绕 Z 轴逆时针旋转 φ ，再绕 Y 轴逆时针旋转 θ ，最后绕 X 轴逆时针旋转 λ 。

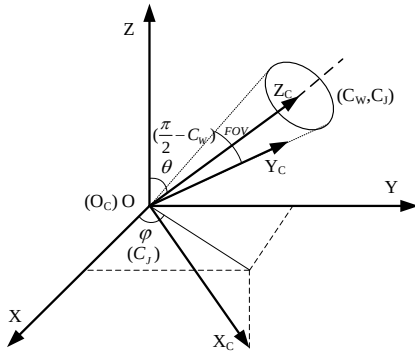


图 6 惯性系到相机坐标系转换示意

Fig. 6 Inertial frame to camera coordinate system conversion schematic

已知相机光轴在惯性系中的指向为 (C_w, C_l) ，即先绕 Z 轴逆时针旋转 C_l ，再绕 Y 轴逆时针旋转 $(\pi/2 - C_w)$ ， X 轴不旋转，可得此旋转变换矩阵。

经过旋转变换可得给定光轴指向下相机坐标系的恒星位置，通过式(21)将相机坐标系的直角坐标转换为球面坐标。

$$\theta' = \arccos\left(\frac{Z_C}{\sqrt{X_C^2 + Y_C^2 + Z_C^2}}\right) \quad (21)$$

相机对角线视场角为：

$$FOV = 2 \arctan\left(\frac{\sqrt{(P \cdot N)^2 + (P \cdot M)^2}}{2f}\right) \quad (22)$$

式中， P 为图像传感器像元尺寸， $N \times M$ 为图像传感器像元数， f 为相机焦距。

通过判断 $\theta' \leq FOV/2$ 确定位于仿真相机视场内的恒星，可对相机坐标系下所有恒星点进行筛选，最后得到需仿真成像的恒星数据。

3.2 恒星成像坐标转换

将满足 $\theta' \leq FOV/2$ 的相机坐标系下的恒星坐标标记为 $[X_C', Y_C', Z_C']^T$ ，经过相机坐标系到图像坐标系转化，得到仿真相机圆形视场内的恒星数据。由于相机图像传感器为矩形，故需要对圆形视场内切矩形区域进行成像信息最终选取，如图 7 所示，图中圆点表示位于圆形视场内的恒星点，绿色圆点表示位于图像传感器矩形视场内的恒星点，蓝色圆点表示位于圆形视场但不在矩形视场内的恒星点。

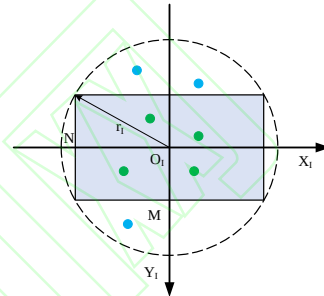


图 7 仿真相机矩形视场建立

Fig. 7 The rectangular field of view of the simulated camera is established

最后，经过图像坐标系到像素坐标系转换，将仿真视场内的恒星映射至数字图像中。其中，在计算像素坐标系下恒星点坐标时，不进行取整操作映射至像素方格，而是保留恒星点精确位置坐标进行下文点目标亚像素级位置建模。

3.3 点目标亚像素级建模

恒星与相机距离较远，在所成图像上表现为点状，经过相机光学系统弥散后变为点状光斑。弥散处理过程可由光学系统的点扩散函数定量描述，而点扩散函数可近似为高斯分布函数^[16]。由此，在进行恒星成像仿真建模时，其弥散光斑的能量分布函数可用高斯分布函数近似，如式(23)。

$$B(x, y) = \frac{B_0}{2\pi\sigma_{PSF}^2} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma_{PSF}^2}\right) \quad (23)$$

式中， $B(x, y)$ 为在 (x, y) 位置处的像素灰度值； (x_0, y_0) 为恒星点位置坐标； B_0 为该恒星在图像传感器上产生的总数字量； σ_{PSF} 为高斯弥散半径。

对于像素坐标系, 有如图 8 黑色数字坐标序号表示的像素坐标 (像素格所处行列值), 又有红色数字坐标序号表示的数值坐标, 其为上述坐标转换所得像素坐标系的数值坐标。像素坐标均为非零正整数, 数值坐标可为非负浮点数。

(1) 像素级建模

将计算得到的恒星坐标向上取整, 得到对应像素坐标系下恒星的像素坐标。导入星表中对应恒星的星等, 通过式(12)~(18)计算得到图像传感器产生的该恒星总数字量。随后用高斯滤波器对恒星数字图像进行卷积滤波处理, 最终得到恒星仿真成像的像素级位置精度图像。

此方法的优点是计算量小, 单帧图像处理速度快。但位置仿真精度仅有 ± 0.5 像素单位, 如图 8 中不同位置的黑色实心点均被视为第 4 行第 4 列的像素处理。

(2) 亚像素级建模

选定星点弥散邻域范围, 以坐标转换所得恒星坐标数据为中心点 (如图 8 红色实心点), 以邻域内所有像素格中心 (如图 8 红色空心点) 坐标为弥散处理点坐标, 并利用式(12)~(18)得到的像素数字量数据, 代入式(23)进行弥散处理。其中, 邻域内像素格位置使用像素坐标系像素坐标描述, 邻域内像素格中心坐标及恒星坐标数据使用像素坐标系数值坐标描述, 建立图 8 所示坐标序号关系。

恒星点目标像素级建模与亚像素级建模效果对比如图 9 所示, 其中, 恒星在像素坐标系中的数值坐标为(9.9556, 10.1257), 产生总数字量为 1024, 像素级建模使用的高斯卷积核及亚像素级建模使用的弥散邻域尺寸均取 7×7 。

由仿真效果对比可知, 点目标像素级建模的弥散光斑图像呈规则的中心对称, 其中心点为像素格中心; 而亚像素级建模的图像表现为有中心偏移权重的亮度非规则分布形式, 其更符合点目标真实位置的成像效果。

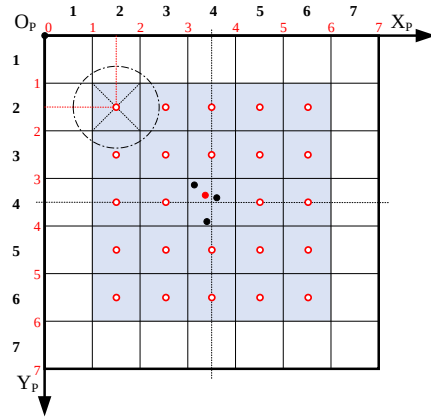


图 8 点目标亚像素级建模原理

Fig. 8 Point target subpixel-level modeling principle

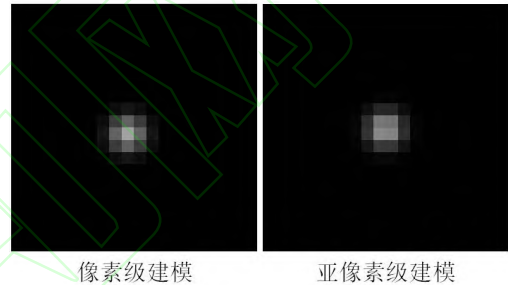


图 9 点目标像素级建模与亚像素级建模效果对比

Fig. 9 Comparison of effects of point target pixel-level modeling and subpixel-level modeling

为进一步分析亚像素级建模方法的性能及精度范围, 本文在[15,20]数值范围内随机选取 20 组浮点数作为星点输入坐标 (保留小数点后八位), 分别对像素级建模方法和弥散邻域尺寸为 3×3 、 5×5 、 7×7 、 9×9 、 11×11 的亚像素建模方法进行对比试验, 并利用基于灰度的点目标质心坐标提取算法^[17], 使用式(24)对位置建模精度进行验证, 得到图 10 所示结果。

$$x_0 = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n F(x, y) \cdot x}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n F(x, y)} \quad y_0 = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n F(x, y) \cdot y}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n F(x, y)} \quad (24)$$

式中, n 、 m 表示图像总行列数; y 、 x 表示当前像素点的行列数; $F(x, y)$ 表示图像在 y 行 x 列处像素点的灰度值; x_0 、 y_0 为计算得到的点目标质心坐标。

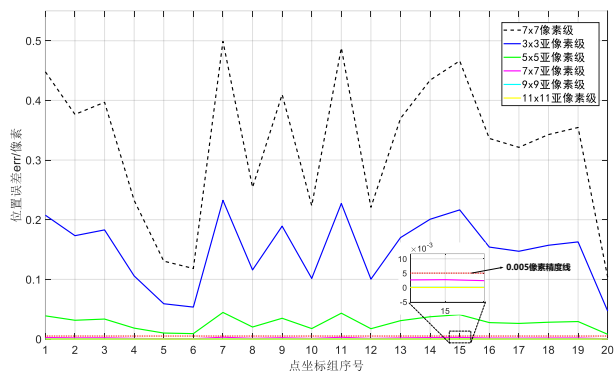


图 10 点目标成像位置建模方法精度对比
Fig. 10 Precision comparison of point target imaging position modeling methods

图 10 中位置误差表示为提取到 x 和 y 坐标值与输入坐标差的绝对值中的最大值。由图可知,亚像素建模精度与邻域尺寸有关,尺寸越大,建模精度越高。在亚像素建模邻域尺寸选取不小于 7×7 时,建模位置误差明显小于 0.005 像素,并逐渐趋于 0 。而当选取最小 3×3 时,建模精度仍比 7×7 卷积尺寸下像素级建模高。由于在星图识别/小目标检测中为提高点目标质心提取精度,光学系统通常会进行离焦弥散成像,同样本文仿真系统综合考虑计算量与建模精度,选取 7×7 作为亚像素建模弥散尺寸,此时点目标建模精度可明显优于 ± 0.005 像素,且弥散尺寸适中,减少一定计算量。

3.4 仿真结果及验证

综上背景恒星建模方法,对仿真相机光轴指向为(赤纬 55.5° ; 赤经 186°)的天区方向进行成像仿真。其中, P 取 $2.5\mu\text{m}$ 、 f 取 10mm 、 N 取 3072 、 M 取 2048 , 算得仿真对角视场为 49.5476° ; 其余参数同 2.3 节仿真参数设置,仿真得到数字图像如图 11 所示。

为评估背景恒星成像仿真的有效性,检验恒星相对位置建模是否正确。本文通过对仿真图像中北斗七星位置进行标注(见图 11 中红色方框),并与图 12 开源星图软件 stellarium 的北斗星图进行对比,结果表明两者北斗七星相对位置具有一致性。



图 11 背景恒星仿真图像
(赤纬 55.5° , 赤经 186° , 对角视场 49.5476°)
Fig. 11 Background star simulation image



图 12 北斗位置星图
Fig. 12 Big Dipper position star map

4 空间复杂光照背景及噪声仿真

光照背景及噪声是检验空间目标检测算法可靠性、鲁棒性的重要成像元素,排除此二者干扰讨论算法的准确率与虚警率是没有实际意义的,故对光照背景及噪声成像仿真具有重要意义和必要性。

4.1 空间复杂光照背景建模

空间光照主要包括强光光斑、非均匀弱光及无光等,理想情况为无环境光干扰,仅有目标光源。但一方面因为空间相机轨道特性,不可避免会有太阳光、月光、地气光等环境光源进入成像视场;另一方面因为相机光学系统固有杂光抑制缺陷及图像传感器非均匀光照响应,均会产生非均匀背景。

4.1.1 背景强光光斑建模

光斑建模基于二维高斯函数模型,为模拟空间成像时背景光照动态变化情况,建立二维时变高斯模型如下:

$$G(x, y, t) = \frac{K_G(t)}{2\pi(\sigma_G(t))^2} \exp\left(-\frac{(x-x_0(t))^2 + (y-y_0(t))^2}{2(\sigma_G(t))^2}\right) \quad (25)$$

式中, $K_G(t)$ 为光斑时变总能量; σ_G 为光斑时变半径; $x_0(t)$ 、 $y_0(t)$ 为随时间变化的光斑中心坐标。

由式(25)建立边缘缓变光斑背景仿真图像如图 13 所示, 其中, 时变设为线性, 以仿真帧序列表示时间序列, 共计 500 帧序列图像。

通过上述高斯模型参数设置, 可实现光斑灰度由中心向周围缓慢延伸变化, 边缘灰度梯度较小。检测算法对于检测场景的适应性检验主要体现在背景灰度变化的局部区域, 为验证目标背景较大动态范围灰度变化时算法适应性, 需模拟光斑边缘能量较为集中, 灰度梯度较大的特殊光照背景。由此, 建立如下边缘陡变的光斑仿真成像模型:

$$G(x, y, t) = F(x, y, t) * w(s, \tau) \quad (26)$$

式中 $*$ 表示卷积; $w(s, \tau)$ 表示高斯滤波器核;

其中 $F(x, y, t)$ 表示为:

$$F(x, y, t) = \begin{cases} H_{gray}(t) & (x-x_0(t))^2 + (y-y_0(t))^2 \leq (r(t))^2 \\ H_{offset} & (x-x_0(t))^2 + (y-y_0(t))^2 > (r(t))^2 \end{cases} \quad (27)$$

式中, $H_{gray}(t)$ 表示随时间变化的光斑成像灰度值; H_{offset} 为图像背景偏置灰度值。

建立边缘陡变光斑背景仿真图像见图 14, 光斑边缘灰度梯度取决于高斯核尺寸及标准差。

4.1.2 背景非均匀弱光建模

非均匀弱光背景表现为大范围像素灰度值沿某一方向缓慢变化, 此时灰度梯度可取定值, 即背景灰度向某方向线性变化形成的全局非均匀响应。为简化计算, 规定灰度梯度方向为水平, 设图像左边沿时变初始灰度值为 $H_{L,0}$, 右边沿时变初始灰度值为 $H_{R,0}$, 则时变线性非均匀背景数学模型为:

$$G(x, y, t) = \frac{H_{R,0} - H_{L,0} + (K_R - K_L) \cdot t}{M} x + H_{L,0} + K_L \cdot t \quad (28)$$

式中, K_L 、 K_R 分别表示图像左右边沿灰度值随时间变化系数; M 表示图像列数。

由式(28)建立线性非均匀弱光背景仿真图像如图 15 所示, 其中图像左右边沿初始灰度值分别取 100、20, 时变系数分别为 -0.1、0.3, 图像量化等级为 8bit, 共计仿真 500 帧序列图像。

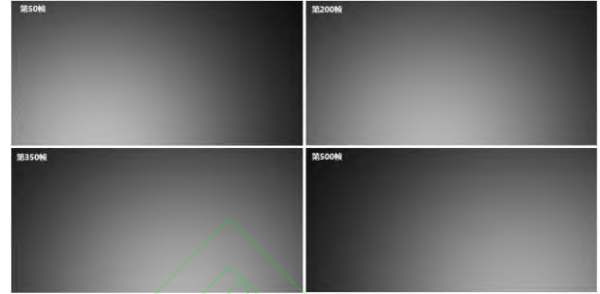


图 13 边缘缓变光斑背景仿真

Fig. 13 Background simulation of edge slowly changing spot

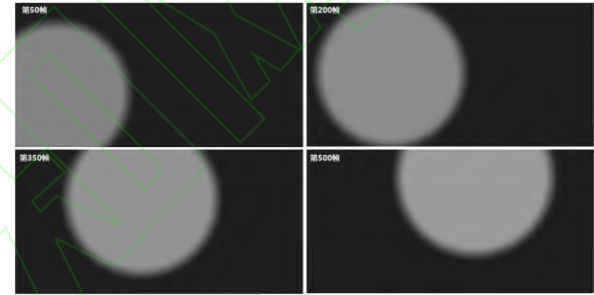


图 14 边缘陡变光斑背景仿真

Fig. 14 Background simulation of edge sharp change spot

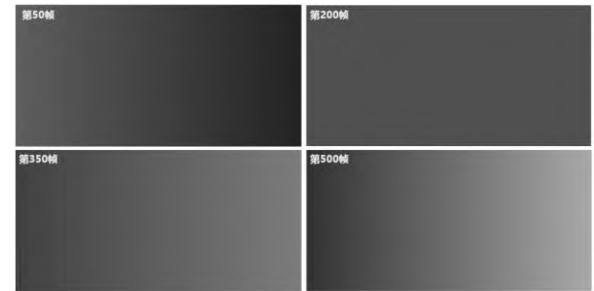


图 15 线性非均匀弱光背景仿真图像

Fig. 15 Linear non-uniform low light background simulation image

4.2 成像噪声分析及建模

除上述复杂光照背景干扰外, 图像探测器本身固有缺陷产生了空间相机的成像噪声, 主要包括: 暂态噪声和固定噪声两大类。其中暂态噪声包括光子散粒噪声、暗电流噪声、读出噪声, 固定噪声包括固定图形噪声 (FPN) 和响应非均匀性噪声

(PRNU)。在太空成像时,一般还包括热像素噪声、宇宙射线噪声^[18]等特殊工况噪声。

4.2.1 成像噪声分析

(1) 光子散粒噪声

由于光子的粒子特性,导致在同一束光相同时间内照射下,图像探测器实际接收的光子数量会产生一定波动。光子散粒噪声的大小与信号强度及信号电子数有关,在时间和空间位置上随机,服从泊松分布,均值与方差相等。光子散粒噪声表达式为:

$$\sigma_{shot}^2 = S = n(x, y) \cdot T \quad (29)$$

式中 S 为信号电子数; $n(x, y)$ 为单位像素每秒产生的电子数; T 为曝光时间。

(2) 暗电流噪声

光子撞击图像探测器时由摄入期间产生的热效应生成的电子。暗电流噪声服从泊松分布,在时间和空间位置上随机,噪声大小取决于图像传感器温度和曝光时间。暗电流电子数及噪声表达式为:

$$\sigma_{dark}^2 = n_{dark} = n_e(x, y) \cdot T \quad (30)$$

其中, $n_e(x, y)$ 为单位像素每秒产生的电子数:

$$n_e = \frac{A_s J_{dc}}{q_e} \quad (31)$$

式中 A_s 为图像传感器像元面积; J_{dc} 为暗电流密度; q_e 为电子电荷。

(3) 读出噪声

读出噪声是由电路放大和模数转换过程引起,包括复位噪声和放大器噪声。读出噪声服从均值为0,方差为 σ_{read}^2 的高斯分布,在时间和空间位置上随机,噪声大小与图像传感器自身电路参数及温度有关,与曝光时间无关。其表达式为:

$$\sigma_{read}^2 = \sigma_{aw}^2 + \sigma_{af}^2 + \sigma_{reset}^2 = \frac{\sqrt{4kT_k BR_a}}{CVF} + \sigma_{af}^2 + \frac{\sqrt{kT_k C}}{q_e} \quad (32)$$

式中 σ_{aw}^2 为输出放大器电阻热噪声; k 为波尔兹曼常数; T_k 为绝对温度; B 为带宽; R_a 为电阻值; CVF 为电荷转换因子; σ_{af}^2 为闪烁噪声 ($1/f$ 噪声);

σ_{reset}^2 为复位噪声; C 为浮置扩散电容值; q_e 为电子电荷。

(4) 固定噪声

固定图形噪声是在图像传感器无光照时,像元与像元之间输出的变化,主要为各像元间暗电流的差别,为加性噪声。响应非均匀性噪声是在有光照时,像元与像元之间输出的变换,主要为各像元间响应度的差别,为乘性噪声。

(5) 热像素及宇宙射线噪声

热像素噪声是由空间辐射引起的图像传感器像元损伤产生,表现为随机分布的孤立亮点,近似表示为离散冲激函数,形成后在像面位置固定,但随曝光时间变化。宇宙射线噪声是由于太空中高能粒子射流在图像传感器像元产生的独立电子,近似于盐噪声,在时间和空间位置上随机分布。

4.2.2 噪声建模仿真

图像传感器最终输出数字图像时,输出像素灰度值 $D_{out}(x, y)$ 满足:

$$D_{out}(x, y) = D_e(x, y) + I_{offset} \quad (33)$$

式中 $D_e(x, y)$ 为图像传感器实际响应得到的 (x, y) 位置处灰度值; I_{offset} 为相机出厂设置的灰度偏置,避免小于零的信号在输出时被截断。

而图像传感器响应产生电子数 $N_e(x, y)$ 与转化得到灰度值之间满足如下关系:

$$D_e(x, y) = \frac{N_e(x, y)}{K} \quad (34)$$

式中 K 为相机增益,单位为 e^-/DN 。

噪声建模叠加的顺序为:读出噪声、光子散粒噪声、暗电流噪声、热像素及宇宙射线噪声、固定噪声,具体建模步骤如下:

- 基于相机灰度偏置,由式(34)建立均值为偏置电子数,方差为 σ_{read}^2 的像素电子数高斯分布概率模型,再由式(34)转化灰度值后模拟相机读出噪声;
- 计算成像原图各非零灰度像素在曝光时间 T 的平均信号 $\bar{S}$ (以灰度值表示),建立均值、方

差均为 $\bar{S}$ 的泊松分布模型, 模拟光子散粒噪声;

c. 设定 $n_e(x, y)$, 由式(30)建立在曝光时间 T 内, 以 n_{dark} 为均值及方差的泊松概率分布模型, 代入式(34)转化为灰度值后模拟暗电流噪声;

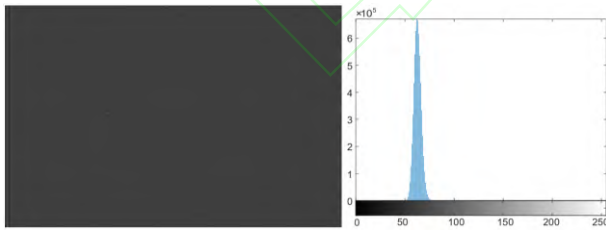
d. 由离散冲激函数表示热像素及宇宙射线噪声模型;

e. 固定噪声为空间位置固定噪声, 像素分布的 FPN 与热像素噪声类似但最大灰度有限, 行列分布的 FPN 分别以行列为单位建立强度随机的位置噪声;

f. 加性噪声依次叠加至成像原图, 乘性噪声最后融合处理, 生成最终含噪数字图像。

由于图像传感器如 GMAX 系列的噪声通常较小, 以 GMAX0505 为例, 其暂态噪声 (Temporal Noise) $< 1.6 \text{ e}^-$ 且暗电流噪声 (Dark Current) 为 $1 \text{ e}^-/\text{pixel/s} @ 30^\circ\text{C die temperature}$, 故其成像仿真噪声不明显。为建立不同信噪比图像, 特别是具有低信噪比空间微弱目标特性的待检测图像数据, 本文对噪声仿真参数进行了一定倍率的放大处理。

含噪声成像仿真图像如图 16 所示, 其中, K 取 $2 \text{ e}^-/\text{DN}$ 、图像量化等级为 8bit、 I_{offset} 取 50 (即 100 e^-)、 σ_{read} 取 20 e^- ; 基于图 11 算得 $\bar{S}$ 为 8.0957, 即 σ_{shot}^2 取 8.0957; 相机曝光时间 T 取 10ms, $n_e(x, y)$ 平均取 $500 \text{ e}^-/\text{pixel/s}$; FPN 最大电子数取 10 e^- , 采用行分布类型; PRNU 最大取 2%。



(左侧为噪声融合仿真图像; 右侧为其对应的灰度直方图)
图 16 成像噪声仿真图像

(On the left is the simulation image of noise fusion; The right side is its corresponding gray histogram)

Fig. 16 Image noise simulation image

5 综合运动仿真

综合运动仿真以图像生成过程的帧序代表时间, 对成像模型中所有时变量进行帧单位的计算建模, 最后生成包含目标、恒星背景、背景光照及噪声等元素的数字成像仿真图像序列并合成动态视频。其中时变量包括: 目标位置、目标整体灰度、各类型背景光照变化参数、暂态及特殊空间工况噪声参数等。以目标动态建模为重点, 本节对其产生的轨迹、周期亮度变化、成像拖尾进行建模设计, 最后对成像平台抖动导致的图像整体位移进行模拟。仿真系统设计以恒星凝视成像模式为空间目标运动成像的仿真建模依据, 即相机光轴在成像过程中始终指向固定天区位置。

5.1 运动仿真建模

(1) 目标轨迹建模

考虑到本文仿真图像仅用于目标检测算法开发及验证, 不涉及后续目标定轨、成像模式开发等应用, 故对目标及成像平台真实空间轨道仿真需求不高, 只需保证对指定距离目标及其场景的真实成像模拟。由此, 为简化算法复杂度, 设计了指定目标初始位置基于增量的目标运动模型。

设 2.1.2 节中成像容器像素坐标系的原点在 2.2 节中像素坐标系的初始位置为 (x_c, y_r) , 目标移动速度为 v_T (单位: pixel/ms), 相机曝光时间为 T (单位: ms), 则目标第 k 帧时在像素坐标系中的坐标 $(x(k), y(k))$ 满足:

$$\begin{cases} x(k) = x(k-1) + v_T \cdot T \cdot \sin(\theta(k)) \\ y(k) = y(k-1) + v_T \cdot T \cdot \cos(\theta(k)) \end{cases} \quad (35)$$

$$0 \leq \theta(k) < 2\pi, k = 1, 2, 3, \dots$$

其中 $x(0) = x_c$, $y(0) = y_r$, $\theta(k)$ 满足:

$$\begin{aligned} \theta(k) &= \theta(k-1) + \frac{w_e - w_f}{T_{total}} \cdot T \\ \theta(0) &= w_f, k = 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (36)$$

式中, $\theta(k)$ 表示第 k 帧时目标的速度角; w_f 为目标起始速度角; w_e 为目标仿真结束时速度角; 速度角以像素坐标系 X_P 轴为起始, 绕坐标原点沿顺时针旋转方向为递增方向。

(2) 目标闪烁模拟

空间中目标因自身姿态旋转（如空间碎片）或轨道运动导致太阳光反射角变化，均会使相机接收到的目标反射光总能量发生变化，前者产生目标灰度周期变化的成像图像，后者表现为目标灰度连续变化。目标的成像灰度特征是空间目标检测可用的仅有特征维度之一，故需对目标成像的动态灰度属性进行仿真建模。

由 2.2 节式(18)可得目标成像总数字量 D_e ，设目标灰度变化幅度为 A_e （单位：%），变化频率为 w_e （单位：°/帧），则目标第 k 帧成像的总数字量 $D_e(k)$ 为：

$$\begin{aligned} D_e(k) &= D_e \cdot (1 + A_e \cdot \sin(w_e \cdot k)) \\ D_e(0) &= D_e, k=1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (37)$$

(3) 目标运动拖尾模拟

当目标运动速度超过 1pixel/帧时，其在单次曝光内将产生沿速度方向的拖尾。此处以位移 1pixel 为单位，对单次曝光内目标位移进行切分，得到位移像素格数。再以位移像素格数为微帧数，以 1pixel/微帧为目标移速，对目标进行微帧成像建模。其中，每微帧速度角增量、目标灰度为该帧相同量对微帧数的均值。目标运动拖尾成像仿真结果如图 17(a)所示，目标星等 6 等，距离 200km，运动速度 v_T 为 0.5pixel/ms，曝光时间 T 为 10ms；图 17(b)为 v_T 取 0.08pixel/ms， T 取 10ms，不产生运动拖尾的对比成像图像。

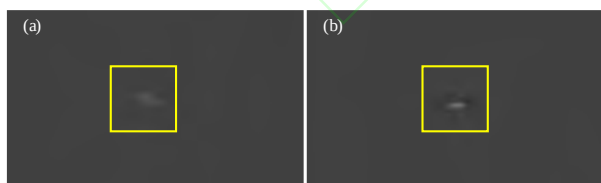


图 17 目标运动拖尾成像仿真（第 300 帧局部区域）
Fig. 17 Target motion trailed imaging simulation (local area of frame 300th)

(4) 成像平台抖动模拟

恒星凝视成像模式下要求成像平台保持较高的稳定及指向精度，否则会使相机光轴的天区固定

指向发生偏移，导致所成图像在像面整体发生位移，恒星及目标在图像坐标系中的位置相对上一帧均发生变化，对检测算法适应性将产生巨大挑战。为验证一定范围内成像平台低频抖动下算法的适应性，需对此工况进行成像仿真模拟。

在进行成像仿真时，设定边缘扩展值，对原始图像尺寸 ($N \times M$) 进行边缘扩容。此时成像目标分辨率不变，仅使视场角扩大，代入成像模型生成的单帧图像记为缓存画幅 I_{buff} ，以原始图像尺寸 ($N \times M$) 设定图像剪切窗口记为 I_{out} ，用 I_{out} 对 I_{buff} 进行沿帧序滑动取图，输出的图像序列即产生抖动效果。设 I_{out} 像素坐标系原点在 I_{buff} 中的像素坐标为 (x_d, y_d) ，最大抖动偏移范围半径为 l_{max} （单位：pixel），抖动频率为 w_d ，建立滑动取图模型为：

$$\begin{cases} x_d(k) = l_{max} \cdot (1 + \sin(w_d \cdot k)) \\ y_d(k) = l_{max} \cdot (1 + \cos(w_d \cdot k)) \end{cases} \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (38)$$

(5) 成像元素融合

数字系统设计的成像元素包括：目标、恒星、光照背景及噪声等，最终成像融合的结果与各元素的光源/反射光产生位置有关。以距离相机光学系统远近为划分依据，相对空间目标分为前景光和背景光。前景光不受目标遮挡影响，与目标产生的反射光相互独立，可进行叠加融合，如光照背景；而背景光会受目标遮挡影响，如恒星，成像融合时优先级弱于目标，故当目标掩膜区域包含恒星位置时，仅融合目标元素。大多数光照背景是因为相机光学系统产生的杂散光生成的，故文中将其视为前景光，特殊的强光直射场景下，也可按成像优先级的思路进行融合处理。

5.2 综合成像仿真结果

综合目标、背景恒星、光照背景、噪声及动态运动成像模型，对相机光轴指向（赤纬 52.358°，赤经 175.128°）的天区进行恒星凝视模式成像仿真，成像仿真总时长 T_{total} 为 10s，相机曝光时间 T 为 10ms。图 18 展示了目标星等 m 为 7 等、距离 L 为 500km，光照背景设为均匀弱光、目标移动速度 v_T

为 0.08 pixel/ms 的第 100、300、500、700 帧成像仿真图像序列。图 19 展示了光照背景设为背景强光边缘缓变光斑的成像仿真图像序列。其中 P 取 $2.5\mu\text{m}$ 、 f 取 70mm、 N 取 1024、 M 取 2048, 其余成像仿真参数均与 2.3、4.2.2 节设置相同。

图 18、图 19 右侧列为帧图像中目标局部区域放大图及其对应的灰度值分布三维图, 并使用目标局部信噪比评价指标 $LSNR$ 对仿真图像的目标信噪比进行定量评估^[19], $LSNR$ 计算公式为:

$$LSNR = 10 \times \log_{10} \frac{\mu_T - \mu_B}{\sigma_B} \quad (39)$$

式中, μ_T 为目标区域灰度均值; μ_B 为除目标外局部背景区域灰度均值; σ_B 为局部背景区域灰度值的标准差; 本文中局部背景区域面积定为目标区域面积 8 倍。

5.3 综合仿真结果评估

(1) 图像数据需求

本文生成的序列图像数据主要面向传统算法的鲁棒性检验及智能算法的训练数据库构建, 针对空间小目标检测任务特点, 要求仿真图像数据必须满足以下条件: 1. 图中目标 (包括恒星) 的成像灰度分布必须逼近真实拍摄图像的目标灰度分布; 2. 考虑到空间检测仅有的环境信息依据为恒星, 故必须尽可能保证仿真图像中恒星正确的相对位置关系。除此之外, 本文面向算法鲁棒性检测, 仿真图像数据还满足以下条件: 1. 目标动态变化 (包括位移路径及成像灰度); 2. 背景光照可调且具有动态性; 3. 成像噪声动态变化; 4. 仿真视觉效果符合相机成像机理, 如拖尾模拟; 5. 成像平台运动模拟。

本文提出的仿真方法中的所有输入参数均集成融入到最终仿真系统的开发中, 实现了输出定制可调, 极大节省了生成仿真图的调试时间, 简化了算法开发的数据准备工作。

(2) 必要性验证

空间小目标成像特征已有充分研究^[10,13,16], 总结为小目标成像与点目标成像相同, 灰度近似服从

高斯分布, 本文以点目标灰度高斯分布建模为基础, 仿真图像与实拍星图成像效果对比如图 20 所示。图中(a)为仿真图像, (b)为仿真图像三维灰度图, (c)为某地拍星设备实拍星图, (d)为实拍星图三维灰度图。由对比结果可知, 小目标成像效果极为相似, 且场景仿真效果逼近真实环境成像效果。

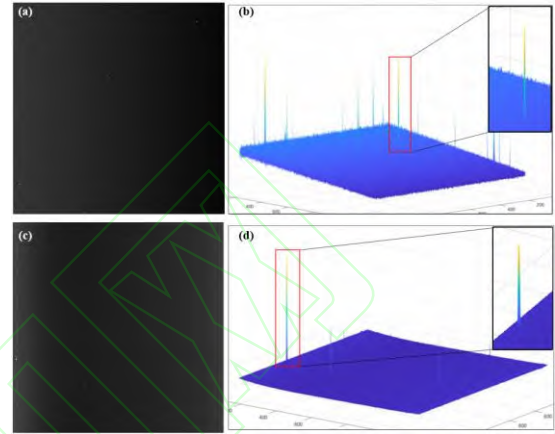


图 20 目标成像效果对比

Fig. 20 Target imaging effect comparison

为进一步分析仿真恒星相对位置建模正确性, 将图 11 和图 12 的北斗七星标注位置进行等比例融合, 结果如图 21 所示, 蓝框为仿真图像北斗七星位置, 红框为 stellarium 星图软件北斗七星位置。对比可知, 仿真恒星相对位置关系符合一般情况恒星平面投影位置关系。考虑到吻合误差来源于星图软件可视化展示方法或实际相机光学系统成像畸变等产生的图像变形, 较难量化分析误差, 故在定性评估范围内, 仿真数据可用于星图识别辅助目标检测, 匹配误差可由算法自适应调节进行消除。



图 21 仿真恒星相对位置关系正确性验证

Fig. 21 Verify the correctness of the relative position relationship of simulated stars

(3) 充分性验证

目标、背景及噪声动态建模的结果直接影响成像目标的信噪比,图像背景灰度强度分布及目标信噪比在仿真序列图像中动态变化即可满足算法鲁棒性检测要求,具体体现为算法对目标灰度、目标运动轨迹、目标信噪比、背景光分布等因素的自适应程度。

通过 LSNR 计算结果可知,图 18 均匀弱光背景下目标灰度动态仿真产生随时间变化的不同目标局部信噪比图像。在图 19 中对空间复杂场景类型之一进行模拟,从仿真结果可知,当成像背景存在非均匀光照时,成像系统噪声增大,背景灰度梯度增大,导致目标局部信噪比大幅下降($LSNR < 5\text{dB}$)且波动范围较大,此工况下极大考验检测算法的鲁棒性。

为验证平台抖动仿真效果,以下将平台抖动模型及参数设置为直线位移,并对 250 帧序列仿真图像进行了目标位置合成,如图 22 所示,结果表明

仿真输出符合预期模型设定。

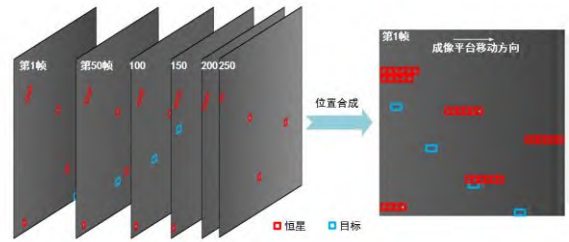


图 22 平台抖动仿真功能验证

Fig. 22 Platform jitter simulation function verification

此外,本文综合如上仿真方法进行了功能集成,形成了一套数字成像仿真系统,并与文献[6]、[7]、[8]、[13]进行了综合仿真系统/方法的功能性对比,如表 3 所示。结果表明,本文设计的仿真系统为面向需要大数据量、多样化图像数据源的空间目标检测算法的鲁棒性检验任务提供了充足的功能性检验条件,仿真系统对真实空间下各种检测场景模拟较为全面。

表 3 各数字仿真系统/方法功能性对比
Table 3 Functional comparison of digital simulation systems/methods

仿真系统/ 方法	小 目 标 成 像 建 模	目 标 运 动 建 模	目 标 动 态 灰 度 建 模	目 标 拖 尾 模 拟	目 标 及 观 测 平 台 轨 道 建 模	平 台 抖 动/ 运 动 建 模	相 机 成 像 机 理 原 型 建 模	点 目 标 成 像 灰 度 及 其 分 布 模 拟	相 机 成 像 噪 声 动 态 建 模	恒 星 视 位 置 时 间 空 间 坐 标 转 化	恒 星 相 对 位 置 关 系 建 模	各 类 动 态 光 照 场 景 建 模
文献[6]	/	-	/	/	√	√	-	√	/	√	√	/
文献[7]	√	/	/	/	√	/	-	-	/	-	√	/
文献[8]	/	√	/	√	-	/	/	√	/	√	√	-
文献[13]	/	/	/	√	/	√	/	√	-	/	√	/
本文	√	√	√	√	/	√	√	√	√	/	√	√

注:“√”表示具备此功能;“/”表示不具备此功能;“-”表示不能明确确定是否具备此功能

6 结论

本文通过设计基于二维形状特征点描述法的目标数字库构建方法及其成像解析模型可对各类空间目标进行一般性数字建模。然后通过目标数字成像、视场恒星选取、成像坐标转换、点目标亚像素建模等成像仿真方法,对空间相机进行成像过程

模拟。本文也通过对空间成像环境下多种光照背景及噪声的建模,构建了空间复杂光照场景的仿真模拟库,可满足空间目标检测算法对多元场景的鲁棒性检验。本文设计的数字成像仿真系统包括了对目标动态灰度、曲线运动、成像拖尾、成像平台抖动的建模,仿真系统框架设计具有可延拓性,对后续可能接入的轨道坐标模型及目标纹理成像模型有

较好的兼容性。综上, 本文建立的空间数字成像模型及设计的仿真系统可生成多种成像工况下的大量数字图像序列数据, 经过定性及定量试验评估,

其既可用于传统空间目标检测算法的地面端开发验证, 也可深度学习等人工智能检测算法的网络模型训练提供数据集支持。

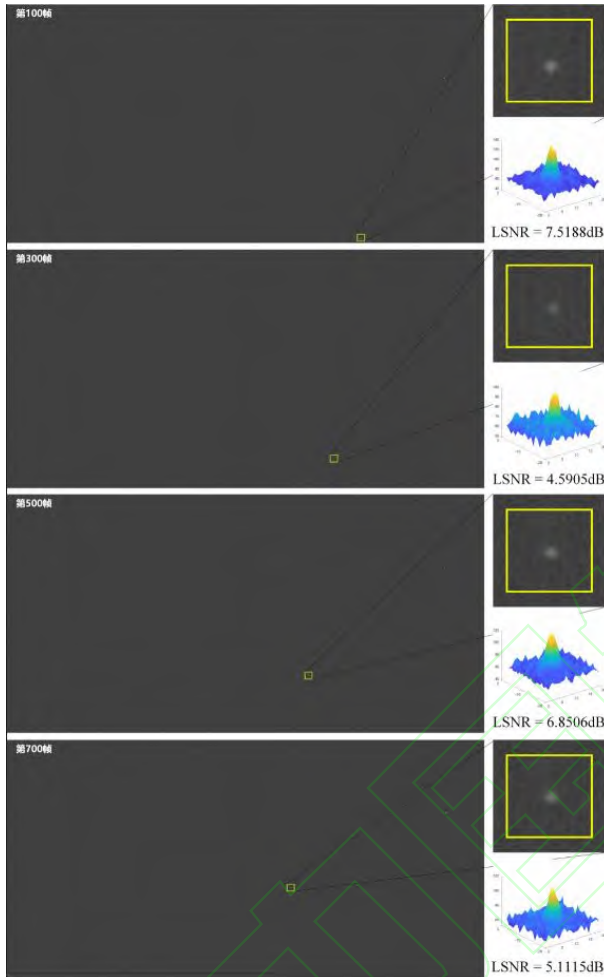


图 18 均匀弱光背景空间目标综合成像仿真图像序列

Fig. 18 Synthetic imaging simulation image sequence of space target with uniform low light background

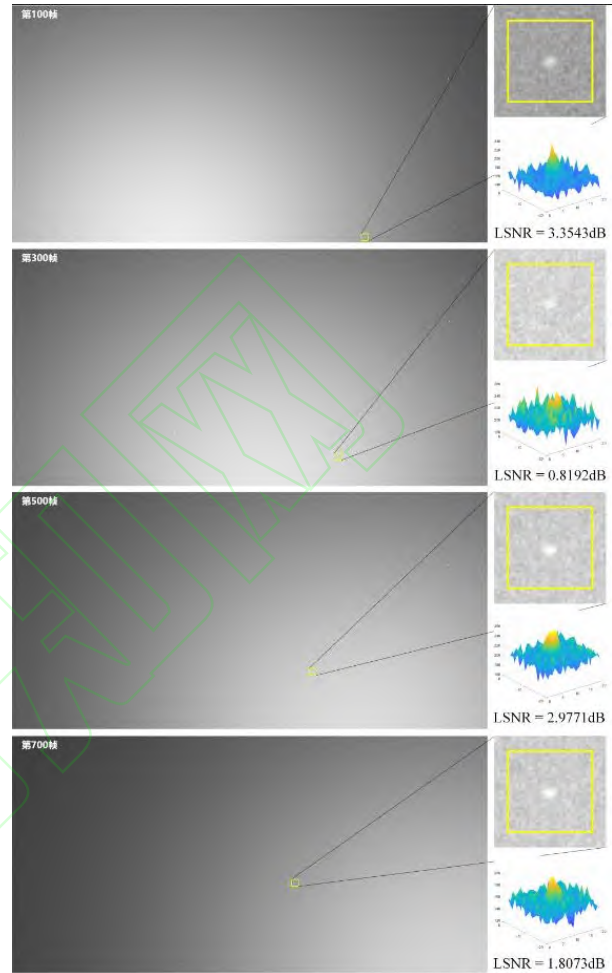


图 19 背景缓变光斑空间目标综合成像仿真

Fig. 19 Simulation image sequence of integrated imaging of space target with slow background spot

参考文献:

- [1] 毕俊凯,肖武平,何慧东.2023 年全球航天发射统计分析[J].国际太空,2024(2):12-16.
Bi Junkai, Xiao Wuping, He Huidong. Statistical analysis of global space launches in 2023 [J]. International Space Journal,2024(2):12-16.
- [2] 刘洁. 全球小卫星发展势头强劲[J]. 国际太空,2024(2):38-41.
Liu Jie. Global small satellite development momentum

- [J]. International Space,2024(2):38-41.
- [3] 刘胜利,郭裕兰,王刚.基于注意力机制与动态激活的空间目标检测算法[J].激光与光电子学进展,2022,59(14):236-242.
Liu Shengli, Guo Yulan, Wang Gang. Spatial target detection algorithm based on attention mechanism and dynamic activation [J]. Advances in Laser and Optoelectronics,202,59(14):236-242.
- [4] Massimi, F.; Ferrara, P.;Benedetto, F. Deep Learning Methods for Space Situational Awareness in

- Mega-Constellations Satellite-Based Internet of Things Networks. *Sensors* 2023, 23, 124.
- [5] Suthakar, V.; Sanvido, A.A.; Qashoa, R.; Lee, R.S.K. Comparative Analysis of Resident Space Object (RSO) Detection Methods. *Sensors* 2023, 23, 9668.
- [6] 夏胜夫,陈俊宇,雷祥旭,等.空间碎片天基监测图像仿真研究[J].空间科学学报,2020,40(6):1084-1090.
Xia Shengfu, Chen Junyu, Lei Xiangxu, et al. Simulation of space debris monitoring image [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, 40(6): 1084-1090.
- [7] 王兆魁,张育林.面向空间目标监视的星图模拟器设计与实现[J].系统仿真学报,2006(5):1195-1198+1211.
Wang Zhaokui, Zhang Yulin. Design and implementation of star map simulator for space target monitoring [J]. *Journal of System Simulation*, 2006(5): 1195-1198+1211.
- [8] 李骏,高源,安玮,等.天基光学空间目标监视图像仿真研究[J].系统仿真学报,2008(15):3951-3954+3961.
Li Jun, Gao Yuan, An Wei, et al. Research on monitoring image simulation of space-based optical space target [J]. *Journal of System Simulation*, 2008(15): 3951-3954+3961.
- [9] 陈维真,张春华,王学伟,等.空间观测序列图像目标运动成像仿真[J].激光与红外,2008(3):300-303.
Chen Weizhen, Zhang Chunhua, Wang Xuewei, et al. Motion imaging simulation of target in space observation sequence image [J]. *Laser & Infrared*, 2008(3): 300-303.
- [10] 张伟,潘海斌,鲍文卓,等.星空背景数字图像的生成[J].光学精密工程,2009,17(3):676-682.
Zhang Wei, Pan Haibin, Bao Wenzhuo, et al. Optical Precision Engineering, 2009, 17(3): 676-682.
- [11] 李星,王凌云.高刷新率星图显示算法设计[J].长春理工大学学报(自然科学版),2020,43(1):13-19.
Li Xing, Wang Lingyun. High refresh rate star map display algorithm design [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 43(1): 13-19.
- [12] 杨晋生,李天骄.天基空间目标场景成像仿真研究[J].激光与光电子学进展,2022,59(8):253-260.
Yang Jinsheng, Li Tianjiao. Research on scene imaging simulation of space-based space target [J]. *Advances in Laser and Optoelectronics*, 2022, 59(8): 253-260.
- [13] 张威,冯文全,孙国童,等.导星辅助运动暗弱天体检测系统设计与仿真[J/OL].北京航空航天大学学报: <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0503>.
Zhang Wei, Feng Wenquan, Sun Guotong, et al. Guide star auxiliary motion faint object detection system design and simulation [J/OL]. *Journal of Beijing university of aeronautics and astronautics*: <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0503>.
- [14] 陶江,曹云峰.基于局部对比度和全卷积网络的小空间碎片检测[J].计算机测量与控制,2023,31(7):15-20+27.
Tao Jiang, Cao Yunfeng. Small space debris detection based on local contrast and full Convolutional networks [J]. *Computer Measurement and Control*, 2019, 31(7): 15-20+27.
- [15] Van Leeuwen F. Validation of the new Hipparcos reduction[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2007, 474(2): 653-664.
- [16] 张薇,席红霞.基于轨迹预判的空间小目标在轨检测方法研究[J].光学与光电技术,2023,21(6):7-13.
Zhang Wei, Xi Hongxia. Research on in-orbit detection method of small space target based on trajectory prediction [J]. *Optics and Optoelectronics Technology*, 2023, 21(6): 7-13.
- [17] 原玉磊,郑勇,杜兰.星点中心高精度质心定位算法[J].测绘科学技术学报,2012,29(2):122-126.
Yuan Yulei, Zheng Yong, Duran. High precision centroid location algorithm for star center [J]. *Journal of Science and Technology of Surveying and Mapping*, 2012, 29(2): 122-126.
- [18] 张丰,吴量,张凯旋,等.基于星敏感器测试图像的噪声分析及仿真[J/OL].计算机仿真: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3724.TP.20240328.0857.004.html>.
Zhang Feng, Wu Liang, Zhang Kaixuan, et al. Based on star sensor to test the noise of the image analysis and the simulation [J/OL]. *Computer simulation*: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3724.TP.20240328.0857.004.html>.
- [19] 樊香所.序列图像弱小目标检测与跟踪算法研究[D].电子科技大学,2020.
Fan Xiangsuo. Research on dim dim Target Detection and tracking Algorithm in sequential image [D]. *University of Electronic Science and Technology of China*, 2020.