

# 天基空间目标成像仿真系统设计与实现

杨琴 宋锐 马燕新 鲁敏 张军

国防科学技术大学自动目标识别重点实验室, 湖南 长沙 410073

**摘要** 设计了一个基于可见光成像并针对空间点目标的天基空间目标成像仿真系统。分析了天基空间目标探测成像的过程, 据此将成像仿真过程分为轨道仿真、恒星背景成像仿真、目标成像仿真及电荷耦合器件(CCD)传感器系统仿真四个部分。在空间目标仿真部分将卫星主体简化为长方体、圆柱体及球体三种结构, 借鉴雷达截面积提出了目标的光学截面积, 利用目标光学截面积可以简单快速地得到目标在成像平面上的亮度大小。该系统实现了基于可见光成像的远距离天基空间点目标成像仿真, 可以获取任意观测时段、任意轨道下不同主体结构的空间目标观测仿真图像。

**关键词** 成像系统; 恒星成像; 点目标成像; 光学截面积; 电荷耦合器件传感器; 仿真系统

中图分类号 TP391.9

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.111101

## Design and Implement of Space-Based Target Imaging Simulation System

Yang Qin Song Rui Ma Yanxin Lu Min Zhang Jun

Key Laboratory of Automatic Target Recognition, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** A space-based target imaging simulation system based on visible imaging is designed and implemented for space point target. The space-based target detection imaging process is analyzed. The imaging simulation process is divided into four parts: orbit simulation, star background imaging simulation, target imaging simulation and charge coupled device (CCD) sensor simulation. In the part of target imaging simulation, satellite structures are simplified as rectangles, cylinders and spheres. The concept of target optical cross section is proposed reference for radar cross section. The brightness of target on imaging plane is calculated easily and quickly using the target optical cross section. The proposed system based on visible imaging achieves space-based space point target imaging simulation over a long distance. The observation simulation image of space target is obtained by the proposed system at any time, on any orbit with different major structures.

**Key words** imaging systems; star imaging; point target imaging; optical cross section; charge coupled device sensor; simulation system

**OCIS codes** 110.2970; 040.1520; 350.1270

## 1 引言

随着对外太空开发利用的不断深入,越来越多的国家将空间目标监视系统的研制作为重点。空间目标检测系统属于监视系统的一部分,因在空间目标监视领域的优越性,而成为世界各国研制空间目标监视系统的重点研究内容<sup>[1]</sup>。空间目标监视系统常采用的探测方式有光学探测和雷达探测。受工作功率、天线技术、扫描技术及星上信号处理技术的限制,雷达探测对远距离目标的探测能力不及光学探测,所以对空间目标进行远距离观测仍以光学探测为主<sup>[2]</sup>。

天基空间目标检测系统的主要任务是从监视系统得到的空间信息中,获取目标的运动状态及位置等信息。光学成像是空间监视系统获取空间目标信息的手段之一,主要有可见光成像和红外成像两种方式。由

收稿日期: 2015-05-19; 收到修改稿日期: 2015-07-10; 网络出版日期: 2015-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(61471371)

作者简介: 杨琴(1989—),女,硕士研究生,主要从事精确制导自动目标识别技术方面的研究。

E-mail: yangqin\_nudt@163.com

导师简介: 张军(1973—),男,博士,研究员,主要从事精确制导自动目标识别技术方面的研究。

E-mail: zhj64068@sina.com

于可见光波段可有效探测处于阳照区的目标,相比红外探测对远距离目标有更强的探测能力,技术发展也更为成熟。此外,因短期内难以获取空间目标的实际观测图像,使得在空间目标检测系统的研制过程中缺乏真实数据用于验证所提出的观测图像处理技术和方法,所以建立基于可见光成像的空间目标成像仿真系统具有重要意义。

由于天基空间目标成像的重要性,目前已有许多学者和研究机构针对天基空间目标成像仿真中涉及到的关键技术如空间目标建模、空间目标散射特性分析及空间目标成像亮度模拟等做了大量研究,并取得了一系列成果<sup>[3-12]</sup>。

文献[3]提出了类柱体空间目标的有效反射面积计算模型,并给出了基于STK的星等计算过程。文献[4]同样基于STK对空间目标轨道特性的分析,建立了一种计算空间目标等效星等模型。文献[5]利用TracePro对空间目标光学散射特性进行了精确建模与仿真。文献[6]引入BRDF五参量模型精确描述了卫星表面的可见光散射特性,并基于BRDF建立了天基观测中目标卫星等效星等计算模型。文献[7]基于3DMAX建立空间目标三维模型,提出了一种天基光学成像系统对空间目标和背景成像的模拟方法,并构建了空间目标和背景特性仿真演示系统。文献[8]在分析摄影测量成像原理与OpenGL成像机理的基础上,提出了一种基于OpenGL的空间目标2D/3D图像序列仿真方法。文献[9]对空间点目标成像特性中涉及的弥散和拖尾进行了研究。文献[10]分析了空间目标光学散射特性的基本研究内容,介绍了国内外的相关研究成果,提出了进一步研究的思路与方法。文献[11]提出一种基于STK和Matlab软件编程实现的天基观测空间目标可见光图像仿真方法。文献[12]以两颗卫星的光电成像载荷为测量系统,在推导得到运动目标测量方程的同时,对卫星轨道、光学成像等相关问题进行了分析。

可见已有的大部分文献主要针对空间目标成像的某一部分进行了深入研究,但未对整个成像仿真过程进行全面分析。本文针对空间点目标成像进行研究,在对天基空间点目标成像过程及原理进行分析的基础上,以VS2008为开发平台,设计了一个天基空间点目标成像仿真系统。将仿真过程分为四个部分并对每个部分进行了详细分析,设计实现了天基空间点目标成像仿真系统。其中,借鉴雷达截面积提出的光学截面积概念对空间点目标成像仿真具有重要意义。

## 2 天基空间目标成像过程分析

天基空间目标可见光成像可看作如图1所示的过程:太阳光、地球漫反射光以及月光、星光等空间杂散光照射到目标处经目标表面反射后到达观测平台,同时恒星发出的光也传到观测平台,经电荷耦合器件(CCD)传感器系统传输和聚焦,在CCD传感器成像平面上形成实际获得的观测图像。

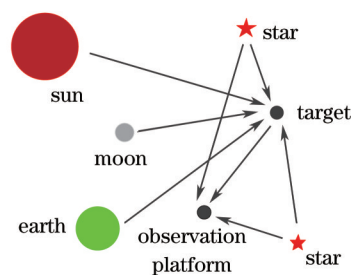


图1 天基空间目标成像示意图

Fig.1 Schematic diagram of space-based target imaging

根据欧美航天部门的实验测量,地球表面受到太阳光总的辐射值为  $E \approx 1357 \text{ W/m}^2$ ,其中可见光约占47%,即航天器受到的太阳直射光照度为  $E_s \approx 637.79 \text{ W/m}^2$ 。地球和月球本身不发光,靠反射太阳光而发亮。地球漫反射能量的大小与航天器距地球的相对位置、季节、地球表面状态和大气等因素有关,而且差别很大,另外由于空间目标飞行高度大速度快,地球反射光在目标处的辐射相比太阳光比例较小,因此常将地球视为漫反射体。其在空间目标处的反射光照度计算为

$$E_{\text{Earth}} = \frac{\rho_E E_s}{\pi R_s^2} \int \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 ds, \quad (1)$$

式中  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  分别为太阳光线、航天器与反射面法线的夹角,  $\rho_E$  为地球反射面的漫反射系数。根据(1)式计算

的地球漫反射光的变化范围大致是  $0\sim 180\text{ W/m}^2$ 。由星等与照度关系可知,满月时月光照度值为  $2.1\times 10^{-3}\text{ W/m}^2$ ,夜空中最亮的恒星天狼星的照度值为  $5.0\times 10^{-8}\text{ W/m}^2$ ,银河的照度值为  $9.1\times 10^{-9}\text{ W/m}^2$ ,可见空间杂散光照度数量级比较小,仿真时不予考虑。

### 3 天基空间目标成像仿真

根据上述对成像过程的分析,可将空间目标成像仿真的主要内容分为:轨道仿真、成像仿真和传感器系统仿真。轨道仿真即根据目标和观测平台的轨道根数,计算任意观测时刻目标、观测平台及太阳在地心赤道坐标系下的位置关系,其仿真结果将用于成像仿真;成像仿真是模拟空间目标在深空背景下通过成像器件生成图像,包括背景恒星成像仿真和空间目标成像仿真;CCD传感器系统仿真是对光电系统成像过程的模拟,包括光学系统传输过程的模拟和传感器噪声仿真。

因此,天基空间目标可见光成像仿真过程可分为轨道仿真、恒星背景成像仿真、目标成像仿真及传感器系统仿真四个部分,如图2所示。仿真涉及的关键技术包括:目标、观测平台及太阳相对位置的计算、目标光学截面积的计算、成像恒星的选取以及传感器噪声的模拟。

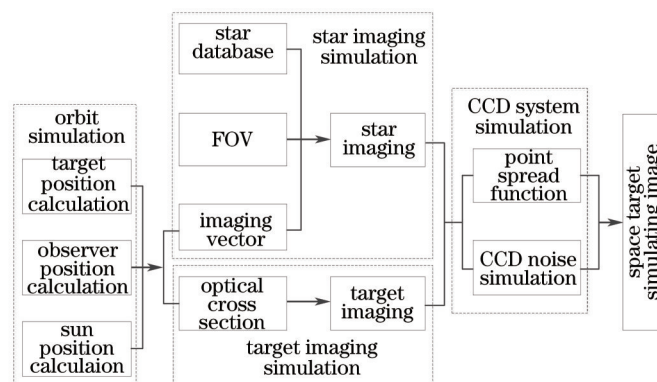


图2 天基空间目标成像仿真过程

Fig.2 Simulation process of space-based target imaging

#### 3.1 轨道仿真

轨道仿真即利用目标、观测平台的轨道根数及太阳与地球的相对位置关系计算出任意时刻在地心赤道惯性坐标系下目标、观测平台及太阳坐标的过程,根据三者的位置关系便可确定传感器视轴指向及空间目标光学截面积。

以地球为中心引力体的探测器如地球卫星等的坐标位置描述常采用地心赤道坐标系,该坐标系以赤道平面为基准平面,以地心为原点, $X$ 轴指向春分点, $Z$ 轴垂直于赤道平面并指向北极, $Y$ 轴与 $X$ 轴、 $Z$ 轴构成右手坐标系。卫星轨道根数在地心赤道坐标系中的定义如图3所示。其中, $a$ 为轨道长半轴, $e$ 为轨道偏心率, $i$ 为轨道倾角, $\Omega$ 为升交点赤经, $\omega$ 为轨道近地点极角, $\tau$ 为卫星过近地点时刻。利用轨道根数结合开普勒方程即可得卫星在轨道坐标系下的坐标,再根据坐标系的转换关系,便可得其在地球赤道惯性坐标系下的坐标。

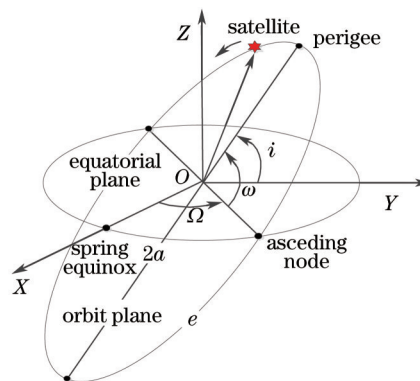


图3 卫星轨道根数

Fig.3 Satellite orbital elements

### 3.2 恒星背景成像

星空背景成像仿真的关键在于根据视场范围从星表中选定成像恒星,然后根据所选恒星的位置与星等信息确定其在成像平面上的位置和亮度。其中,视场范围由传感器视轴指向与传感器成像视场角共同决定,星表采用 Tycho-2 星表,表中包含恒星赤经(RA)、赤纬(DE)、赤经自行、赤纬自行及星等等(VT)信息。星表中每段字节的含义如表 1 所示,第 16~27 字节和第 29~40 字节为 J2000.0 天球坐标系(ICRS)下恒星的赤经、赤纬,第 42~48 字节和第 50~56 字节为赤经自行、赤纬自行,第 124~129 字节为恒星视星等,由于星表中恒星赤经赤纬对应 J2000.0 坐标系,所以需要星表中的恒星位置进行章动和岁差修正,才能得到恒星在观测时刻的赤经赤纬。

表 1 星表文件部分字节解读

Table 1 Describe part of the star catalogue file byte

| Byte    | Format | Units   | Label  | Explanation  |
|---------|--------|---------|--------|--|
| .....   |        |         |        |  |
| 16~27   | F12.8  | (°)     | RAmdeg | [ ] $\alpha$ , mean position, ICRS, at epoch J2000         |
| 29~40   | F12.8  | (°)     | DEmdeg | [ ] $\delta$ , mean position, ICRS, at epoch J2000         |
| 42~48   | F7.1   | mas /yr | pmRA   | [ -4418.0,6544.2 ] $\mu_{\alpha^*}$ , ICRS, at epoch J2000 |
| 50~56   | F7.1   | mas /yr | pmDE   | [ -5774.3,10277.3 ] $\mu_{\delta}$ , ICRS, at epoch J2000  |
| .....   |        |         |        |  |
| 124~129 | F6.3   | mag     | VTmag  | [ 1.905,15.193 ] Tycho-2 VT magnitude                      |
| .....   |        |         |        |  |

假设已知传感器视轴指向,结合成像视场角从星表中选取出处于视场范围内的恒星后根据赤经赤纬将其映射到成像平面,恒星映射成像原理如图 4 所示,  $(\alpha, \delta)$  表示传感器视轴指向,  $f$  表示成像系统的焦距,赤经赤纬为  $(\alpha_1, \delta_1)$  的恒星在成像平面上的对应坐标为  $(x_1, y_1)$ ,  $(\alpha_2, \delta_2)$  则对应  $(x_2, y_2)$ 。恒星在成像平面上的亮度则由星等与灰度的转换关系确定。

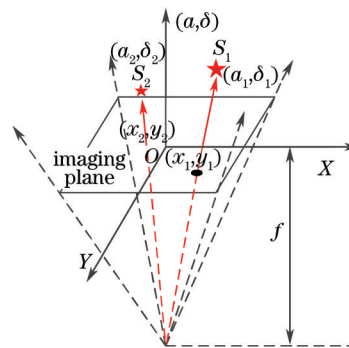


图 4 背景恒星映射成像原理

Fig.4 Background star mapping imaging principle

### 3.3 空间目标成像仿真

空间目标成像仿真的关键在于确定目标在成像平面上的亮度与位置。空间目标观测中,目标亮度直接影响着天基空间目标观测系统的跟踪能力及定位精度<sup>[13]</sup>。目标位置可根据观测平台上传感器视轴指向和目标与观测平台位置的位置关系得到,而目标的亮度则与目标尺寸、形状、表面材料及其所处空间位置相关。借鉴雷达截面积的概念,提出空间目标的光学截面积,利用上述与目标亮度相关的信息确定空间目标在成像平面上的亮度。

#### 3.3.1 雷达截面积

目标雷达截面积是目标向接收天线方向散射电磁波能力的量度。基于电磁散射理论,目标雷达截面积定义为:单位立体角内朝接收方向散射的功率与给定方向入射到该目标的平面波功率密度之比的  $4\pi$  倍。将雷达截面积的概念推广到光波段,提出目标激光雷达截面积用光通量密度之比表示为<sup>[14]</sup>

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{\phi_s}{\phi_i}, \quad (2)$$

式中  $\phi_i$  表示目标处入射光通量密度,  $\phi_s$  表示观测点处散射光通量密度。目标的激光雷达截面积是描述照射到目标表面的激光散射能力的物理量。

### 3.3.2 光学截面积

结合雷达截面积与激光雷达截面积的概念,提出了目标在可见光波段的光学截面积,用以描述从目标处到观测平台处的光散射特性。光通量密度即光照度,在不考虑光谱差异时,目标光学截面积可定义为

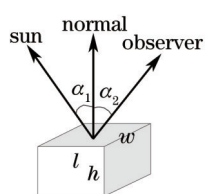
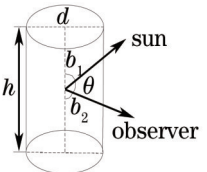
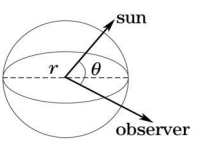
$$\sigma = 4\pi R^2 E_m / E_s, \quad (3)$$

式中  $E_s$  表示太阳在空间目标处的照度,  $E_m$  表示目标在观测平台相机入瞳处的照度。  $R$  表示空间目标到观测平台的距离。

常见的卫星主体结构有长方体、圆柱体及球体,本文将模型主体简化为这三种结构,并将其作朗伯体近似。得到目标与太阳、观测平台三者的位置关系、目标在观测平台处的照度与光学截面积公式以及所需要满足的角度条件如表2所示。由表2可知,当已知目标尺寸、形状、表面反射率及太阳、观测平台与目标三者位置关系等条件时,便可计算目标在观测平台相机入瞳处的照度,从而确定目标在成像焦平面上的亮度。另外,要注意的是当不满足角度条件时,观测平台接收不到目标反射的照度,无法对空间目标进行成像。

表2 三种结构对应的目标照度与光学截面积

Table 2 Target illumination and optical cross section of corresponding three structures

| Structures  | Illuminance and optic cross section   | Condition   |
|---|---|---|
|   | illuminance   |   |
|   | $E_m = \frac{E_s}{\pi R^2} l w \rho \cos \alpha_1 \cos \alpha_2$  | $\cos \alpha_1 \geq 0$<br>$\cos \alpha_2 \geq 0$  |
|   | optical cross section   |   |
|   | $\sigma = 4\pi R^2 E_m / E_s = 4 l w \rho \cos \alpha_1 \cos \alpha_2$                                      |   |
|  | illuminance   |   |
|   | $E_m = \frac{E_s}{\pi R^2} \frac{d h}{4} \rho \sin b_1 \sin b_2 [(\pi - \theta) \cos \theta + \sin \theta]$ | $\sin b_1 \geq 0$<br>$\sin b_2 \geq 0$            |
|   | optical cross section   | $(\pi - \theta) \cos \theta + \sin \theta \geq 0$ |
|   | $\sigma = 4\pi R^2 E_m / E_s = d h \rho \sin b_1 \sin b_2 [(\pi - \theta) \cos \theta + \sin \theta]$       |   |
|  | illuminance   |   |
|   | $E_m = \frac{E_s}{\pi R^2} \frac{\pi r^2}{4} \rho [(\pi - \theta) \cos \theta + \sin \theta]$               | $(\pi - \theta) \cos \theta + \sin \theta \geq 0$ |
|   | optical cross section   |   |
|   | $\sigma = 4\pi R^2 E_m / E_s = \pi r^2 \rho [(\pi - \theta) \cos \theta + \sin \theta]$                     |   |

假设主体受到太阳照射的表面法线恰在太阳相位角的平分线上。三种主体的尺寸分别为  $l = w = h = 1 \text{ m}$ ,  $h = d = 1 \text{ m}$ ,  $r = 1 \text{ m}$ , 物体表面反射率取 0.3, 此时太阳相位角与目标的光学截面积的关系如图 5(a) 所示, 可以看出, 当太阳相位角大于  $180^\circ$  时, 球体和柱体结构的光学截面积小于 0, 长方体结构的光学截面积在太阳相位角为  $180^\circ$  时为 0, 小于或大于  $180^\circ$  时则大于 0, 但根据光的入射与反射关系可知, 入射角与反射角必小于  $90^\circ$ , 所以要检测到空间目标, 太阳相位角必须小于  $180^\circ$ , 且相位角越小, 目标的光学截面积越大。

已知照度与视星等的关系:

$$m_t = m_s - \log_{2.512} \left( \frac{E_t}{E_s} \right), \quad (4)$$

式中  $m_t$  表示目标等效星等,  $m_s$  表示太阳的视星等, 一般取  $-26.74$ ,  $E_t$  表示目标在观测平台处的照度, 此时太阳相位角与目标等效星等的关系如图 5(b) 所示。由图 5(b) 可知, 太阳相位角越小, 目标等效星等越小即亮度越大, 接近  $180^\circ$  时等效星等剧增, 可见此时空间目标超出了传感器的可探测极限。

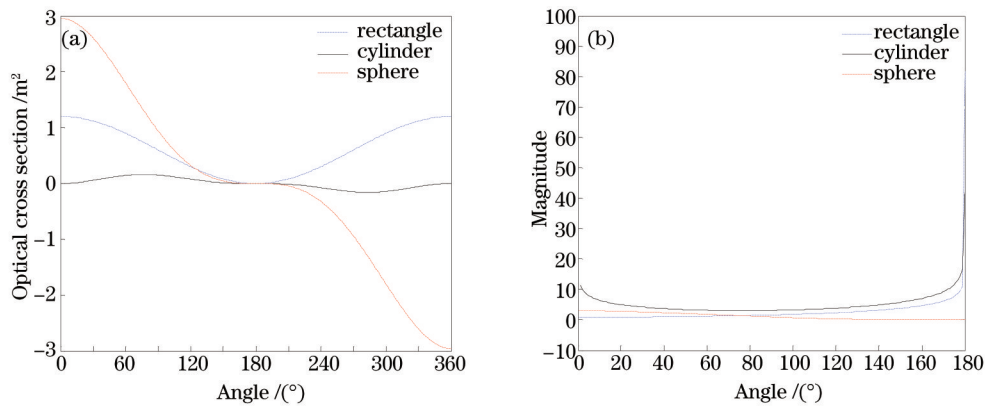


图5 (a) 太阳相位角与光学截面的关系图;(b) 太阳相位角与目标视星等的关系图

Fig.5 (a) Relation graph between sun phase angle and optical cross section; (b) relation graph between sun phase angle and target apparent magnitude

### 3.4 CCD 传感器系统仿真

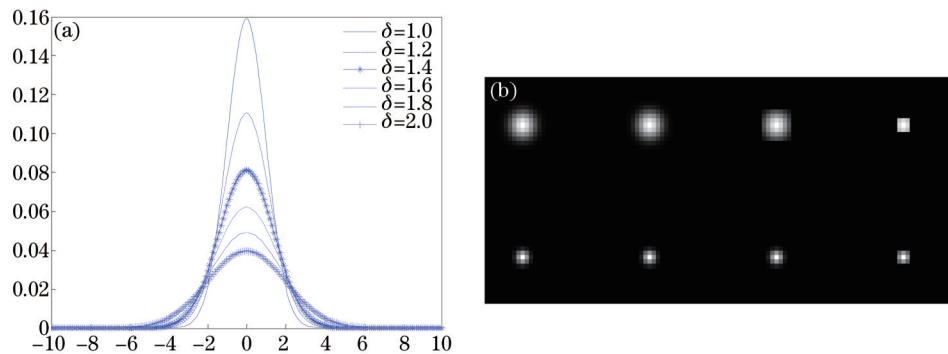
CCD 传感器系统仿真是对光电系统成像过程的模拟,包括对光学系统传输过程的模拟和传感器噪声仿真。由于本文针对远距离空间目标进行成像仿真,故目标与恒星均可视为点光源。

#### 3.4.1 点扩展函数

由于探测距离较远,探测器接收到的光可视为平行光,此时,光学系统的传输效果主要表现为对光的吸收和扩散。对于理想的光学系统,点光源所成的像是一个点,假设该点为  $(x_0, y_0)$ ,而对于实际的光学系统,所成像是以该理想点为中心的二维高斯分布的光斑<sup>[15]</sup>,其分布式为

$$I(x, y) = \frac{I_0}{2\pi\sigma_{\text{PSF}}^2} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_{\text{PSF}}^2}\right] \exp\left[-\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_{\text{PSF}}^2}\right], \quad (5)$$

式中  $I(x, y)$  表示星点在  $(x, y)$  处能量,  $I_0$  表示光斑总能量,  $\sigma_{\text{PSF}}$  表示器件的高斯半径,反映了光学系统的聚焦质量。假设总能量为 1, 能量分布情况与高斯半径的关系如图 6(a) 所示,可见高斯半径越小,聚焦质量越好。

图6 (a) 高斯半径  $\sigma$  与能量分布的关系;(b) 不同高斯半径在不同扩散窗口下的星点图Fig.6 (a) Relation between Gaussian radius  $\sigma$  and energy distribution; (b) star point with different Gaussian radii and spread windows

利用软件仿真得到不同高斯半径在不同扩散窗口尺寸下的星点成像效果图如图 6(b) 所示,第一行高斯半径为 2,第二行高斯半径为 1,扩散窗口从左到右依次为  $31 \times 31$ 、 $11 \times 11$ 、 $7 \times 7$ 、 $3 \times 3$ 。可见扩散窗口对星点的影响主要取决于高斯半径,高斯半径越大,扩散窗口的变化对星点的影响越大。高斯半径越小,扩散窗口的变化对星点影响越小。选择合适的扩散窗口有利于减少仿真中的计算量。

#### 3.4.2 传感器噪声模拟

在成像过程中噪声影响是不可避免的,并且对成像质量的影响颇为显著。传感器噪声根据来源不同可分为两类:1) 与 CCD 器件本身相关的固有噪声,包括光子噪声和暗电流噪声等;2) CCD 相关电路引入的噪声包括复位噪声和放大器读出噪声等,有时也统称为读出噪声。

##### 1) 光子噪声

光子噪声是器件的固有噪声, CCD各单元的光子噪声是相互独立的, 仅与单元本身接收到的光信号电子数相关。光子噪声服从泊松分布, 强度与光信号产生电子数的平方根成正比, 其方差等值电子数等于光信号产生电子数的平方根,

$$\sigma_s^2 = \sqrt{N_s}, \quad (6)$$

式中  $\sigma_s^2$  表示光子散粒噪声的方差,  $N_s$  表示曝光时间内单个 CCD 像元上产生的电子数。

### 2) 暗电流噪声

暗电流噪声即与暗电流相关的噪声, 包括暗电流散粒噪声和暗电流不均匀噪声。暗电流不均匀噪声是由于 CCD 各像元的暗电流不均匀引起的, 其强度等于不均匀电子数的平方根。暗电流散粒噪声产生于 CCD 耗尽层的热电子的统计变化, 是一个随机过程, 且服从泊松分布, 是暗电流噪声的主要组成部分, 其方差等值电子数等于在曝光时间内暗电流产生的电子数,

$$\sigma_d^2 = N_d, \quad (7)$$

式中  $\sigma_d^2$  表示暗电流噪声强度,  $N_d$  表示曝光时间内暗电流产生的电子数。

### 3) 读出噪声

CCD 读出噪声即 CCD 在转换信号电荷时产生的噪声, 主要包括放大器噪声和复位噪声。放大器噪声方差等值电子数等于放大器噪声等值电子数的平方, 即

$$\sigma_a^2 = N_a^2, \quad (8)$$

放大器噪声服从均值为  $N_a$ , 方差为  $\sigma_a^2$  的高斯分布。

复位噪声即当与浮置电容并联的开关在输出信号被读出后进行复位时产生的噪声。其方差可以等值电子数可表示为

$$\sigma_{res}^2 = kTC/q_e^2, \quad (9)$$

式中  $k$  为波尔兹曼常数,  $T$  为 CCD 工作绝对温度,  $C$  为浮置电容, 与输出灵敏度有关,  $q_e$  为电荷电量。实际应用中常采用相关双采样电路来抑制复位噪声, 可使其降低到 10% 左右。由于放大器噪声很小, 通常为几个电子, 复位噪声又为热噪声, 因此可将读出噪声建模为均值为 0, 方差为  $\sigma_r^2$  的高斯噪声,

$$\sigma_r^2 = \sigma_a^2 + \sigma_{res}^2. \quad (10)$$

根据以上分析可知光子噪声与暗电流噪声与器件的曝光时间相关, 暗电流噪声与读出噪声与器件工作温度相关, 此时假设器件工作温度为 300 K, 曝光时间为 0.6 s, 高斯半径为 0.9, 扩散窗口大小为 9×9, 星点成像局部放大效果图如图 7 所示。

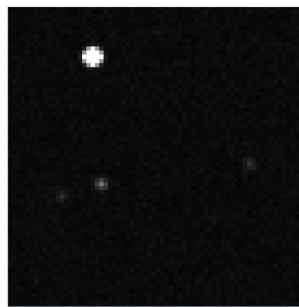


图 7 含噪星点局部放大图

Fig.7 Partial amplified drawing of star point with noise

## 4 仿真系统设计与仿真结果分析

系统假设空间目标与观测平台在仿真零时同时经过近地点, 以某型号 CCD 传感器为例, 假设其视场角大小为 4°×4°, 器件工作温度为 300 K, 曝光时间由仿真帧频决定。由于不同卫星其功能、组成、表面材料等不同, 卫星的反射率、辐射率特性变化较大, 难以给出确定的反射率。根据调研情况, 卫星的反射率数据一般取 0.2~0.4, 仿真中取 0.3。系统仿真参数设置及结果如图 8 所示。

假设仿真零时为观测平台与空间目标经过近地点的时刻, 此时观测平台恰在目标正下方; 设观测平台与目标轨道为与赤道重合的圆轨道, 轨道半径分别为 42164、42064 km; 仿真帧频设为 1 frame/s, 目标主体

结构选择球体结构进行仿真,其直径设为1 m。

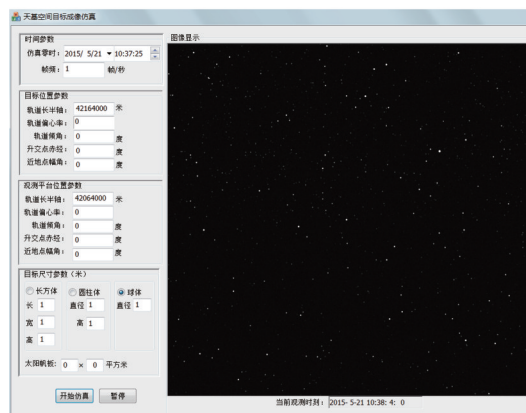


图8 仿真参数设置与仿真结果

Fig.8 Simulation parameter setting and simulation result

## 5 结 论

将天基空间目标仿真成像过程分为四个部分,并对每一部分进行分析,得到了天基空间点目标仿真观测图。在空间目标成像部分提出的空间目标光学截面能在已知空间目标结构、尺寸、表面材料反射率以及空间目标与观测平台及太阳三者的位置关系的条件下,得到目标在观测平台相机入瞳处的照度,以确定空间目标在传感器成像平面上的亮度。利用该系统,在已知观测平台位于目标正下方的时刻,可以得到以该时刻为仿真起始时的任意观测时刻、任意轨道以及不同结构形状的天基空间目标仿真图像。对天基空间目标检测方法的研究及检测系统的研制具有重要意义。

## 参 考 文 献

- 1 H Pan, G Song, L Xie, *et al.*. Detection method for small and dim targets from a time series of images observed by a space-based optical detection system[J]. *Optical Review*, 2014, 21(3): 292-297.
- 2 Yu Jianhui, Su Zengli, Tan Qian. Analysis on the space-based optic observation mode for space object[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, 23(6): 772-776.  
余建慧, 苏增立, 谭 谦. 空间目标天基光学观测模式分析[J]. *量子电子学报*, 2006, 23(6): 772-776.
- 3 Tan Bin, Yao Dongsheng, Xiang Chunsheng, *et al.*. Star magnitude computing model of space targets like prism[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35 (7): 33-37.  
谈 斌, 姚东升, 向春生, 等. 类柱体空间目标的星等计算模型研究[J]. *光电工程*, 2008, 35(7): 33-37.
- 4 Wan Yuzhu, Song Hui, Kang Zhiyu, *et al.*. The research of identification on calculation model of equivalent magnitude of space targets[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(6): 2292-2296.  
王玉柱, 宋 晖, 康志宇, 等. 基于空间光学探测的空间目标星等特性分析研究[J]. *宇航学报*, 2009, 30(6): 2292-2296.
- 5 Sun Chengming, Zhao Fei, Zhang Ze. Modeling and simulation of space object optical scattering characteristics using TracePro[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(11): 1122003.  
孙成明, 赵 飞, 张 泽. 基于TrancePro的空间目标光学散射特性建模与仿真[J]. *光子学报*, 2014, 43(11): 1122003.
- 6 Li Yanjie, Jin Guang, Zhong Xing. Modeling and simulation of visible light scattering properties of spatial object using STK[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2013, 33(2): 188-193.  
李艳杰, 金 光, 钟 兴. 基于STK的空间目标可见光散射特性建模与仿真[J]. *空间科学学报*, 2013, 33(2): 188-193.
- 7 Yang Changcai, Tian Jinwen, Ye Jin, *et al.*. Simulation of space targets imaging for a space based optical imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2410-2414.  
杨长才, 田金文, 叶 瑾, 等. 天基光学成像系统空间目标成像模拟技术[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2410-2414.
- 8 Gao Tengfei, Zeng Chaoyang, Hao Gangtao, *et al.*. Simulation of space target image sequence based on OpenGL[J]. *Computer Engineering and Design*, 2014, 35(11): 3946-3950.  
高腾飞, 曾朝阳, 郝刚涛, 等. 基于OpenGL的空间目标图像序列仿真[J]. *计算机工程与设计*, 2014, 35(11): 3946-3950.
- 9 Lü Jianming, Niu Yanxiong, Liu Haixia, *et al.*. Research on dispersion and striation characteristic of satellite photoelectric



- imaging system for space point target imaging[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2014, 51(9): 091101.
- 吕建明, 牛燕雄, 刘海霞, 等. 星载光电成像系统对空间点目标成像的弥散与拖尾特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(9): 091101.
- 10 Han Yi, Sun Huayan. Advances in space target space-based optical imaging simulation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12), 3372-3378.
- 韩 意, 孙华燕. 空间目标天基光学成像仿真研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(12), 3372-3378.
- 11 Zhang Jian, Lou Shuli, Ren Jiancun. A simulation method for space observation image[J]. *Electronics Optics & Control*, 2014, 21(11): 18-23.
- 张 健, 娄树理, 任建存. 一种空间观测图像的仿真生成方法[J]. *电光与控制*, 2014, 21(11): 18-23.
- 12 Wang Weibing, Wang Tingfeng, Guo Jin. Research on orbit determination technology for space target based on method of tracking with double satellites and double cameras[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0112006.
- 王卫兵, 王挺峰, 郭 劲. 基于双星双目跟踪方式的空间目标定轨技术研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0112006.
- 13 Zhang Haifeng, Wu Zhibo, Qin Si, *et al.*. Experimental study on technology of laser active illumination to dim light space targets[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(s2): s212002.
- 张海峰, 吴志波, 秦 思, 等. 低照度空间目标激光主动增亮技术实验研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(s2): s212002.
- 14 Ma Yafei. Research on Image Processing Technology Applied to Infrared and Lidar Compound System[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- 马亚非. 红外及激光主动复合图像处理技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- 15 L C Christian. Accuracy performance of star trackers a tutorial[J]. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System*, 2002, 38(2): 587-599.

栏目编辑: 苏 岑