

文章编号 1004-924X(2009)09-2136-09

在轨光学相机探测图像数字仿真系统的设计与实现

程 军,张 伟,鲍文卓,曹移明,丛明煜

(哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:在轨光学相机探测图像数字仿真系统可为空间相机的方案设计、信息处理算法研究与验证及地面性能测试等提供技术支持。本文根据在轨光学相机测量原理与工作环境,建立了空间目标的相对运动学与反射光学特征模型、相机成像模型以及背景恒星成像模型;分析了相机测量噪声及相机探测灵敏度并在仿真中考虑了干扰因素对成像质量的影响,完成了现有星表中背景恒星的视星等,根据相机的探测波段范围进行了仪器星等的等效计算(探测星等 >9 mV,计算误差 $<10\%$),提高了仿真图像的逼真度;最后,根据相机工作原理设计了仿真流程,应用 Visual C++ 与 Open×GL 技术实现了仿真软件并根据具体的在轨光学相机 CCD 与光学系统参数对探测图像生成方法进行了仿真实验验证。结果表明,该系统能够满足空间相机研制与性能测试的要求。

关键词:在轨光学相机;探测图像;数字仿真;天基光学测量

中图分类号: TP75;V447.3 **文献标识码:** A

Design and implementation of digital simulation system for detecting image of orbiting optical camera

CHENG Jun,ZHANG Wei,BAO Wen-zhuo,CAO Yi-ming,CONG Ming-yu

(Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001,China)

Abstract: The detecting image simulation for an orbiting camera has played an important role in the feasibility argumentation,the research of information processing method and the test of orbiting optical camera on the ground. In this paper, a relative kinematics model,a catoptric character model,an imaging model of camera, and an imaging model of background stars are established and the digital simulation system for detecting images of an orbital optical camera is designed and realized on the basis of the measurement principle and work environments of space-based optical cameras. Measurement noises and detecting sensitivity are analyzed and the effect of all kinds of disturbing factors on the images are taken into accounts in the simulation modeling. The equivalent calculation from the visible magnitudes of background stars to instrument magnitudes is conducted through the detecting wave band of the camera to improve the fidelity of simulated images (detecting magnitude >9 mV, calculating error $<10\%$). Finally, the simulation software is implemented by means of Visual C++ and OpenGL on the basis of designing simulation flows. The simulation and validation of detecting images is undertaken according to the CCD and optic system parameters of the orbiting optical camera. The

收稿日期:2008-08-15;修订日期:2008-10-27.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2005AA744010)

conclusion can be drawn that this system provides technical supports for the scheme design and performance test of the camera.

Key words: orbiting optical camera; detection image; digital simulation; space-based optical measurement

1 引言

随着航天技术的发展,空间监视网的测量单元已成功安置在空间运行的卫星上。在轨光学测量相机以被动探测、探测距离远、重量轻、功耗低等优点成为天基空间监视系统的一个重要发展方向^[1],已成功应用于美国中段试验卫星(MSX)的天基光学测量载荷 SBV 就是一个典型的范例^[2]。

由于测量条件的复杂性以及观测目标的多样性,天基光学测量载荷的论证、设计、开发、验证以及地面测试存在着很大困难。随着计算机技术及计算算法的飞速发展,计算机仿真在空间载荷的研制过程中发挥着越来越显著的作用。在轨光学相机探测图像数字仿真系统应用计算机仿真技术模拟天基光学相机的探测图像,为在轨光学相机的指标论证与方案设计提供了技术支持;为相机信息处理算法的研究与验证提供了原始数据;并可以通过注入方式,测试、评估相机信息处理系统的性能。

在轨光学相机对空间目标进行跟踪测量时,通常是在地球临边之上探测,成像背景为深空恒星背景,因此在轨光学相机探测图像仿真与应用于星敏感器评估的星图模拟有相似之处^[3-4],但也存在比较大的差异,主要表现在以下几个方面:

(1) 需要考虑目标与测量平台之间的相对运动学特性以及目标的光学特性模型;

(2) 在轨光学相机探测图像仿真对成像能量变换模型以及探测噪声模型的精度提出了更高的要求。

本文从上述两个要求出发,设计并实现了在轨光学相机探测图像数字仿真系统。

2 数学模型

2.1 在轨光学相机测量原理

绝大多数人造空间目标都是非自发光空间目标,其光亮度主要是通过散射其它天体的辐射而产生的。因此当目标处于非地影区时,其在轨监视测量常采用可见光探测,原理如图1所示。

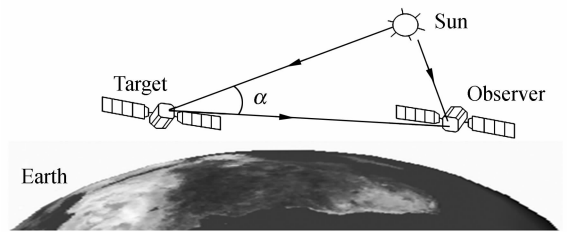


图1 在轨光学相机测量原理

Fig. 1 Measurement principle of space-based optical camera

在轨光学相机的测量原理是利用光学系统收集目标反射的光谱能量,投影到探测器焦面上,获取探测图像序列,通过信号提取与处理,衍生出目标运动及反射光度能量信息,从而实现对空间目标的测量。

从图2中可以看出,成像过程包括以下要素:空间目标、观测卫星、在轨光学相机和空间背景等。因此,在轨光学相机跟踪探测空间目标时,探

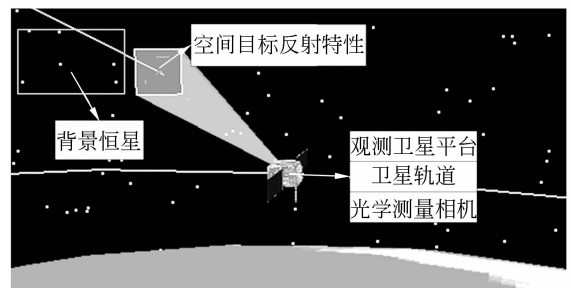


图2 空间目标可见光成像场景示意图

Fig. 2 Sketch for imaging scene of space-based optical camera

测图像信号主要由空间目标光度信号、深空背景信号、背景恒星信号、杂散光信号以及探测噪声 5 部分构成。

2.2 数字仿真系统总体结构

对空间目标的成像,图像中需要反映出目标、背景、噪声等成像要素的位置和强度等信息。成像仿真系统数学建模的重点也在于如何正确有效地计算并反映出这些信息。

由于空间环境的温度约为 5 K,根据普朗克公式,背景辐射的峰值波长为 1 mm 左右,属于微波波段,因此背景辐射对光学相机探测的影响很小,在探测图像仿真中可以忽略。另外,杂散光辐射不仅与太阳、地球及空间相机的空间位置关系有关,而且与相机光学系统的结构相关,因此难以建立通用模型。由于现有的杂散光成像特征计算多采用 Monte-Carlo 方法,计算复杂度高,因此,仿真系统建模中未考虑杂散光辐射的影响。

综上所述,成像仿真系统中对成像要素进行仿真建模,主要建立了以下几个仿真模型:(1)目标光学反射特性模型;(2)恒星背景模型;(3)坐标系建模;(4)卫星轨道与姿态运动模型;(5)相机成像模型;(6)图像生成模型。

2.3 坐标系定义与坐标变换

在空间目标天基光学成像仿真过程中,要用到的坐标系包括地心惯性坐标系、卫星本体坐标系、相机测量坐标系以及焦平面坐标系。

(1)地心惯性坐标系^[5]

采用 J2000 地球平赤道平春分点坐标系(Earth Mean Equator and Equinox of Date, EME2000),即原点 O 位于地球质心, OX 轴指向 2000-01-15 TDB 标准历元时刻的春分点,参考面为该标准历元时刻的平赤道面, OZ 轴垂直于参考面北向为正, OY 轴与 OX 、 OZ 轴构成右手坐标系。

(2)卫星本体坐标系^[5] $o-x_b y_b z_b$

坐标原点为测量卫星的质心, oz_b 轴位于卫星主对称面内指向地心方向, ox_b 轴在卫星主对称面内垂直于 oz_b 轴指向卫星运动方向, oy_b 轴垂直于主对称面并与 ox_b 、 oz_b 构成右手坐标系。

理想情况下,卫星主对称面与轨道面重合, oz_b 轴指向地心, oy_b 轴指向轨道面负法线方向。

(3)相机测量坐标系 $o-xyz$

坐标原点位于相机焦面中心, oz 轴与相机光

轴重合, ox 轴位于相机主对称面内垂直于 oz 轴且指向卫星速度方向, oy 轴与 ox 、 oz 轴构成右手坐标系。

假设在相机不工作时,相机测量坐标系 $o-xyz$ 与卫星本体坐标系 $o-x_b y_b z_b$ 重合。

(4)焦平面坐标系 $o'-x'y'$

坐标原点在焦平面中心, $o'x'$ 轴与相机测量坐标系中的 ox 轴重合, $o'y'$ 轴与 oy 轴重合。

(5)坐标变换

各坐标系之间的转换关系见图 3。

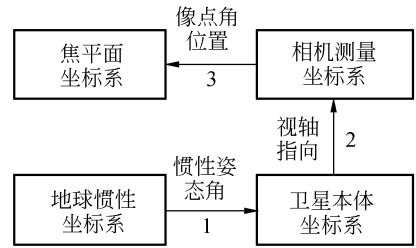


图 3 坐标系转换流程

Fig. 3 Transfer flow among the coordinates

1) J2000 坐标系至卫星本体坐标系的坐标变换

卫星本体坐标系相对于地心惯性坐标系的姿态角为 $(\varphi(t), \gamma(t), \vartheta(t))$,其旋转顺序为 3-1-2,则地心惯性坐标系至卫星本体坐标系的转移矩阵 M_{BG} 为^[5]

$$M_{BG} = ROT_y[\vartheta] \cdot ROT_x[\gamma] \cdot ROT_z[\varphi]. \quad (1)$$

2) 卫星本体坐标系至相机测量坐标系的坐标变换

测量相机相对卫星本体的旋转顺序为 2-1,转动角分别为 $(\theta(t), \nu(t))$,则本体坐标系至测量坐标系的转移矩阵为^[5]

$$M_{OB} = ROT_x[\nu(t)] \cdot ROT_y[\theta(t)]. \quad (2)$$

测量坐标系的 z 轴为相机光轴。

3) 相机测量坐标系至焦平面坐标系的坐标变换

假设测量相机光学系统的焦距为 f ,目标相对距离矢量在相机测量系中的坐标为 (x, y, z) ,则目标成像在焦平面上的坐标为 (x', y') 。通过简单的几何关系可以得到目标在焦平面上的坐标:

$$\begin{cases} x' = -\frac{x}{z} \cdot f \\ y' = -\frac{y}{z} \cdot f \end{cases}. \quad (3)$$

2.5 轨道计算模型

根据需要选择轨道摄动力,利用 STK 软件仿真计算观测星与空间目标的运行轨道及姿态数据,并通过 STK-Connect 工具实现 STK 与仿真软件的数据关联。

2.6 空间目标反射特性模型

太阳光辐射到大气层外的光谱辐照度为^[6]

$$E_{\text{sun}}(\lambda) = \left(\frac{r_{\text{sun}}}{R_{\text{sun}}}\right)^2 \cdot \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)} \quad (4)$$

其中, r_{sun} 为太阳半径(km), λ 为波长(μm), T 为太阳温度, c_1, c_2 为黑体辐射常量, R_{sun} 为太阳到空间目标的距离(km)。

空间目标反射光谱照度与目标、太阳、观测平台三者之间的相对几何关系,目标形状、姿态和尺寸以及目标表面材料性质参数(反射率和表面粗糙度等)等密切相关。这里把目标看成朗伯反射体,只考虑漫反射。

虽然空间目标的结构比较复杂,但由于目标相对距离比较远,空间目标的几何尺寸远小于相机的空间分辨率,因此,可将空间目标看作是若干平面、球面、圆柱面以及圆锥面等面目标的合成体,可分别计算各类面目标的反射光谱照度,然后根据这些简单目标的空间几何关系叠加计算结果,即可获得整个空间复杂目标的反射光谱^[7]。

$$E(\lambda) = \frac{E_{\text{sun}}(\lambda)}{R^2} \cdot \sum_{k=1}^m [\rho_k(\lambda) \cdot A_k(\Theta_{1k}, \Theta_{2k}, \Phi_k)] \quad (5)$$

式中 R 为目标相对距离(km), $\rho_k(\lambda)$ 为目标第 k 个面的光谱漫反射率, $A_k(\Theta_{1k}, \Theta_{2k}, \Phi_k)$ 为第 k 个面的有效反射面积, Θ_{1k}, Θ_{2k} 与 Φ_k 分别为第 k 个面的法线方向、入射方向、观察方向之间的夹角。

为了得到更加精确的空间目标反射特性计算模型,仿真系统提供了有限面元网格化计算选项,用于扩展源成像的目标光学特性计算,但计算速度较慢。

太阳位置矢量影响太阳光在目标反射面的入射角,由太阳近焦坐标系到 J2000 坐标系转换关系得到,太阳在瞬时平赤道地心坐标系下的位置矢量为^[8]

$$\mathbf{R}_S = \text{ROT}_x(\epsilon) \begin{bmatrix} R_S \cos \tilde{\theta}_S \\ R_S \sin \tilde{\theta}_S \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 R_S 为太阳的地心距, $\tilde{\theta}_S$ 为太阳相对于当日

平春分点的真近点角, $\epsilon = \bar{\epsilon} + \Delta\epsilon$ 为黄赤交角。

2.7 相机成像模型

可见光成像模型包括成像几何变换模型、能量变换模型以及相机噪声模型。

(1) 成像几何变换模型

假设地心惯性坐标系中目标相对位置矢量为 $(\mathbf{X}(t), \mathbf{Y}(t), \mathbf{Z}(t))$, 将目标相对位置坐标从 J2000 坐标系变换到焦平面坐标系,得到目标在焦平面坐标系中的坐标 (x', y') 。

对于理想光学系统,点目标在 CCD 焦平面上成像要占据一个像素,则目标成像焦平面像素坐标为 (x'', y'') ,

$$x'' = \text{int}(x'/u_x), \quad y'' = \text{int}(y'/u_y) \quad (7)$$

式中 u_x, u_y 为 CCD 在 x, y 方向上的像元尺寸。

实际成像过程中,因受到圆孔衍射及几何像差的影响,可能导致目标在焦面的成像由点成像扩散为多像元成像。扩散像元数的多少与目标成像信号总强度、相机有效探测波段范围、系统在轨成像质量以及像元尺寸有关。

(2) 能量变换模型

空间目标成像过程由目标、相机光学系统、CCD 探测器等环节组成。因此,影响目标成像信号强度的因素有:空间目标反射光谱辐照度,光学系统的入瞳面积、焦距、光谱透过率,CCD 的量子效率、积分时间、探测波段和光谱响应。图 4 给出了目标反射光度到成像信号电子数的转换关系。

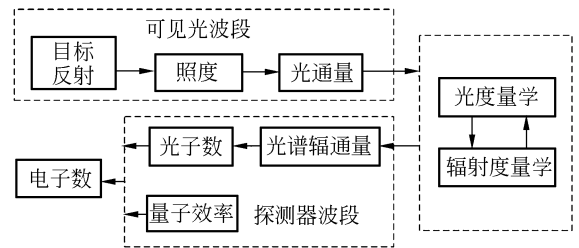


图 4 目标光度与成像信号电子数的转换关系

Fig. 4 Transfer relationship between object magnitude and imaging intensity

目标成像信号模型为^[9]

$$N_S = A_0 \cdot t_d \cdot \int_{\Delta\lambda} E(\lambda) \cdot \left[\frac{\tau_o(\lambda)\tau_c(\lambda)\eta(\lambda)}{hc} \right] \cdot d\lambda \quad (8)$$

式中 t_d 为测量积分时间; A_0 为相机光学系统入

瞳面积; $\tau_0(\lambda)$ 为光学系统光谱透过率; $\tau_a(\lambda)$ 为大气光谱传输率, 对于天基空间目标监视系统, 可以不考虑地球大气的影响, 即取 $\tau_a(\lambda) = 1$; $\eta(\lambda)$ 为探测器的量子效率; h 是普朗克常数; c 是光速; $\Delta\lambda$ 为探测器的有效探测波段范围。

(3) 相机噪声模型

CCD 相机噪声由 3 部分组成^[9], 即 CCD 噪声 \bar{n}_{CCD} , 含暗电流噪声、转移噪声和输出噪声; 目标辐射光子的散粒噪声 \bar{n}_s 和背景辐射光子的散粒噪声 \bar{n}_B 。其中 \bar{n}_{CCD} 由 CCD 器件的制造工艺确定, \bar{n}_s 和 \bar{n}_B 分别是 N_s 与 N_B 满足泊松分布的散粒噪声, 其均方根分别表示为:

$$\bar{n}_s = \sqrt{N_s}, \bar{n}_B = \sqrt{N_B}. \quad (9)$$

空间目标天基光学测量中, 相机的探测背景为深空背景, 空间环境温度约为 5 K, 根据普朗克公式, 背景辐射的峰值波长为 1 mm 左右, 因此, 背景辐射散粒噪声可以忽略。则总的噪声光电子均方根值为

$$\bar{n} = (\bar{n}_s^2 + \bar{n}_{\text{CCD}}^2)^{1/2} = (N_s + \bar{n}_{\text{CCD}}^2)^{1/2}. \quad (10)$$

随着制造工艺水平的提高以及相关双采样等技术的应用, 转移噪声和输出噪声已经可以降到很低水平, 仿真中不予考虑, 只需模拟暗电流噪声和散粒噪声^[10]。

(4) 相机探测灵敏度

信噪比是光电系统噪声受限情况下检测目标能力的常用判据, 其值称为信噪比阈值。理论上, 从噪声环境中检测出目标信号存在两种情况。其一是有效地提取出目标信号, 其可能性大小称为探测概率; 其二是提取出噪声信号, 其可能性大小称为虚警概率, 二者与信噪比阈值密切相关。光电系统中, 从 CCD 光子噪声中检测点源目标信号的情形相当于在白噪声中检测脉冲信号, 需根据所要求的探测概率和虚警概率确定信噪比阈值^[11]。

如要求探测概率 $> 99.9\%$, 虚警概率 $< 10^{-3}$, 则依据图 5 选择信噪比阈值为 $K_{S/N} = 7$ 。根据下式可得到在轨光学相机所能检测到的最低信号强度 $N_{s-\min}$ 。

$$N_{s-\min} / (N_{s-\min} + \bar{n}_{\text{CCD}}^2)^{1/2} \geq K_{S/N}. \quad (11)$$

将 $N_{s-\min}$ 代入(5)、(8)式即可得到相机探测

最小辐照度 E_{\min} 以及相机对目标的最远探测距离。

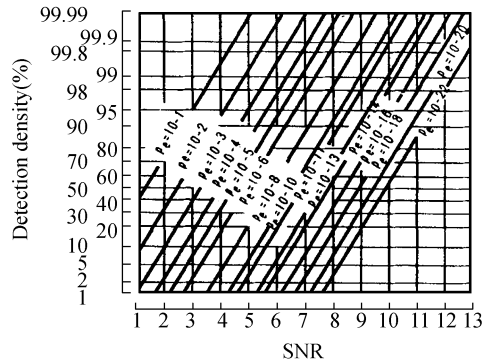


图 5 探测率-虚警率-信噪比关系^[16]

Fig. 5 Relation among detection probability, false alarm probability and signal-to-noise^[16]

(4) 相机量化模型

CCD 相机测量输出的是数字图像, 因此在图像仿真过程中需要对探测得到的信号强度进行量化。假设量化位数为 D , 则量化模型为

$$I = \begin{cases} \frac{N_{s-\max} - N_{s-\min}}{2^D} \cdot (N_s - N_{s-\min}), & (N_{s-\min} \leq N_s \leq N_{s-\max}) \\ 2^D, & (N_s > N_{s-\max}) \\ 0, & (N_s < N_{s-\min}) \end{cases}, \quad (12)$$

式中 $N_{s-\max}$ 是相机所能量化的最大信号强度。

2.8 恒星背景模型

由于恒星距离地球非常遥远, 几乎所有恒星的视差都 $< 0.1''$ (绝大部分 $< 0.01''$), 远远小于现有相机的像元分辨率, 因此光学系统对空间恒星成像为点源成像。

现有星表中给出了每颗可观测恒星在惯性天球坐标系(与 J2000 坐标系重合)中的角位置-赤经 α 、赤纬 δ , 则恒星方向矢量在 J2000 坐标系可表示成

$$(\cos \delta \cdot \cos \alpha, \cos \delta \cdot \sin \alpha, \sin \delta)^T, \quad (13)$$

将该单位矢量经坐标变换转移到焦平面坐标系即可得到恒星在相机焦平面上的坐标。对恒星方位来说, 从地心坐标系到相机测量坐标系的转换无须顾及坐标平移所带来的误差, 只需考虑旋转变换^[12]。

由于星表中给出的星等通常是以人眼作为测

量仪器来确定的一种恒星发光强度的量度,称为恒星的视星等(M_V),其波段是 $0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$,而测量相机的探测波段常常与之不符。因此,计算恒星入瞳辐照度时,首先需要根据恒星的主型将其视星等转化为仪器星等 $m^{[13-14]}$,然后根据下式计算恒星在相机入瞳处的辐照度 E_{star} ,

$$E_{\text{star}} = E_{\text{sun}} \times 10^{0.4(-26.73 - m)} \quad (14)$$

将 E_{star} 代入(8)式即可计算出进入相机视场的恒星在探测器中产生的电子数 N_T 。

3 仿真系统的实现

3.1 软件设计

(1)在轨光学相机探测图像数字仿真系统最终由 STK、Visual C++ 与 OpenGL 结合实现,编制了图像生成软件。利用 STK 计算目标与被观测星的轨道及姿态数据,由 Visual C++ 实现了用户交互界面的生成、各类数据的计算以及关键数据曲线的绘制,并由 OpenGL 图形技术生成序列仿真图像。

(2)利用 STK 软件仿真计算观测星与空间目标的运行轨道及姿态数据,并通过 STK-Connect 工具实现 STK 与仿真软件的数据关联。由于可能出现相对运动速度比较大的情况,要求积分步长小于相机探测器积分时间的 $1/5$ 。

(3)只考虑测量相机的散粒噪声和暗电流噪声,假设噪声为加性噪声,且其分布是参数分别为 \bar{n}_s 和 \bar{n}_{CCD} 的泊松分布,可生成随机数迭加到图像中。

(4)采用的原始星表为 SAO 星表,含有 258 997 颗星,每颗星占 204 个字节。为了提高星表文件读取速度,并没有采用 ODBC 或者 DAO 数据库技术,而是提取出 SAO 星表中的星等、编号、赤经、赤纬数据制作成二进制数据格式再读入,显著提高了读取速度。仿真之前,需要根据相机的探测波段将星表中的恒星视星等转换成对应的仪器星等,并通过计算相机的探测灵敏度,对星表中的“弱星”进行筛选。

(5)能够实时输出仿真图像,也可在仿真结束后将序列图像压缩成数据包输出,能够根据用户需要输出数据并绘制曲线。

3.2 仿真流程

仿真流程见图 6。图中目标是否可测量主要依据以下 3 个条件^[15]。

(1)几何可见。即监视测量卫星与空间目标之间是通视的,二者之间的连线不受地球遮挡。

(2)光学可见。取决于在轨光学相机两项性能指标:光轴指向角范围与探测距离。

(3)设备可见。监视测量卫星对空间目标的观测应避免太阳背景,且空间目标处在地影外,从而能反射太阳光线以供监视测量卫星捕捉。

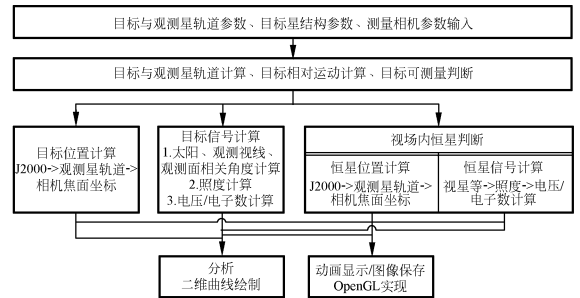


图 6 系统仿真流程

Fig. 6 Simulation flow of system

3.3 仿真实例

测量卫星与空间目标的轨道参数见表 1,利用 STK 仿真计算卫星与目标的轨道与姿态数据,轨道仿真过程中只考虑地球 J2, J4 项摄动;相机参数见表 2,采用步进凝视跟踪方式测量,步进周期为 10 s,帧时间为 1 s,每 10 帧为一数据包。仿真生成一个步进周期内含 10 幅探测图像(2004-06-01T14:55:30.1 ~ 2004-06-01T14:55:31.0),相对距离约为 4 225 km。

表 1 测量卫星与空间目标轨道参数

Tab. 1 Orbital parameters of measured satellite and space object

	测量卫星	空间目标
轨道类型	太阳同步圆轨道	圆轨道
轨道高度	600 km	1 000 km
升交点赤经	250.3°	289.7°
轨道倾角	97.8°	45°
临近点角	0.0	0.0
偏心率	0.0	0.0
姿控方式	三轴稳定,主对称面与轨道面重合	
测量起止时间	2004-06-01T14:54:20.3(UTCG)~ 2004-06-01T15:08:25.3(UTCG)	

表 2 测量相机主要参数

Tab. 2 Main parameters of spaceborne measuring camera

工作波段	0.3~0.9 μm
探测器尺寸(mm)	420×420
像元尺寸(μm)	27×27
探测视场 FOV	1.4°×1.4°
孔径(mm)	150
焦距(mm)	450
空间角分辨率 IFOV	12.1(arcsec/pixel)=60(μrad)
探测灵敏度(mV)	9
进入视场恒星数	4~5

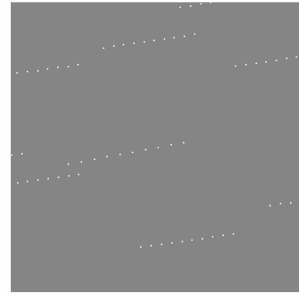


图 9 步进周期内原始图像叠加图

Fig. 9 Accumulated image of initial images in stepping cycles

仿真计算出空间目标的反射光度信号见图 7、8。将一个步进周期内在轨光学相机探测得到的 10 幅图像叠加得到图 9。

4 结 论

本文根据在轨光学相机的任务需求及工作原理,设计了探测图像数字仿真系统的总体结构,建立了各坐标系及其坐标变换模型、空间目标与观测卫星轨道模型、空间目标可见光反射特征模型、测量相机成像模型,并应用软件实现了仿真系统,可以根据用户需求生成各种观测模式下的仿真图像,以用于在轨光学相机的指标论证与方案设计、相机信息处理算法的研究与验证以及相机信息处理系统的性能测试与评估。利用 STK 软件仿真计算了观测星与空间目标的运行轨道及姿态数据,并通过 STK-Connect 工具实现了 STK 与仿真软件的数据关联。在空间目标可见光反射特征计算过程中,首先将目标分解成若干平面、球面、圆柱面以及圆锥面等面目标并分别计算了各标准面的反射光谱照度,然后根据这些简单目标的空间几何关系叠加计算结果,获得了整个空间目标的反射光谱。该方法虽然计算速度快,但精度较低,仅适用于点源成像的目标光学特性计算。若采用有限面元网格化的数值计算方法,则可提高计算精度,并且可用于扩展源成像的目标光学特性计算,但计算速度较慢。为提高仿真图像的逼真度,在建立相机成像模型时,引入了相机测量噪声。根据相机的探测波段将星表中的恒星视星等转换成对应的仪器星等,提高了星空背景模拟的精度(计算误差 $<10\%$)。另外,在仿真之前根据相机探测灵敏度的计算结果对星表进行筛选,提高了读取速度。由于在仿真系统中未考虑杂散光辐射等因素,这方面工作还有待进一步完善。

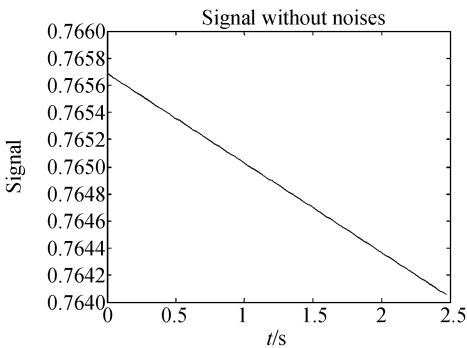


图 7 归一化后目标反射光度理想测量信号

Fig. 7 Normalized photometric signal of the space object without detecting noise

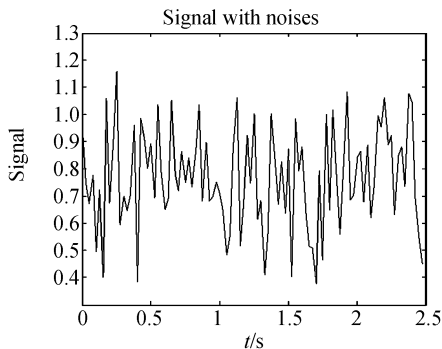


图 8 考虑探测噪声的目标反射光度仿真信号

Fig. 8 Simulated photometric signal of space object considering detecting noises

参考文献:

- [1] 谭莹. 天基空间目标探测技术探讨[J]. 空间电子技术, 2006(3):5-9.
TANG Y. Discussion of space-based space object detection technique[J]. *Space Electronic Technology*, 2006(3):5-9. (in Chinese)
- [2] GRANT H. STOKES, CURT VON BRAUN, RAMASWAMY SRIDHARAN, *et al.*. The space-based visible program [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 1998, 11(2):1998:205-238.
- [3] 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, 18(5):1195-1198.
WANG ZH K, ZHANG Y L. Design and implementation of star pattern simulator for use of space surveillance[J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(5):1195-1198. (in Chinese)
- [4] 郝胜国, 郝志航. 星敏传感器星象模拟软件的研究[J]. 光学精密工程, 2000, 8(3):208-212.
HAO SH G, HAO ZH H. Star-image simulation software of star tracker[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3):208-212. (in Chinese)
- [5] 李济生, 等. 航天器轨道确定[M]. 北京:国防工业出版社, 2003.
LI J SH, *et al.*. *Orbit Determination of Spacecraft* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [6] GEORAGE J Z. *The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook vol. 1 -Sources of Radiation* [M]. Michigan: SPIE Optical Engineering Press, 1993.
- [7] HROVAT D. Hyperspectral analysis of space objects; signal to noise evaluation[J]. *Master's thesis, Air Force Institute of Technologies*, 1993, ADA2738821.
- [8] 郝晓宁, 王威. 近地航天器轨道基础[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 2003.
XI X N, WANG W. *Fundamentals of Near-earth Spacecraft Orbit* [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2003. (in Chinese)
- [9] 王以铭. 电荷耦合器件原理与应用[M]. 北京:科学出版社, 1987.
WANG Y M. *Principia and Application of CCD* [M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [10] 佟首峰, 阮锦, 郝志航. CCD 图像传感器降噪技术的研究[J]. 光学精密工程, 2000, 8(2):140-145.
TONG SH F, RUAN J, HAO ZH H. Noise reducing scheme on output signal of CCD[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(2):140-145. (in Chinese)
- [11] 刘金国, 李杰, 郝志航. APS 星敏传感器探测灵敏度研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4):553-557.
LIU J G, LI J, HAO ZH H. Study on detection sensitivity of APS star tracker [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4):553-557. (in Chinese)
- [12] 巩岩, 胡宜宁, 赵阳. 基于数字光处理技术的小型星模拟器设计[J]. 光学精密工程, 2007, 15(11):1698-1703.
GONG Y, HU Y N, ZHAO Y. Design of a mini star simulator based on digital optical processing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11):1698-1703. (in Chinese)
- [13] 陈世平. 空间相机设计与试验[M]. 北京:中国宇航出版社.
CHEN SH P. *Design and Experiment of Space Sensor* [M]. Beijing: Chinese Aerospace Press. (in Chinese)
- [14] HEIDE E J KRUIJFF, M. OUDE-LANSINK, *et al.*. Development and validation of a fast and reliable star sensor algorithm with reduced database [R]. IAF-98. A. 6. 05.
- [15] 赵砚, 易东云, 潘晓刚, 等. 基于天基光学观测的空间目标可见性分析[J]. 飞行器测控学报, 2007, 26(3):5-12.
ZHAO Y, YI D Y, PAN X G, *et al.*. Analysis of space object's visibility based on space-based optics observation [J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2007, 26(3):5-12. (in Chinese)
- [16] 袁家虎, 张建荣, 贺善金. 导航星敏传感器探测灵敏度研究[J]. 光电工程, 1999, 26(6):1-6.
YUAN J H, ZHANG J R, HE SH J. A study on detection sensitivity of navigation star sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1999, 26(6):1-6. (in Chinese)

作者简介:



程 军(1973—),男,河南信阳人,博士研究生,主要从事天基光学监视与测量、目标检测与识别等方面的研究。E-mail: chengjun@hit.edu.cn



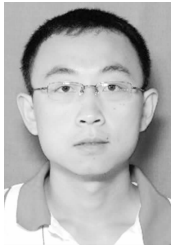
曹移明(1982—),男,江苏泰兴人,博士研究生,主要从事空间目标光学特性建模等方面的研究。E-mail: caoyiming888@126.com



张 伟(1962—),男,黑龙江牡丹江人,工学博士,教授,博士生导师,主要从事空间光学工程与应用技术等方面的研究。E-mail: wzhang@hit.edu.cn



丛明煜(1964—),男,黑龙江双鸭山人,工学博士,教授,博士生导师,主要从事空间监视、计算机仿真技术等方面的研究。E-mail: mycong@hit.edu.cn



鲍文卓(1983—),男,内蒙古兴安盟人,博士研究生,主要从事图像仿真与处理等方面的研究。E-mail: latermouse@126.com

(本栏目编辑:严 寒)

● 下期预告

FY-3A 紫外臭氧垂直探测仪程控设计与实现

汪龙祺^{1,2},王淑荣¹,李福田¹,阚珊珊¹,刘海波¹,宋克非¹

(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. 中国科学院研究生院,北京 100039)

我国自主研发的星载紫外臭氧垂直探测仪(SBUS)首次投入在轨应用,从根本上改变了我国大气臭氧探测和研究的现状。本文描述了 FY-3A 气象卫星紫外臭氧垂直探测仪的工作模式,在此基础上对在轨运行的任务进行了分析说明,针对仪器运行参数多、测量模式转换复杂等特点,提出了合理的在轨运行控制方案,详细介绍了其程控设计要点与实现。给出了 FY-3A 星紫外臭氧垂直探测仪在轨测量的太阳、大气模式紫外辐射遥感数据,结果表明:FY-3A 星紫外臭氧垂直探测仪在轨工作正常,测量模式的转换、执行准确,运控参数设置有效,软件功能已全部实现,满足使用要求,其运控方案完备,数据获取有效,仪器在轨工作在最佳的性能状态。