

基于 STK/matlab 的空间目标序列星图仿真

刘夫成^{1,2}, 刘朝晖¹, 刘文¹, 梁冬生^{1,2}, 袁辉^{1,2}

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于 STK/matlab 软件, 提出了一种能够在复杂星空背景下模拟微弱点状运动目标序列星图的生成方法。首先, 系统分析了背景星空模型的建立过程; 然后, 分析了影响点目标成像的扰动与噪声等因素, 使得模拟仿真的序列星图更接近真实物理过程; 同时, 利用 STK 软件, 对空间目标建模, 预测观测卫星与地球同步轨道上空间目标的相对几何关系, 并对高轨目标的可见性进行了系统的分析。给出了一种计算空间目标可见性判据的简便方法; 最后, 综合考虑了影响高轨目标可见性的各种因素, 由 STK 生成空间目标轨道的预测数据, 采用 matlab 程序对其进行了模拟仿真。对模拟空间目标检测、识别与跟踪的研究场景具有一定意义。

关键词: 空间目标; 序列星图; 星空背景; 可见性分析; 蒙特卡罗

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)09-3157-05

Space target sequence image simulation based on STK/matlab

Liu Fucheng^{1,2}, Liu Zhaohui¹, Liu Wen¹, Liang Dongsheng^{1,2}, Yuan Hui^{1,2}

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A method for sequence image generation of dim point moving targets in complex star background was presented based on STK/matlab software. Firstly, the starry background modeling process was analyzed; then, the satellite disturbance and noise that affected the point target imaging were detailedly discussed to make sequence images simulated closer to the real world; and besides the space target was modeled and its relative geometric relationship with the observation satellite was predicted by the STK software, at the same time the visibility of high earth orbit was systematically analyzed. In addition, a simple and convenient method to calculate the space target visibility criterion was given. By taking into account of various factors that impacted the visibility of high earth orbit target, the space target orbit prediction data was generated by STK and then matlab software was adopted to simulate the sequence image. It's useful in providing space environment for detection and tracking space target.

Key words: space target; sequence image; star background; visibility analysis; Monte Carlo

收稿日期: 2014-01-09; 修订日期: 2014-02-10

作者简介: 刘夫成(1988-), 男, 硕士生, 主要从事空间目标检测与识别方面的研究。Email: liufucheng@opt.cn

导师简介: 刘朝晖(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电跟踪测量仪器总体技术方面的研究。Email: lzh@opt.ac.cn

0 引言

空间目标成像仿真研究对空间目标的检测、监视与跟踪具有重要的理论意义和广泛应用前景^[1]。韩意^[2]等利用 STK、OpenGL 生成运动空间目标近距离光学观测的二维图像序列；郭明^[3]等通过 3DS MAX 和 OpenGL 实现了空间目标/星空背景动态红外图像的模拟仿真；但以上文献在模拟星图时只是随机给定一组探测器视轴指向，并未考虑地球遮挡、日/月光等因素对星点成像模型的影响。故在采用参考文献[2-3]给出的方法模拟星图时，可能会存在视场被地球遮挡的情况下，仍可模拟得到完美星图，从而与实际情况不符。因此，文中利用 STK/matlab 软件，在序列星图仿真的基础上分析了图像中空间目标与地球背景的运动性质，并对其进行了模拟仿真。图 1 即为文中提出的空间点目标成像仿真流程图。

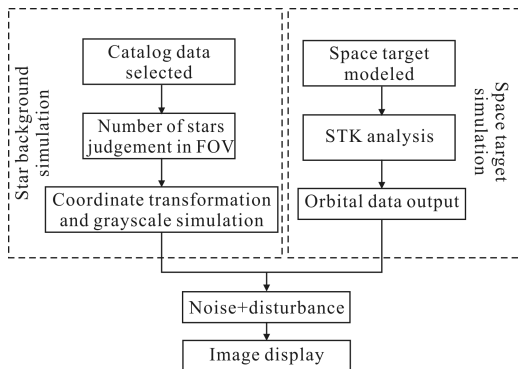


图 1 成像仿真流程图

Fig.1 Flow chart of image simulation

1 背景星空模拟

文中基于 STK/matlab 软件进行模拟仿真实验，所采用的探测器视场角(FOV)为 $12^\circ \times 12^\circ$ ，CCD 分辨率为 512×512 ，星等的灵敏度为 7.0 视星等。根据这些性能的要求，文中采用参考文献[4]中的方法从 SAO 基础星表中选取部分导航星组成文中的导航星表。对导航星进行自行、岁差与章动的修正，即可计算得到其当前的赤经和赤纬 (α_i, δ_i) 。将导航星表中的导航星映射到单位球面，得到该星在 2 000.0 地心惯性坐标系下的单位向量为 $s_i = [\cos\delta_i \cos\alpha_i, \cos\delta_i \sin\alpha_i, \sin\delta_i]$ ；然后利用旋转变换和透视投影变换^[5]，得到恒星在 CCD 传感器像平面的像点位置坐标如下：

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & u_0 \\ 0 & f & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{R}_{313} \mathbf{s}_i \quad (1)$$

式中： \mathbf{a} 为非零的比例因子； f 为镜头焦距； u_0 和 v_0 分别为光学中心(主点坐标)； \mathbf{R}_{313} 为天球坐标系到星敏感器坐标系的旋转矩阵。

又计算出的 (x, y) ，其坐标系的原点位置位于星图的中心，而计算机屏幕的坐标原点位于左上角，故为了正确显示，模拟星图需进行坐标平移，平移公式如下：

$$\begin{cases} X=256+x \\ Y=256-y \end{cases} \quad (2)$$

考虑相机的传递函数等因素的影响以及提高恒星在星图中的定位精度，文中采用二维高斯分布函数将恒星和运动目标进行离焦处理。同时结合不同星等的星体相对亮度的数学关系，采用的星等和灰度转换公式为：

$$g=255/2.512^{m-m_{\max}} \quad (3)$$

式中： g 为当前恒星的灰度值； m 为恒星的星等； m_{\max} 为星敏感器的星等阈值。

采用蒙特卡罗方法，随机产生一组星敏感器视场光轴指向，在不加噪声情况下，模拟星图见图 2。

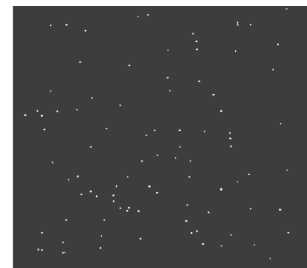


图 2 背景星空图像

Fig.2 Starry background image

2 空间目标建模

2.1 卫星姿态指向扰动模型

卫星姿态扰动包括两部分分量^[6]，即姿态指向误差和姿态指向抖动。姿态指向误差是指一段时间内卫星姿态扰动的均值。姿态指向抖动是指由周期性空间外扰力矩作用引起卫星姿态发生的周期性变化，在星图中主要表现为星点的偏移。在此，采用傅里叶分析原理，将卫星的姿态角进行谐波分解，得到

描述姿态指向扰动的数学模型为:

$$\Psi(t) = \sum \Psi_{mi} \sin(2\pi f_i t + \phi_i) + \Psi_0 \quad (4)$$

式中: $\Psi(t)$ 为姿态控制系统滤波输出的姿态角; t 为卫星飞行的时间; Ψ_0 为姿态指向误差; f_i 、 Ψ_{mi} 、 ϕ_i 分别为姿态抖动第 i 个谐波分量的频率、幅度和初始相位。

2.2 噪声模型

目前国内外广泛应用的星敏感器器件为 CCD 敏感器, CCD 器件本身有转移噪声、输出噪声、暗电流噪声和散粒噪声等^[7-8]。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降到很低水平, 模拟中不予考虑。而暗电流噪声和散粒噪声主要与温度有关, 均属于白噪声。文中采用高斯分布随机数发生器生成噪声:

$$N_A = \text{RandomG}(0, \sigma_A^2) \quad (5)$$

RandomG 产生服从高斯分布的随机数, 均值为 0, 方差为 σ_A^2 。

2.3 地球模型

对在低轨道上运行的监视卫星而言, 地球的张角达 85° 左右, 不但会遮挡掉一部分恒星, 其本身的辐照也会影响星敏感器的工作。因为地球是椭球型, 故利用椭圆方程模拟地球进入星敏感器视场的情况, 其表达式如下式:

$$\begin{cases} x = a \times \sin\phi \\ y = b \times \cos\phi \end{cases} \quad (6)$$

式中: a 、 b 为椭圆的长短轴长度; ϕ 为旋转角度。

当地球进入星敏感器视场时, 为了体现其对星敏感器成像产生的辉光效应, 将背景设为亮度为 2.2 的灰白颜色, 使探测器无法对视场内的星点成像, 从而达到模拟地球影响的目的。

2.4 空间目标模型

序列图像中点状运动目标的基本模型^[9]:

$$f(x, y, t, s) = M(t, s) \delta(x - v_x(t, s)t - x_0(s)) \delta(y - v_y(t, s)t - y_0(s)) + n(x, y, t) \quad (7)$$

式中: (x, y) 为空间目标坐标; t 为仿真时间; s 为目标所在位置的参数变量; $M(t, s)$ 为点目标亮度; $(x_0(s), y_0(s))$ 为目标起始点坐标; $(v_x(t, s), v_y(t, s))$ 为目标在 $(x, y)^T$ 处的运动速度; $n(x, y, t)$ 为噪声。

蒙特卡罗方法随机产生一组探测器视场光轴指向, 加入均值为 0, 方差为 0.001 的噪声, 模拟含运动目标的序列星图如图 3 所示。

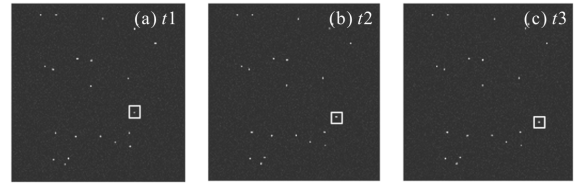


图 3 含运动目标的序列星图

Fig.3 Containing moving target sequence images

3 STK 分析

当观测卫星与空间目标在各自轨道上运动时, 探测器视场可能会受到地光条件、月光条件与日光条件等影响, 致使探测器无法探测到空间目标, 而此时参考文献[2-3]给出的方法仍可模拟得到序列星图, 致使与实际情况不符, 因此, 在星图模拟时必须对空间目标的可见性进行分析。

文中以美国 MSX 卫星为观测卫星, 鑫诺一号卫星(地球同步轨道卫星)为空间目标, 利用 STK 软件对在轨空间目标的可见性进行分析^[10]。首先, 在 STK 中新建一个场景, 设置空间目标和观测卫星的轨道参数, 仿真时间设定为 2013-05-05 12 时 (UTC) 到 2013-05-06 12 时 (UTC), 共计 24 h, 仿真步长为 1 s。取地光条件临界视轴距离地面高度为 135 km, 日光条件与月光条件的临界角分别为 10° 和 8° 。由 STK 分析, 得到目标的可见性分析结果如图 4 所示。

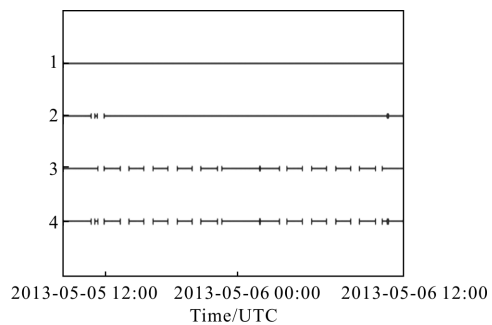


图 4 空间目标的可见性分析结果

Fig.4 Visibility analysis result for space target

图 4 中, 横轴表示时刻, 第一至三行分别为日光条件、月光条件与地光条件可见性分析结果, 第四行是综合考虑以上三种因素得到的目标可见性分析结

果,其中,实线代表可见。由图 4 可知,地球遮挡与地光条件是影响地球同步轨道卫星可见性的最主要因素,每天平均有 7 h 无法探测目标,且 24 h 内探测器进出地球背景的次数多达 32 次;而地影条件与日光条件对于高轨目标的可见性影响较小甚至没有影响。故在此,重点分析地球遮挡对空间目标可见性的判据。

设观测卫星的位置矢量为 S , 探测器视场指向为 $z=(\alpha_0, \delta_0)$, 分别归一化后,得

$$S'=r[S'_x, S'_y, S'_z]^T \quad (8)$$

$$Z=[\cos\alpha_0 \cos\delta_0, \sin\alpha_0 \cos\delta_0, \sin\delta_0]^T \quad (9)$$

式中: r 为卫星到地心距离。

于是有:

$$\cos\phi=S'Z/(|S'|\|Z|)=S'_x Z_x + S'_y Z_y + S'_z Z_z \quad (10)$$

式中: ϕ 为位置矢量 S 与方向矢量 Z 的夹角。

其临界角则有:

$$\sin(\pi-\phi_c)=R/r \quad (11)$$

式中: $R \approx 6400 \text{ km}$ 为地球半径。

因此,探测器视场是否被地球遮挡的判据如下:

$\phi > \phi_c$ 则探测器视场被地球遮挡;

$\phi < \phi_c$ 则探测器视场没被地球遮挡;

当 $\phi = \phi_c$ 则探测器视场被地球遮挡时,探测器视场部分被地球背景遮挡。而此时所拍摄的星图对目标的检测与识别亦具有一定意义。故在此,对其重点分析与模拟仿真。图 5 为地球遮挡临界点示意图。

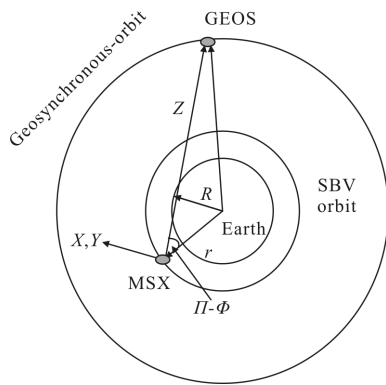


图 5 地球遮挡临界点示意图

Fig.5 Earth background of critical point

由 STK 软件生成在轨目标的轨道预测数据,利用 matlab 程序模拟仿真地球部分遮挡对运动目标可见性的影响。仿真结果如下:

(1) 假设地球部分背景进入星敏感器视场时在未加噪声与抖动影响情况下的仿真星图: 图 6(a)、(b)、(c)分别为运动点目标在不同时刻的模拟序列星图,图(d)为未知目标在整个时间段的运动轨迹。

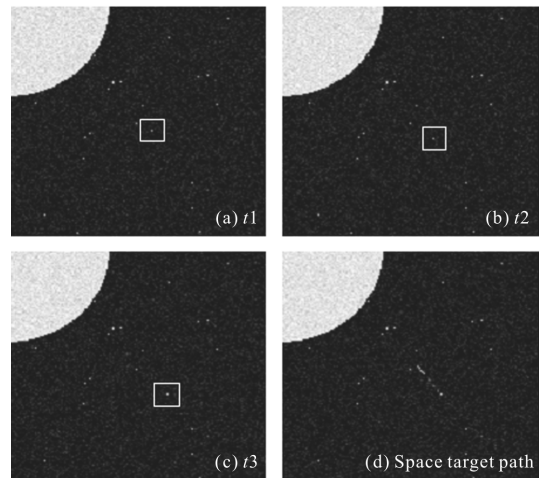


图 6 模拟仿真运动目标的序列星图

Fig.6 Simulation moving target sequence images

(2) 模拟仿真当探测器开始进入地球遮挡区域,地球遮挡对运动目标可见性的影响。图 7 添加了均值为 0,方差为 0.005 的高斯白噪声。

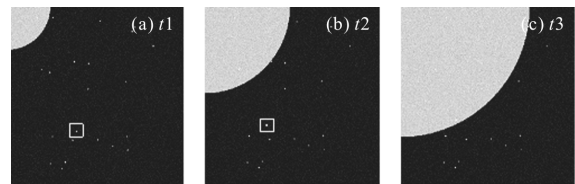


图 7 探测器开始进入地球背景时的模拟序列星图

Fig.7 Simulation sequence images for sensor into the earth background

当探测器开始进入地球背景区域时,空间目标向左上角运动,此时对运动目标不会产生遮挡。随着地球遮挡程度增大,如图 7 所示,在 t_3 时刻时,地球完全遮挡住了目标的运行轨迹,此时,探测器将无法探测到目标,从而无法进行目标识别检测。而一些文献中对点目标的星图模拟未考虑地球遮挡问题,从而导致在仿真模拟中未达到其真实性。

(3) 模拟仿真当探测器开始离开地球背景区域,地球遮挡对运动目标可见性的影响。图 8 添加了均值为 0,方差为 0.005 的高斯白噪声。

如图 8 所示,在 t_1 时刻,运动点目标显示出来,随着探测器视场离开地球背景,运动目标的运动轨

迹越加明显。此时,地球遮挡因素对未知目标的探测不存在任何影响,故在 t_2 时刻之后所产生的星图可以用在目标的检测识别之中。

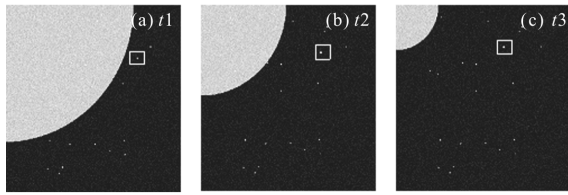


图8 探测器开始离开地球背景时的模拟序列星图

Fig.8 Simulation sequence images for sensor left the earth background

4 结论

基于 STK/matlab 的空间目标仿真方法,能够很好的模拟复杂星空背景下弱小点状运动目标的序列星图。文中在星图仿真的基础上利用 STK 软件对星图中运动目标与地球背景的运动性质进行了系统的分析,特别是探测器进入或离开地球遮挡背景的不同状态,为进一步的空间目标检测与跟踪算法的研究做了充分准备。

文中的工作是在考虑探测器指向限制的情况下,提出空间目标序列星图的仿真方法,可为天基空间目标的检测、跟踪与监视提供较为真实的模拟场景,具有一定的实用意义。

参考文献:

- [1] Grant H Stocks, Curt von Braun, Ramaswamy Sridharam. The space-based visible program [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 1998, 11(2): 205-237.
- [2] Han Yi, Sun Huayan, Li Yingchun, et al. Simulation of space-based optical measurement serial iamges [J]. *Optical Technique*, 2010, 36(1): 93-97. (in Chinese)
韩意, 孙华燕, 李迎春, 等. 空间目标天基光学观测的序列图像仿真方法 [J]. *光学技术*, 2010, 36(1): 93-97.
- [3] Guo Ming, Wang Xuewei. IR modeling and simulation of space target/star and space environment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(3): 399-404. (in Chinese)
郭明, 王学伟. 空间目标/星空背景红外建模与仿真 [J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(3): 399-404.
- [4] Liu Fucheng, Liu Zhaohui, Liu Wen. A research on navigation star catalog selection algorithm based on SVM [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 706-708: 613-617.
- [5] Zhang Guangjun. Star Identification [M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 2011: 43-46. (in Chinese)
张广军. 星图识别[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 43-46.
- [6] Chen Jie, Zhou Yinqing, Li Chunsheng, et al. Relationship between satellite attitude jitter and SAR imaging quality [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2001, 27(5): 518-521. (in Chinese)
陈杰, 周荫清, 李春升, 等. 卫星姿态指向抖动与 SAR 成像质量关系研究 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2001, 27(5): 518-521.
- [7] Cohen M, David J P. Radiation effects on active pixel sensors [C]//Conf on Radiation and Its Effects on Components and Systems, 1999: 450-456.
- [8] Cohen M, David J P. Radiation-induced dark current in CMOS active pixel sensors [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2000, 47(6): 2485-2491
- [9] Chen Ying. Study on detection and tracking dim point moving target from image sequences [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2003. (in Chinese)
陈颖. 序列图像中微弱点状运动目标检测及跟踪技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2003.
- [10] Yang Ying, Wang Qi. STK in the Application of Computer Simulation [M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 2005. (in Chinese)
杨颖, 王琦. STK 在计算机仿真中的应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.