

doi: 10.3788/gzxb20164510.1012002

# 地基光电望远镜对空间碎片探测能力的评估模型

胡静静<sup>1,2</sup>, 刘静<sup>1</sup>, 崔双星<sup>1</sup>, 张耀<sup>1</sup>, 程昊文<sup>1</sup>, 吴相彬<sup>1</sup>

(1 中国科学院国家天文台, 北京 100012)

(2 中国科学院大学, 北京 100012)

**摘要:** 为了提高地基光电望远镜观测空间碎片的运行效率, 建立了地基光电望远镜探测能力评估仿真模型. 综合考虑碎片几何过境、碎片信号辐射量、背景源信号辐射量、光信号在传感器平面的投影等影响, 获得碎片信号的探测信噪比, 并作为过境碎片能否被探测到的依据. 采用 1m 望远镜进行地球同步轨道碎片观测实验, 并对模型进行验证. 结果表明: 仿真观测的第谷 2 星表中 4 颗背景亮星与观测实验结果一致; 由于碎片形状等光学特性不同, 碎片辐射量星等值的实验值与仿真值最大相差 1.58 倍, 误差值在合理范围内. 基于信噪比探测原理的地基光电望远镜探测能力评估仿真模型合理有效, 可为观测设备建设、观测策略制定等提供参考.

**关键词:** 空间碎片; 光电望远镜; 探测能力评估; 信号辐射量; 探测信噪比

中图分类号: P12

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)10-1012002-6

## Evaluation Model of Detected Ability for Ground-based Electro-optic Telescope to Space Debris

HU Jing-jing<sup>1,2</sup>, LIU Jing<sup>1</sup>, CUI Shuang-xing<sup>1</sup>, ZHANG Yao<sup>1</sup>, CHENG Hao-wen<sup>1</sup>, WU Xiang-bin<sup>1</sup>

(1 National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** In order to increase operating efficiency of the ground-based electro-optic telescope for space debris observation, the evaluation model of detected ability for ground-based electro-optic telescope model was constructed. The model concludes geometry crossing of space debris, calculation for signal irradiation of space debris and background source, projecting for source signal to sensor plane, and calculation of detected signal to noise as basis of detectable judgement, etc. Observation test about geostationary earth orbit with 1m telescope was done for modelling verification. The conclusion shows that four background stars in Tycho-2 catalogue crossing field of view in observation test was observed, the number is same with simulation. the maximum difference magnitude for space debris of test compared to simulation was as much as 1.58, and it was mainly due to the feature of debris such as shape, it was with reason. The ground-based electro-optic telescope model based in signal-to-noise detected theory was a reasonable, it can support suggestions for detected device construction, observed strategy design, etc.

**Key words:** Space debris; Electro-optic telescope; Evaluation of detected ability; Signal irradiation; Detected signal-to-noise

**OCIS Codes:** 120.0280; 230.0230; 040.1520; 040.1880; 230.0040; 000.2190

## 0 引言

空间碎片数量日益增多, 严重威胁航天器的在轨运行安全. 望远镜是空间碎片的重要探测手段, 通过观测及数据处理获得碎片的轨道根数, 进行空间碎片危

险交会预警计算, 必要时引导航天器规避机动, 能有效避免航天器碰撞事件的发生. 为了更有效地对空间碎片进行观测, 需要对测站的布局、光电望远镜探测能力、观测策略进行评估. 空间碎片探测设备探测能力评估仿真技术是进行上述各项评估的重要手段.

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(No. 11503044)资助

第一作者: 胡静静(1981-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为望远镜观测空间碎片的效能评估. Email: jinghu@bao.ac.cn

导师(通讯作者): 刘静(1970-), 女, 研究员, 博士, 主要研究方向为空间碎片碰撞预警、空间碎片监测网效能评估系统等. Email: liujing@bao.ac.cn

收稿日期: 2016-04-26; 录用日期: 2016-07-12

<http://www.photon.ac.cn>

光电望远镜最初用于地球同步轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)碎片探测, GEO目标光电探测技术趋于成熟. 目前一些国家陆续进行其它轨道碎片探测技术研究. 为满足研究需求, 需要建立仿真模型进行定量分析. 美国 AGI 公司研制的 STK 软件可以对望远镜过境情况进行模拟; 欧空局的 PROOF 软件可对空间碎片的过境和可探测性进行分析. Nunez 等<sup>[1]</sup>采用反褶积法处理图像, 改善了 GEO 碎片的观测性能. Olmedo 等<sup>[2]</sup>对 GEO 轨道碎片观测的编目能力进行了仿真. Hinze<sup>[3]</sup>等基于两台观测设备, 仿真观测了中地球轨道(Medium Earth Orbit, MEO)碎片, 并给出了初次进行 MEO 观测的结果<sup>[4]</sup>, 进而提出了大偏心率 MEO 的观测策略<sup>[5]</sup>. Vananti<sup>[6]</sup>对低地球轨道(Low Earth Orbit, LEO)目标在不同纬度测站的可见性进行了评估. Herzog<sup>[7]</sup>分析了欧洲两台观测设备进行大面质比碎片观测的策略. Silha<sup>[8]</sup>研究了利用 ESASDT 发现大偏心率 MEO 碎片后, 另外两台设备对该碎片的后续观测策略. Früh<sup>[9]</sup>等对欧洲空间光学监测网任务计划中的碎片选择、探测器的设备参量影响等进行了分析. Olmedo<sup>[10]</sup>等提出了可用于未来欧洲空间态势感知系统的光学策略.

近年来我国对望远镜探测空间碎片的探测能力仿真需求强烈, 但是目前该研究还处于初级阶段, 主要关注探测设备本身的能力<sup>[11-12]</sup>, 还没有形成完整的望远镜探测能力评估仿真系统体系. 本文模拟了地基光电望远镜进行空间碎片观测的整个过程, 建立了碎片跟踪观测仿真的探测能力评估仿真模型, 并通过实测数据对模型进行验证.

## 1 光电望远镜探测能力评估模型

本文研究的望远镜为地平式望远镜, 探测器为电荷耦合元件(Charge-Coupled Device, CCD), 采用跟踪目标模式. 空间碎片能否被探测, 需判断其是否几何过境, 并满足天光地影条件<sup>[13]</sup>. 除了空间碎片的光信号, 望远镜观测中还受到设备本身(如 CCD 的暗流和读出噪声)和背景光源的影响. 根据信噪比计算公式<sup>[14]</sup>, 将碎片信噪比与 CCD 的探测阈值进行比较, 判断经过望远镜视场的空间碎片是否能被探测.

为了对空间碎片的信号进行模拟, 假设碎片为球形, 且服从漫反射. 碎片光学特性的研究还只停留在特定类型的轨道碎片<sup>[15-17]</sup>, 没有形成通用模型, 空间碎片反照率根据统计得到, 取值为 0.175<sup>[18]</sup>. 背景光源分为离散光源和连续光源. 离散光源包括亮星及行星, 通常仅影响其在 CCD 上的投影及投影点周围的一些像素点, 可以看作点光源, 在亮星的仿真中, 利用球面天文学坐标转换关系, 将星表中的恒星坐标转换到地心坐标系中进行仿真模拟. 连续光源包括银河星光、黄道

光、气辉、大气散射月光、其它大气散射光等, 由于影响的像素范围较大, 其反射光近似均匀分布在 CCD 阵列的每个像素上, 一般采用麻省理工大学林肯实验室建立的夜天光背景模型进行仿真<sup>[19]</sup>, 当望远镜测站位置可以进行夜天光拍摄时, 连续光源的信号值也可以直接由实测数据处理获得.

### 1.1 整体计算流程

单个碎片探测性能模型的仿真流程见图 1. 其中, 碎片过境计算主要考虑几何关系, 包括碎片相对望远镜的位置和天光地影关系. 在满足几何过境前提下, 模拟碎片接收的光信号反射到望远镜 CCD 上的光信号辐射量, 由于望远镜观测时不仅接收碎片信号, 还接收背景天光等噪声的光信号, 需要仿真背景光源的信号辐射量, 在此基础上进行信噪比计算, 最后得到碎片的探测时段和探测次数等探测情况.

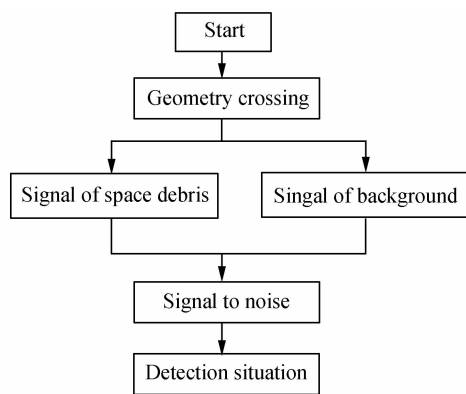


图 1 仿真流程

Fig. 1 Simulation flow chart

### 1.2 过境计算模型

判断碎片是否过望远镜视场是进行观测仿真的第一步. 首先利用碎片的轨道根数计算仿真时刻的碎片位置, 再通过碎片位置与望远镜视线和视场的几何关系判断碎片是否在望远镜视场内, 示意图见图 2.

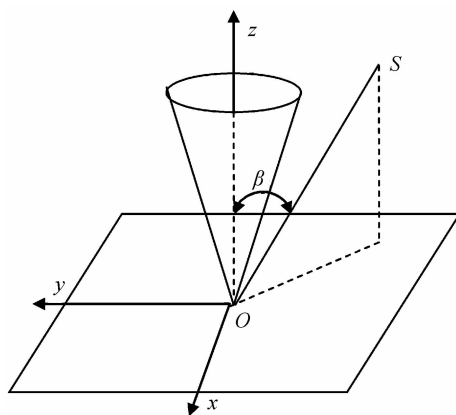


图 2 过境时刻计算示意图

Fig. 2 Calculation of crossing Moment

图 2 中圆锥部分为望远镜的视场,  $z$  轴为视线方向,  $xy$  平面为测站坐标系中垂直于  $z$  轴的平面,  $S$  为空间

间碎片,将  $SOz$  的夹角  $\beta$  与望远镜的  $FOV/2$  (视场的一半) 进行比较,若  $\beta < FOV/2$  则说明碎片在望远镜视场内,可以计算碎片进出视场的时刻.进行轨道预报时采用两行轨道根数 (Two Line Element, TLE) 数据作为仿真的初始轨道数据.采用简化常规/深空摄动模型 (Simplified General/Deep Space Perturbations, SGP/SDP) 进行轨道预报.

在几何过境的基础上,望远镜是否可以探测到碎片,还须满足天光地影条件,即判断碎片是否在太阳的光照区、望远镜设备是否在阴影区.

### 1.3 空间碎片信号辐射量模型

由于空间碎片本身不发光,望远镜通过接收碎片反射的太阳光进行观测,其接收到的光信号由碎片反射面积和相位角决定,反射面的面积与碎片的形状和尺寸有关,相位角为望远镜位置、碎片位置与太阳位置三者之间的夹角.而碎片反射的光信号由于受地球大气层的影响在到达望远镜时会有衰减.望远镜和 CCD 对光信号的影响包括滤波片对波段的限制、量子效率等.由于采用的是地平式望远镜,投影位置的坐标系选择地平坐标系,会产生像场旋转,所以在进行投影时需要对此进行考虑.

CCD 接收到的空间碎片的信号辐射量计算公式为

$$H_t = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot k \cdot E_f \cdot E_{rec} \cdot \frac{r_{obj}^2}{4R_{obj-sensor}^2} \cdot \rho_A [\sin \theta + (\pi - \theta) \cos \theta]$$

式中,  $D$  为望远镜口径;  $k$  为光学系统透过率;  $E_f$  为量子效率和大气传播对信号辐射量传输的影响参量,  $E_{rec} = 1/350$  为太阳常量;  $r_{obj}$  为碎片半径;  $R_{obj-sensor}$  为碎片相对测站的距离;  $\rho_A$  为碎片反照率;  $\theta$  为碎片的相位角.

### 1.4 背景源信号模型

背景光源中的连续光源可看作均匀分布在 CCD 平面上,可用传统的天光背景模型对其信号进行仿真,得到它们在 CCD 像素上的信号辐射量.对于能够得到实测数据的测站,可对当地的实测数据统计得到更加准确连续光源信号值.

背景光源中的离散光源主要包括亮星和行星.亮星部分仿真中的星表选用亮星较多且位置信息比较精确的第谷 2 星表.根据星表的位置信息计算亮星在仿真时刻的位置,同样根据望远镜视线和视场的几何关系判断该亮星是否在望远镜视场内,因此需要将背景亮星的位置由星表坐标系转化到地心坐标系.对经过望远镜视场的亮星在 CCD 平面上进行投影仿真,与碎片在 CCD 上的投影类似,亮星光信号也受地球大气和望远镜 CCD 的影响同样需对投影位置进行像场旋转.

从太阳系质心坐标到地心坐标的转换对恒星位置

的影响为

$$\mathbf{S}^* - \mathbf{S} = \pi \mathbf{S} \times (\mathbf{S} \times \mathbf{R}) - \frac{1}{c} (\mathbf{S} \times \mathbf{R}')$$

式中,  $\mathbf{S}^*$  和  $\mathbf{S}$  分别为从地心和从太阳系质心观测的恒星方向,  $\mathbf{R}$  为从太阳系质心到地心的位移,  $\mathbf{R}'$  为地心相对太阳系的速度,  $c$  为光速.

而 CCD 接收到星等为  $V_{star}$  的恒星的每秒的辐射量  $R_{star}$  为

$$R_{star} = 10^{-0.4 \times 26.7} E_{rec} \cdot E_f \cdot 10^{-0.4 V_{star}}$$

行星的处理方法与亮星类似,但是行星位置通过调用 DE405 历表进行插值运算得到.

### 1.5 点光源在 CCD 上的投影

投影在 CCD 上的空间碎片和亮星均可看作点光源.点光源某一瞬时在望远镜 CCD 上的投影可用几何关系来计算,示意图见图 3.

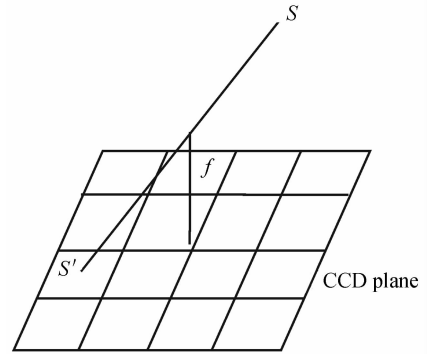


图3 点光源在 CCD 平面上的投影示意图

Fig. 3 Projecting of point source to CCD matrix

其中,  $f$  为望远镜焦距,垂直于 CCD 平面,  $S'$  为点光源  $S$  在 CCD 平面上的投影.

为了得到  $S$  在 CCD 上的坐标  $(x, y)$ ,首先由  $S$  和测站的位置信息得到光源相对测站的赤经赤纬  $(\alpha_{obj}, \delta_{obj})$ ,有

$$\begin{cases} \cos(Z) = \sin(\delta_{LOS}) \sin(\delta_{obj}) + \cos(\delta_{LOS}) \cdot \cos(\delta_{obj}) \cos(\alpha_{obj} - \alpha_{LOS}) \\ \sin(Z) = \sqrt{1 - (\cos(Z))^2} \\ \sin(A) = \cos(\delta_{obj}) \frac{\sin(\alpha_{obj} - \alpha_{LOS})}{\sin(Z)} \\ \cos(A) = \frac{-\cos(\delta_{LOS}) \sin(\delta_{obj}) + \sin(\delta_{LOS}) \cos(\delta_{obj}) \cos(\alpha_{obj} - \alpha_{LOS})}{\sin(Z)} \end{cases}$$

式中,  $Z$  为  $SS'$  方向与 CCD 平面法线方向的夹角,  $A$  为 CCD 平面上的方位角 (从北点开始).  $(\alpha_{LOS}, \delta_{LOS})$  为望远镜视线方向的赤经赤纬,  $f$  为望远镜焦距.于是可以得到  $(x, y)$  的坐标值为

$$\begin{cases} x = -\frac{\sin(Z)}{\cos(Z)} \cdot f \cdot \sin(A) \\ y = \frac{\sin(Z)}{\cos(Z)} \cdot f \cdot \cos(A) \end{cases}$$

由于光的衍射等现象,点光源在 CCD 上呈光斑,通常采用高斯分布的点扩散函数(Point Spread Function, PSF)来描述.对每个象素进行 PSF 仿真的函数算法为

$$\text{PSF}(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \int_{x=0.5y-0.5}^{x+0.5y+0.5} \int_{y=0.5x-0.5}^{y+0.5x+0.5} \exp[-(x-x_0+x_{\text{off}})^2\sigma^{-2} + (y-y_0+y_{\text{off}})^2\sigma^{-2}] dx dy$$

式中,  $(x_0, y_0)$  为投射到 CCD 上的点的中心坐标,  $(x_{\text{off}}, y_{\text{off}})$  为  $(x_0, y_0)$  相对象素的中心位置的偏移量.  $(i, j)$  为像点所在像元的行列数.

### 1.6 探测信噪比计算

判断碎片能否被探测器探测到,需要模拟望远镜 CCD 接收到的光信号,对模拟信噪比和望远镜探测器的探测阈值进行比较.信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)计算公式为

$$\text{SNR} = \frac{S_{\text{obj}}}{\sqrt{S_{\text{obj}} + S_{\text{stars}} + S_{\text{planets}} + S_{\text{back}} + k_{\text{dark}} \cdot t_{\text{int}} + k_{\text{rdout}}^2}}$$

式中  $S_{\text{obj}}$  为过视场的空间碎片辐射量,  $S_{\text{stars}}$  和  $S_{\text{planets}}$  分别为过视场的编目恒星和行星的辐射量,  $S_{\text{back}}$  为夜天光背景,主要包括银河星系、黄道光、气辉、大气散射光的辐射量,  $t_{\text{int}}$  为曝光时间,  $K_{\text{dark}}$  和  $K_{\text{rdout}}$  分别为探测器 CCD 的暗流和读出噪声.

$$\begin{cases} S_{\text{obj}} = \sum \text{PSF}(x, y) \cdot t_{\text{int}} \cdot Ht \\ S_{\text{stars}} = \sum \text{PSF}(x, y) \cdot t_{\text{int}} \cdot R_{\text{star}} \end{cases}$$

## 2 效能评估结果与实际探测结果比对

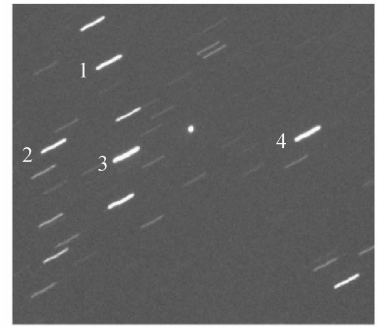
仿真模型的验证分两个方面:模型对碎片与背景光源在望远镜 CCD 上的投影即观测成像验证;模型计算得到的信噪比与实验观测结果的比对.选用国家天文台兴隆 1 m 望远镜作为仿真评估设备,目标选择 GED 碎片 16 667,观测夜为 2014 年 11 月 1 日.

### 2.1 观测成像对比分析

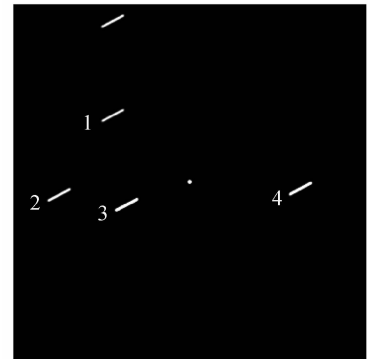
在空间碎片的监测与定轨过程中,望远镜作为主要的探测设备,信噪比反映了设备对碎片的可探测性.利用仿真模型对信噪比进行计算,获得目标的仿真观测图像与真实观测图片及星表中恒星位置对比,结果见图 4.

图 4(b)考虑了像场旋转,如果不进行像场旋转,仿真中背景星的方向与实际观测方向不一致,影响背景星的识别判断.图 4(a)中背景星的数量远大于图 4(b),这是因为仿真选用的背景星星表的原因.由图 4 可以看出,仿真程序基本可以模拟观测中的碎片和背景亮星.由于仿真选用的背景星星表为第谷 2 星表,仅包含 2,539,913 颗银河系中最亮恒星,涵盖了 99% 的 11.0 等以下的恒星、90% 的 11.5 等以下的恒星,而观测实验用的望远镜的极限星等为 16,所以实际观测中的背景星比仿真观测的要多.图 4(c)为 DS9 中 SAO-DSS 资料库提供的相应天区的图像,其中序号 1 到 4

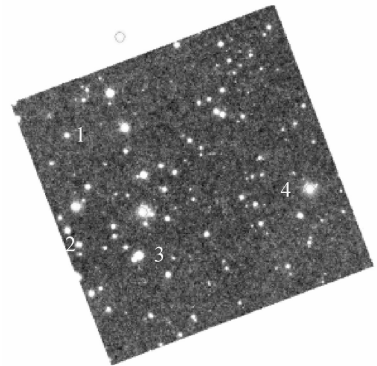
号型为第谷星表的星.图 4(a)、4(b)中的序号 1 到 4 号星与图 4(c)中星表的相应星对应.



(a) Observation pictures



(b) Simulation observation pictures



(c) Star map of this sky coverage

图 4 实测与仿真图像对比

Fig. 4 Image comparison between test and simulation

### 2.2 信噪比结果分析

分别在曝光时间为 5 s、10 s、20 s、30 s 的 4 种条件下,对实测数据与仿真获得的探测信噪比、碎片及背景的信号辐射量进行比较分析.

观测四组(其中曝光时间为 5 s、10 s、20 s 的各观测 10 帧,30 s 的观测 4 帧)共 34 帧图片,将他们的信号值和信噪比与仿真计算进行比较,结果见表 1.其中背景值是气辉、黄道光等连续光源信号值,实验背景值是在当次拍摄的帧图中找一块相对没有亮光源污染的区域求得的平均值;仿真模型中判断碎片能否被探测器探测到的条件是判断碎片信号值大的象素对应的信噪比是否大于探测阈值.仿真模型用 1 m 望远镜的实测数据统计得到背景值的平均值(统计的曝光时间为

5 s,对于其它曝光时间,根据信号与曝光时间的正比关系将信号值归算到 5 s)作为仿真背景值,其它曝光

时间的背景值根据正比关系计算。

表 1 不同曝光时间下实验结果对比  
Table 1 Comparisons of different exposure time

Exposure time	Maximum of observed signal	Maximum of simulated signal	Signal error	Background of observed	Background of simulation	Background error	SNR of observed	SNR of simulation
5	9 551	2 442	2.91	168	162	0.04	96.19	48.07
10	5 409	7 081	0.24	342	324	0.06	70.48	83.33
20	38 164	13 301	1.87	636	648	0.02	193.40	114.73
30	21 162	19 737	0.07	908	972	0.07	142.00	140.00

表 1 中的信号值为均值,即分别对 5 s、10 s、20 s 的各 10 帧图像(及 30 s 的 4 帧图像)求平均得到,另外,误差值以仿真值为基准,即

$$\text{误差值} = |\text{实验值} - \text{仿真值}| / \text{仿真值}$$

由表 1 可知:实验所得的信噪比与仿真结果最大相差 2 倍,均远大于设备的探测阈值,满足碎片对设备的可探测性判断条件;实验背景值和理论背景值最大相差 0.07 倍;碎片信号辐射量的平均值最大相差约 3 倍. 4 组曝光时间下辐射量的变化如图 5(其中,  $t_d$  表示曝光时间),碎片辐射量实验值与仿真值的变化较大,最大相差 4.25 倍(即星等值相差 1.58).

### 3 结论

模拟碎片过境和设备的探测过程,根据信噪比探测原理,对空间碎片在 CCD 上的投影信号进行了仿真,并对背景光源进行了模拟,建立了光电望远镜的探测能力仿真模型. 进行了观测实验,将碎片成像对比图进行比较,模型可以仿真碎片信号与背景离散光源在 CCD 上的投影关系,并通过仿真数据与实测数据的对比,从实测方面确认了模型用信噪比作为判断碎片可探测性判据的可行性和合理性. 基于本文建立的地基光电望远镜的探测能力仿真模型,可以对跟踪碎片进行仿真,指导碎片的实际观测. 同时,该模型可以应用于测站布局、望远镜设备性能参量选择、观测策略制定.

**致谢** 感谢中国科学院国家天文台兴隆观测基地 1 m 望远镜的工作人员对本文观测实验提供的支持和帮助. 感谢中国科学院国家天文台空间碎片预警和应用研究团队李大卫对本文数据处理方面的帮助.

#### 参考文献

- [1] NUNEZ J, NUNEZ A, MONTOJO F, *et al.* Improving space debris detection in GEO ring using image deconvolution [J]. *Advances in Space Research*, 2015, **56**(2): 218-228.
- [2] OLMEDO E, NOMEN J, SANCHEZ N, *et al.* Cataloguing capability of objects in the GEO ring [C]. 60th International Astronautical Congress, Daejeon, Republic of Korea, 2009.
- [3] HINZE A, SCHILDKNECHT T, VANANTI A. Follow-up strategies for MEO observations [C]. 38th Cospar Conference, Bremen, Germany, 2010.
- [4] HINZE A, SCHILDKNECHT T, VANANTIA, *et al.* Results from first space debris survey observations in MEO [C]. European Space Debris Conference, Madrid, Spain, 2011.
- [5] HINZE A, SCHILDKNECHT T, VANANTI A, *et al.* Observations strategies for space debris on highly-eccentric meo orbits [C]. 63th International Astronautical Congress, Naples, Italy, 2012.
- [6] VANANTI A, SCHILDKNECHT T, PINNA G, *et al.* Assessment of possible observation strategy in leo regime [C]. 64th International Astronautical Congress, Beijing, China, 2013.
- [7] HERZOG J, SCHILDKNECHT. Analysis of the long-term area-to-mass ratio variation of space debris [C]. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies conference, Maui, HI, 2012.
- [8] SILHA J, SCHILDKNECHT T, HINZE A. Additional optical

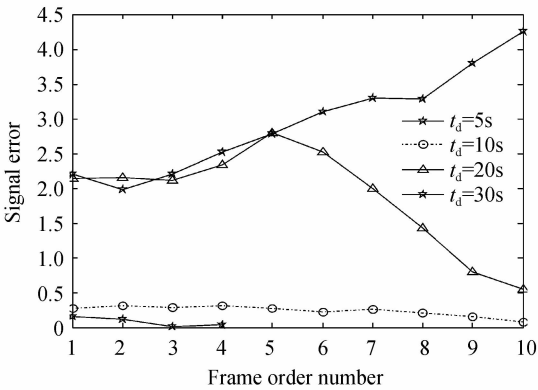


图 5 碎片信号最大值的实验值与仿真值比较

Fig. 5 Comparison of maximum signal of observation test and simulation

由信噪比模型可知信噪比误差来自背景辐射量及碎片辐射量模型与实际观测的差别. 由表 1 可知,实测数据得到的背景值与实验的背景值接近. 碎片信号辐射量的误差主要是因为仿真计算模型将碎片假设为球形,计算的理论值相对稳定,而碎片由于其自身形状、材料、姿态等原因导致信号值的亮度呈现不同的变化趋势. 若将碎片特性对碎片反射信号值的影响统一用反照率来表示,则反照率的变化根据碎片特性不同发生变化,由碎片辐射量计算公式知其与反照率成正比,当碎片特性导致反照率变化比较大时,相应的,碎片的信号值发生较大变化. 综上所述,碎片信号辐射量变化的波动主要为实验观测到得碎片信号值的亮度变化,这个结果在合理的范围之内.

- surveys for space debris on highly eccentric and inclined meo orbits [C]. 65th International Astronautical Congress, Toronto, Canada, 2014.
- [9] FRUH C, SCHILDKNECHTT, HINZE A, *et al.* Optical observation campaign in the framework of the ESA space surveillance system precursor services [C]. European Space Surveillance Conference, Madrid, Spain, 2011.
- [10] OLMEDO E, SANCHEZ N, GUIJARRO N, *et al.* Survey-only optical strategies for cataloguing space debris objects in the future European space surveillance system[J]. *Advances in Space Research*, 2011, **48**(3):535-556.
- [11] CHE Chi-cheng, LI Ying-cai, CHEN Rong-li, *et al.* Research on feasibility of GEO target visual detection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 905-908.  
车驰骋, 李英才, 陈荣利, 等. 地面可见光相机探测静止轨道目标可行性研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(5):905-908.
- [12] ZHANG Yi-hua, YAO Dong-sheng, TAN Bin. Analysis on effect factors of ground-based electro-optic system detection ability on space object [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1178-1182.  
张己化, 姚东升, 谈斌. 地基光电系统空间目标探测影响因素分析[J]. 光学学报, 2008, **28**(6):1178-1182.
- [13] VALLADO D. Fundamentals of astrodynamics and applications, 2007[M]. 3rd ed. Space Technology Library and Microcosm Press, 2007, 279-287.
- [14] GELHAUS J, FLEGEL S, WIEDEMANN C. Program for radar and optical observation forecasting[R]. Final Report, 2011.
- [15] ANDERSON P, SCHAUB H. Methodology for characterizing high-risk orbital debris in the geosynchronous orbit regime [J]. *Advances in Space Research*, 2016, **57**(2): 604-619.
- [16] TANG Yi-jun, JIANG Xiao-jun, WANG Jian-feng, *et al.* Diffuse reflection optical characteristics of three-axis stabilization GEO Satellite[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2863-2866.  
唐轶峻, 姜晓军, 王建峰, 等. 三轴稳定 GEO 卫星漫反射光变特性[J]. 光子学报, 2009, **38**(11):2863-2866.
- [17] XU Rong, ZHAO Fei, LIU Huai-feng, *et al.* Parallel measurement of spectral bidirectional reflectance distribution function of non-resolved space objects in laboratory[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(11):0212002.  
徐融, 赵飞, 李怀峰, 等. 非分辨空间目标光谱双向反射分布函数的实验室平行测量[J]. 光子学报, 2016, **45**(11): 0212002.
- [18] MULROONEY M, MATNEY M, HEJDUK M, *et al.* An investigation of global albedo values [C]. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies conference, Maui, HI, 2008.
- [19] DANIELS M. A night sky model for satellite search systems [J]. *Optical Engineering*, 1977, **16**(1):66-71.