

空间目标可视条件与可见光特性分析

何武灿, 廖守亿, 张作宇, 苏德伦, 张合新

(第二炮兵工程大学, 西安 710025)

摘要: 基于空间目标、天基观测站和太阳的几何位置关系与 CCD 探测系统性能, 研究了空间目标相对于观测站的可视条件, 基于双向反射分布函数研究了空间目标的可见光特性。以卫星为例, 根据卫星的轨道参数、几何参数和表面材料特性以及探测系统性能参数, 基于 STK/Matlab 仿真分析了不同观测站观测卫星的可视条件和可见光特性。仿真结果表明, 卫星的可见光特性受多种因素的影响, CCD 探测系统性能对卫星相对于观测站的可视性影响不可忽略。

关键词: 空间目标; 可视条件; 可见光特性; 双向反射分布函数

中图分类号: V271.4; O436.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)05-0097-06

Analysis of Visible Conditions and Visible-Light Characteristics of Space Targets

HE Wu-can, LIAO Shou-yi, ZHANG Zuo-yu, SU De-lun, ZHANG He-xin

(The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: Based on the geometric position relations of space target, space-based observation station and the sun, as well as the CCD detection system performance, the visible conditions of space target relative to observation station is studied, and the visible-light characteristics of space target is also studied on the basis of bidirectional reflection distribution function (BRDF). Taking satellite as an example, according to the orbital parameters, geometrical parameters and surface material properties of satellite, as well as detection system performance parameters, a simulation analysis was made based on STK/Matlab for the visible conditions and visible-light characteristics of different observation stations in satellite observing. The simulation results show that the visible-light conditions of satellite may be affected by various factors, and the CCD detection system performance has significant influence on the visibility of satellite relative to observation station.

Key words: space target; visible conditions; visible-light characteristics; BRDF

0 引言

在现代空间对抗技术领域, 掌握空间目标的运行状态是进行空间对抗的基础^[1], 这就涉及到对空间目标进行探测跟踪定位。光学探测跟踪系统具有精度高、探测距离远的优点, 成为对空间目标进行探测的重要方式^[2]。

天基观测站是否可以探测到空间目标, 即判断空间目标相对于天基观测站是否可视, 是对空间目标进行光学探测的条件, 国内很多学者从空间目标、天基观测站和太阳的相对几何位置出发, 研究了空间目标相对于观测站的可视条件^[3-5], 但忽略了 CCD 探测系统

性能的影响。空间目标主要依靠表面来反射可见光, 基于粗糙表面漫反射^[6]或双向反射分布函数^[7-8]描述空间目标表面可见光特性, 是普遍使用的研究方法, 相比之下, 双向反射分布函数更能反映空间目标表面材料的真实反射特性。

本文从几何可见、光学可见和设备可见 3 个方面出发, 讨论了空间目标在天基可见光 CCD 探测系统中的可视条件, 并基于双向反射分布函数对在轨空间目标的可见光特性进行了分析。

1 空间目标的可视条件

通过天基可见光 CCD 探测系统观测空间目标, 需要判断目标相对于观测站是否可视, 主要从几何可见、光学可见和设备可见 3 个方面进行讨论。

如图 1 所示, 设太阳的地心矢量为 r_s , 目标的地心

矢量为 r_o ,观测站的地心矢量为 r_p ,目标相对于太阳的矢量为 r_{os} ,目标相对于测地站的矢量为 r_{op} ,观测站相对于太阳的矢量为 r_{ps} 。

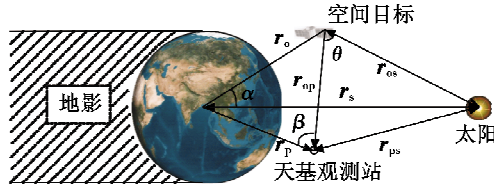


图1 空间目标、地球、天基观测站和太阳之间的几何位置关系

Fig.1 Geometrical relationship among the space target, the earth, the space-based observation station and the sun

1.1 几何可见

天基观测站与目标之间的连线如果受到地球的遮挡,两者之间无法实现视通,即天基观测站无法探测到空间目标。目标的地心矢量 r_o 和目标相对于测地站的矢量 r_{op} 的夹角为 β ,则应满足以下条件

$$\cos \beta < \sqrt{r_p^2 - R_E^2} / |r_p| \quad (1)$$

即

$$r_p \cdot r_{op} < |r_{op}| \sqrt{r_p^2 - R_E^2} \quad (2)$$

1.2 光学可见

光学可见是指观测站对空间目标的观测必须避开太阳背景,以及空间目标不出现于地影中,从而确保目标反射的太阳光线可以被观测站探测系统捕捉,此处暂不考虑月球的影响。

地影近似成圆柱体,如果目标进入地球的地影中,且没有受到太阳光的照射,探测系统则无法探测到目标。目标的地心矢量 r_o 与太阳的地心矢量 r_s 的夹角为 α ,由于 $0 \leq \alpha \leq \pi$,则应满足^[3]

$$\cos \alpha > \sqrt{r_o^2 - R_E^2} / |r_o| \quad (3)$$

即

$$r_o \cdot r_s > -|r_s| \sqrt{r_o^2 - R_E^2} \quad (4)$$

式中, $R_E = 6378.140 \text{ km}$ 。

由于太阳光辐射很强,如果目标在太阳的视圆面上及其附近区域,则影响对目标的观测。目标相对于测地站的矢量 r_{op} 与太阳相对于观测站的矢量 r_{sp} 之间的夹角为 θ ,则应满足以下条件^[9]

$$\theta > \theta_s \quad (5)$$

式中, θ_s 为太阳的视半径与光散射角之和,是临界角,且 $0 \leq \theta \leq \pi$,则必须满足

$$r_{op} \cdot r_{sp} < |r_{op}| |r_{sp}| \cos \theta_s \quad (6)$$

1.3 设备可见

天基 CCD 探测系统有一定的探测极限,从能量角

度分析,如果目标可见光信号强度满足探测器的最小探测阈值,CCD 探测系统即可探测到目标。

相机入瞳处的光能经过光学系统传输后被相机 CCD 器件接收并转化为电子输出,在相机探测时间(即积分时间)内,CCD 输出信号电子数为

$$N_s = \varphi_m A \eta t \tau \quad (7)$$

式中: φ_m 为信号光子通量; A 为接收器通光口径面积; η 为探测器对目标光谱的量子效率; t 为积分时间; τ 为光学系统对目标信号的透过率。

不同的信噪比对应不同的探测率和虚警率,信噪比计算公式为

$$R_{s,N} = N_s / \sqrt{N_s + N_D \cdot t + N_R^2} \quad (8)$$

式中: N_s 为信号电子数; N_D 为暗信号电子数; N_R 为读出噪声电子数。

为保证系统探测概率大于 0.99,信噪比应大于 5^[10]。同时,万敏等人经过研究发现:在选取探测器系统视场时,应满足目标像所占像素不小于 2×2 ,并且确保 CCD 不饱和但接近饱和^[11],因此,为达到系统探测极限,目标成像在 4 个像素上,目标信号在每个像素上的信号光子流是总光子流的 1/4,则达到系统探测极限时系统的信噪比可写为

$$R_{s,N} = \varphi_m A \eta t \tau / (4 \sqrt{\varphi_m A \eta t \tau + N_D \cdot t + N_R^2}) \quad (9)$$

零等星的平均光子通量为 $\varphi_0 = 5 \times 10^{10} \text{ photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,则 M 等星的光子通量为

$$\varphi_M = \varphi_0 (2.512)^{-M} \quad (10)$$

探测器所能达到的探测极限值就是信噪比等于 5 时,目标所对应的星等值,即

$$M = \lg(R_{s,N,0}/5) / \lg 2.512 = 2.512 \lg \left(\frac{\varphi_0 A \eta t \tau}{20 \sqrt{\varphi_0 A \eta t \tau + N_D \cdot t + N_R^2}} \right) \quad (11)$$

2 空间目标可见光反射特性建模

2.1 背景辐射模型

空间目标是非自发光体,依靠反射其他光源而产生亮度,如图 2 所示,空间目标的背景光源主要包括直接入射的太阳光和地球及大气散射到目标表面的太阳光。

分析目标的可见光特性需要研究太阳可见光波段 ($0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$) 在目标表面的光谱特性,根据普朗克黑体辐射公式,把太阳考虑成一个温度为 5900 K 的辐射黑体,在波长范围内,太阳光的光谱辐射出射度及太阳光辐射到地球表面的光谱辐照度分别为

$$M(\lambda) = c_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda^{-5} [\exp(c_2/\lambda T) - 1]^{-1} d\lambda \quad (12)$$

$$E_{\text{sun}}(\lambda) = R_{\text{sun}}^2 M(\lambda) / \lambda_v^2 \quad (13)$$

式中: λ 为波长; $c_1 = 3.742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4$,为第

—黑体辐射常数; $c_2 = 14\,388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$, 为第二黑体辐射常数; 绝对温度 $T = 5\,900 \text{ K}$; $R_{\text{sun}} = 6.9599 \times 10^8 \text{ m}$, 为太阳半径; A_e 为日-地间距。

地球本身不发光, 主要依靠反射太阳光而产生亮度。可假设地球是一个对太阳辐射的反射遵守朗伯特定律, 且反射光谱与太阳光谱相同的漫反射体, 其反射率可用地球的平均反射率 $\rho = 0.35$ 来表示^[8]。

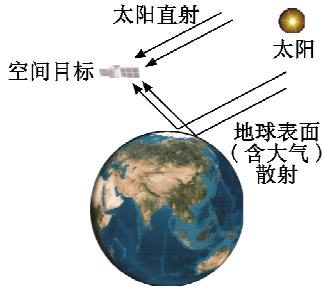


图 2 空间目标的光学背景

Fig. 2 The optical background of space target

2.2 双向反射分布函数

双向反射分布函数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)^[12] 是对目标表面光反射特性进行描述的函数。

如图 3 所示, θ_i, φ_i 为入射光的入射角和方位角, θ_r, φ_r 为反射光的反射角和方位角, 本文中即为探测器的观测角, BRDF 函数的数学表达式为

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (14)$$

式中: L_r 为面元 dA 经照射后在 (θ_r, φ_r) 方向上的辐亮度; E_i 为 (θ_i, φ_i) 方向上入射光产生的表面辐照度; f_r 为沿着 (θ_r, φ_r) 方向出射的辐亮度与 (θ_i, φ_i) 方向入射在被测表面产生的辐照度之比。

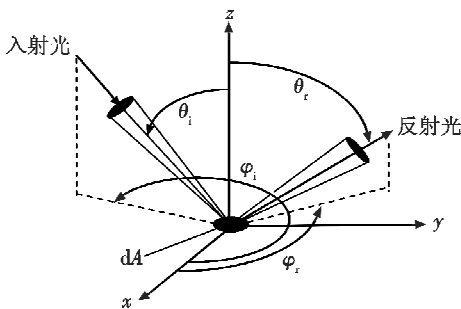


图 3 双向反射分布函数定义

Fig. 3 The definition of bidirectional reflectance distribution function

Davies 模型考虑了目标表面状况并结合实际光照环境, 用于描述空间目标表面的 BRDF 比较合适^[13]。该模型的适用条件为 $\sigma/(a \cos \theta_i) < 0.2$ 且 $\sigma/\lambda < 2^\circ$, 入射角大于 2° , 其 BRDF 的表达式为

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{\rho_{\text{obs}}(\theta_i)}{\cos \theta_i \cos \theta_r} \pi^3 \cdot (a/\lambda)^2 (\sigma/\lambda)^2 \cdot$$

$$(\cos \theta_i + \cos \theta_r)^4 \times \exp\{- (\pi a/\lambda)^2 [\sin^2 \theta_i + \sin^2 \theta_r + 2 \sin \theta_i \sin \theta_r \cos(\varphi_i - \varphi_r)]\} \quad (15)$$

式中: ρ_{obs} 为反射率; σ 为表面粗糙度均方根; a 为表面自相关长度。

2.3 空间目标可见光特性建模

空间目标在探测器入瞳处产生的辐照度可以用来描述目标的可见光特性。考虑到目标与太阳的距离, 可以把太阳光当作平行光, 结合 BRDF 函数定义, 把目标表面分成若干面元, 对目标整个可视表面进行积分, 即可得目标表面反射太阳直射光在探测器入瞳处产生的辐照度^[8]为

$$E_{\text{sun}} = \iint \frac{f_r E_{\text{sun}}(\lambda) \cos \theta \cos \theta'}{R^2} d\lambda dA \quad (16)$$

式中: θ, θ' 分别为太阳光方向、探测器观测方向与目标表面元法线方向的夹角; f_r 为目标表面面元 dA 的双向反射分布函数; R 为目标与探测器之间的距离。

同样, 可得目标对地球及其大气反射的太阳光在探测器入瞳处产生的辐照度为

$$E_{\text{earth}} = \iint \frac{E_{\text{sun}}(\lambda) \tilde{f}_r \rho \cos \tilde{\theta} \cos \tilde{\theta}'}{R^2} d\lambda dA \quad (17)$$

式中: $\tilde{\theta}$ 为地球及大气反射的太阳光方向与目标面元的法线方向的夹角; $\tilde{\theta}'$ 为探测器观测方向与目标面元的法线方向的夹角。则空间目标反射背景光源在探测器处产生的辐照度为

$$E = E_{\text{sun}} + E_{\text{earth}} \quad (18)$$

3 仿真试验与结果分析

本文以人造地球卫星为例, 研究空间目标的可视条件和可见光特性。由卫星的轨道参数, 通过卫星工具包 (Satellite Tool Kit, STK) 软件可以得到所需要的位置角度信息, 结合卫星材料参数、几何参数以及探测系统参数, 根据上文对空间目标可视条件和可见光特性的分析, 完成仿真过程, 其流程如图 4 所示。

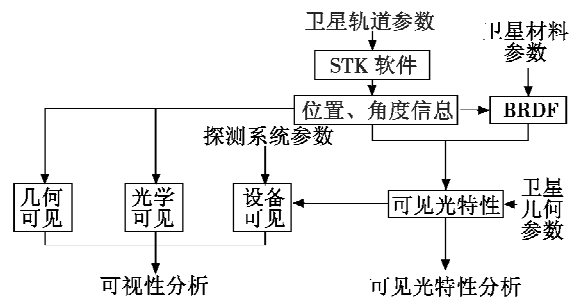


图 4 卫星可视条件与可见光特性分析流程

Fig. 4 Process of analysis of visible conditions and optical characteristics on space target

3.1 参数设置

1) 卫星几何参数。

以美国试验卫星 Mightysat 为例,卫星主体为长方形,采用双翼太阳能帆板。为了接近实际卫星几何形状,设定目标本体的尺寸为 4 m×4 m×5 m,太阳能帆板展开后尺寸为 4 m×14 m。

2) 卫星材料参数。

目标主体材料为铝,表面均方根粗糙度 $\sigma = 0.2 \mu\text{m}$,表面自相关长度 $a_L = 5.89 \mu\text{m}$,反射率 $\rho = 0.81$,太阳能帆板材料为电池片,表面均方根粗糙度 $\sigma = 0.05 \mu\text{m}$,表面自相关长度 $a_L = 2.0 \mu\text{m}$,反射率 $\rho = 0.3$ 。

在给定表面材料特性的情况下,假设反射角 45° ,反射方位角 120° ,入射方位角 300° ,图 5 给出了卫星主体和太阳能帆板的 BRDF 与波长及入射角的关系。

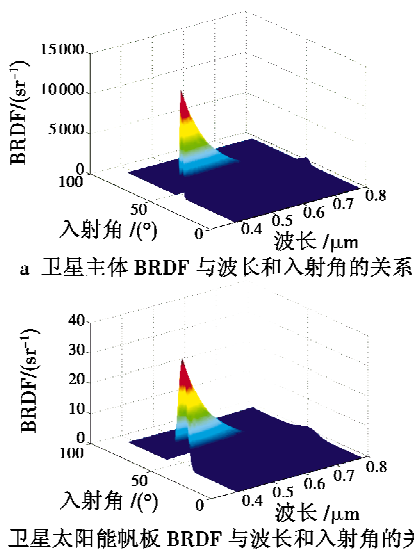


图 5 卫星表面 BRDF 与波长及入射角的关系

Fig. 5 The relationship among satellite's surface's BRDF, the wavelength and the incident angle

3) 卫星轨道参数。

卫星的轨道参数如表 1 所示。

表 1 卫星轨道参数

Table 1 Orbital elements of satellite

参数	椭圆轨道的长半轴 a/km	偏心率 e	卫星轨道倾角 $i/(\circ)$	卫星升交点赤经 $\Omega/(\circ)$	近地点幅角 $\omega/(\circ)$	真近点角 $f/(\circ)$
数值	6959.64	0.0143	97.2	319	30	40

4) 探测系统参数。

对于特定的探测系统,其通光面积、量子效率等参数是固定的,而积分时间可根据具体时间进行调节。计算时假定:观测站使用同种探测系统,用 12 位的 CCD 探测器探测,其饱和光子数为 $45000^{[14]}$,CCD 入瞳口径为 6.43 cm,具有 1024×1024 个像元阵列,透过率为 0.916,平均量子效率为 0.5,积分时间为 0.266 s,理论计算 250 K 时,噪声电子仅 $1e$,考虑其他因素影响,

暗信号电子数取为 $250e$,读出噪声电子数取为 $2e$ 。

3.2 基于 STK/Matlab 的仿真分析

对于卫星可视条件以及可见光特性的研究是建立在太阳、卫星以及天基观测站之间时空关系上的,这些时空关系可以通过 STK 得到。STK 包含复杂的数学算法,可以快速而准确地确定空间运动目标以世界协调时间(UTC)作为计时标准,在 J2000.0 轨道坐标系的任意时刻的位置矢量,还可以得到各目标的方位、俯仰和距离信息等,STK 的几何向量工具可以提供更多的角度信息。具体步骤如下:

- 1) 直接装载轨道数据,或者建立卫星轨道模型;
- 2) 设定观测时间和天基观测站的经纬度高度等信息;
- 3) 基于 STK 几何向量工具,建立各目标之间的向量,并据此描述各向量之间的夹角;
- 4) 基于 STK 的 Report 工具制作报表,主要包括在观测时刻,各目标的位置信息以及各目标之间的相对角度信息等;
- 5) 利用 Matlab 建立卫星可视性条件以及可见光特性分析模型,导入 STK 报表数据进行仿真计算。

3.3 仿真过程及结果分析

仿真时刻为 2014 年 5 月 1 日 10:00(UTC),在 STK 上演示卫星实时运行情况,如图 6 所示。

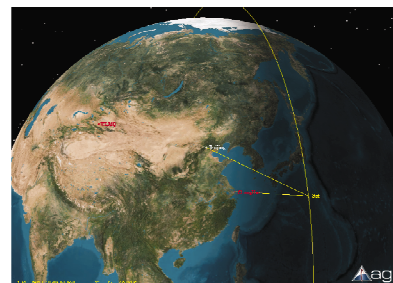


图 6 STK 演示卫星实时运行

Fig. 6 Demo satellite real-time operation by STK

通过 STK 得到天基观测站、卫星以及太阳之间时空关系如表 2 所示。

表 2 天基观测站、卫星和太阳的相对位置角度信息

Table 2 The relative position and angle information among space-based observation station, satellite and the sun

	观测站名称		
	乌鲁木齐上空	北京上空	上海上空
位置	87°6'E,43°8'N, 116°2'E,39°5'N, 121°4'E,31°2'N,		
	200 km	200 km	200 km
太阳天顶角	57°9'	78°7'	84°0'
太阳方位角	258°47'	279°53'	284°3'
卫星天顶角		69°4'	66°5'
卫星方位角		124°9'	103°4'

此时,卫星在地心 J2000.0 惯性坐标系中的位置矢

量为(-4949.023321 m, 3690.587428 m, 3326.174398 m), 太阳的位置矢量为(114183119.406889 m, 90282256.386835 m, 39136306.018980 m)。

由STK运行情况可知,卫星在2014年5月1日10:00(UTC)处于太阳光照区,式(5)中临界角 θ_c 设为 5° ,在3个天基观测站观测卫星,卫星不在太阳的视圆面上及其附近区域,即满足光学可见条件。但在乌鲁木齐上空观测站,由于地球的遮挡,观测站和卫星之间无法形成通视,即不满足可视条件中的几何条件,无法实现对卫星的观测。

在北京和上海上空观测站观测卫星,满足几何条件和光学条件,整个卫星可视表面在两观测站探测器入瞳处产生的辐照度如图7所示。

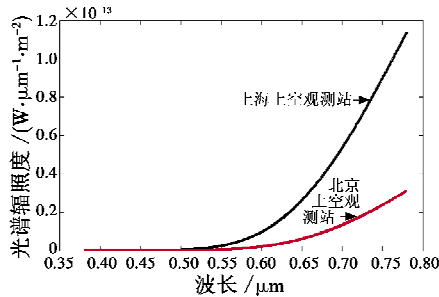


图7 探测器入瞳处光谱辐照度

Fig.7 Irradiance of the pupil of sensors

根据目视星等计算式,即

$$m = 2.5 \lg(E_{\text{sun}}/E) + m_{\text{sun}} \quad (19)$$

式中, $m_{\text{sun}} = -26.7$ 。在上海上空观测站观测卫星,得到卫星目视等效星等为5.4;在北京上空观测站观测卫星,得到卫星目视等效星等为6.9。人的肉眼能够看到的最暗的星等是6等星,根据设定的CCD探测系统参数,可以得到CCD探测系统可探测的极限星等为6.62,因此,在北京上空观测站利用CCD探测设备无法观测到卫星,在上海上空观测站可以顺利实现对卫星的观测。

通过以上仿真过程,可得如下结论:

- 1) 在入射角为 45° 时, BRDF取得最大值;
- 2) 太阳能帆板表面的BRDF比卫星主体表面的低很多,这符合卫星设计时材料选择的初衷;
- 3) 光谱辐照度随着波长的增大而增大,是卫星主体和太阳能帆板共同作用的结果;
- 4) 对空间目标可视条件的分析不仅要目标、天基观测站和太阳的几何位置关系出发,探测器性能同样影响目标的可视性;
- 5) 在同一时刻不同观测站观测卫星,其反射特性有很大差别,这与可见光的入射角、反射角以及观测站与卫星的距离等因素有关。

4 结束语

本文从空间目标、天基观测站和太阳之间的相对几何位置关系以及天基CCD成像系统性能出发,研究了空间目标可视条件,包括几何可见、光学可见和设备可见,基于BRDF对空间表面的可见光特性进行了研究,对同一时间不同观测站观测卫星的可视性和可见光特性进行了仿真。仿真结果表明,CCD成像系统性能对卫星相对于观测站的可视条件的影响不可忽略,卫星的可见光特性受诸如卫星的结构、姿态、表面材料特性、光照条件等多种因素的共同影响。本文的仿真分析可为空间目标探测与识别提供参考依据。

参考文献

- [1] 周彦平,卢春莲,杨莉莉,等.空间目标可见光反射特性的研究[J].哈尔滨工业大学学报,2010,42(11):1716-1719. (ZHOU Y P, LU C L, YANG L L, et al. Visible light reflection characteristics of space target [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(11): 1716-1719.)
- [2] 李玉波,路远,凌永顺.卫星光学特征及其隐身初探[J].光电技术与信息,2004,17(4):63-65. (LI Y B, LU Y, LING Y S. Research on optical characteristics of satellites and camouflage [J]. Optoelectronic Technology & Information, 2004, 17(4): 63-65.)
- [3] 桑思武,许尤楠,刘艳华,等.空间碎片天基光电光学可见条件与预报[J].天文研究与技术,2006,3(3):271-274. (SANG S W, XU Y N, LIU Y H, et al. Visible condition and prediction of the space debris with space-based photoelectricity [J]. Astronomical Research & Technology, 2006, 3(3): 271-274.)
- [4] 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 based on space-based optics observation [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2007, 26(3): 5-12.)
- [5] 张科科,阮宁娟,傅丹鹰,等.天基对静止轨道空间目标可见光探测的几何位置分析[J].红外与激光工程,2007,36(s):606-609. (ZHANG K K, RUAN N J, FU D Y, et al. Research on space-based visible detecting geometry [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(s): 606-609.)
- [6] 刘建斌,吴健.空间目标的光散射研究[J].宇航学报,2006,27(4):802-805. (LIU J B, WU J. Light scattering of spatial target [J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(4): 802-805.)

- [7] 张伟,汪洪源,王治乐,等. 空间目标可见光散射特性建模方法研究[J]. 光子学报,2008,37(12):2462-2467. (ZHANG W, WANG H Y, WANG Z L, et al. Modeling method for visible scattering properties of space target[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(12):2462-2467.)
- [8] 吴英,杨玲,范剑英,等. 空间目标的可见光散射特性建模与仿真研究[J]. 哈尔滨理工大学学报,2009,14(2):82-85. (WU Y, YANG L, FAN J Y, et al. A method of modeling spatial object's visible-light scattering characteristic[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2009, 14(2):82-85.)
- [9] 蓝朝桢,李建胜,马赛金,等. 在轨目标天基光学观测可见性预报与分析[J]. 光电工程,2008,35(12):23-27. (LAN C Z, LI J S, MA S J, et al. Prediction and analysis of orbital target's visibility based on space-based optics observation[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(12):23-27.)
- [10] 陈荣利,韩乐,车驰骋,等. 非自发光空间目标的可见光探测技术研究[J]. 光子学报,2005,34(9):1438-1440. (CHEN R L, HAN L, CHE C C, et al. Research on un-illuminant space target visual detection technique [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(9):1438-1440.)
- [11] 万敏,苏毅,杨锐,等. 提高白天观测星体信噪比的方法研究[J]. 强激光与粒子束,2003,15(12):1151-1154. (WAN M, SU Y, YANG R, et al. Improvement of signal to noise ratio in astronomical objects detection in daytime[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(12):1151-1154.)
- [12] NICODEMUS F E. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity [J]. Applied Optics, 1970, 9(6):1474-1475.
- [13] 孙成明,张伟,王治乐. 双向反射分布函数在空间目标可见光反射特性建模中的应用[J]. 光学技术,2008,34(5):750-753,757. (SUN C M, ZHANG W, WANG Z L. Application of BRDF for modeling on the visible reflection characteristics of spatial targets [J]. Optical Technique, 2008, 34(5):750-753, 757.)
- [14] DIETZ K L, RAMSEY B D, ALEXANDER C D, et al. Daytime aspect camera for balloon altitudes[J]. Optical Engineering, 2002, 41(10):2641-2651.

(上接第 79 页)

由表 1 统计情况可以看出,实时目标侦测精度小于 0.26 m。

5 结束语

借鉴航空测绘领域的技术^[9],将 POS 辅助图像定位技术应用于海监取证系统,可以大大增加海监取证系统的实用性,可独立对观测场景中的目标进行无源定位,实时获得目标的经纬度信息。

参 考 文 献

- [1] 娄树理,杨增胜,周晓东. 无人机光电侦察、监视技术研究[J]. 航天电子对抗,2007,23(2):28-30. (LOU S L, YANG Z S, ZHOU X D. UAV electro-optical reconnaissance and surveillance technology [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2007, 23(2):28-30.)
- [2] 李德仁,王树根,周月琴. 摄影测量与遥感概论[M]. 北京:测绘出版社,2008. (LI D R, WANG S G, ZHOU Y Q. An introduction to photogrammetry and remote sensing[M]. Beijing: The Publishing House of Surveying and Mapping, 2008.)
- [3] 王春祥,李晓,盛庆伟. 航空摄影测量学[M]. 郑州:黄河水利出版社,2011. (WANG C X, LI X, SHENG Q W. Aero photogrammetry [M]. Zhengzhou: The Yellow River Conservancy Press, 2011.)
- [4] JUCIUS D, GRYBAS I, GRIGALIUNAS V, et al. UV imprint fabrication of polymeric scales for optical rotary encoders [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 56:107-113.
- [5] AVITZOUR D. Stochastic simulation Bayesian approach to multi-target tracking [J]. IEEE Proceedings Radar Sonar and Navigation, 1995, 142(2):41-42.
- [6] ZUMBERGE J F, HEFLIN M B, JEFFERSON D C, et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(B3):5005-5017.
- [7] KOUBA J, HEROUX P. Precise point positioning using IGS orbit and clock products [J]. GPS Solutions, 2001, 5(2):12-28.
- [8] BARBER D B, REDDING J D, MCLAIN T W, et al. Vision-based target geo-location using a fixed-wing miniature air vehicle [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2006, 47(4):361-382.
- [9] ZUMBERGE J F, WATKINS M M, WEBB F H. Characteristics and application of precise GPS clock solution every 30 seconds [J]. Journal of Navigation, 1998, 44(4):449-456.