

姿态变化对星载光电成像系统探测能力的影响

杨 露 牛燕雄 吕建明 张 颖 刘雯文 李建平 牛海莎

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要 为研究卫星目标姿态变化对星载光电成像系统探测能力的影响,对 $0.38\sim 0.78\ \mu\text{m}$ 谱段内的可见光辐射目标进行了数值模拟研究。以基本辐射理论为基础,建立了卫星目标光学观测的可见光反射特性模型。根据目标的几何结构和材料特性,分析了姿态变化与目标有效入射截面积的关系,推导了探测能力与信噪比(SNR)的计算公式,数值模拟研究了姿态变化对探测能力的影响。研究结果表明,信噪比与探测距离均表现出很强的方向性,呈周期性变化, $2.2\ \text{m}\times 2.7\ \text{m}$ 的太阳帆板的信噪比与探测距离最大差值达到 10^1 及 $10^5\ \text{km}$ 量级,高 $12\ \text{m}$ 、直径 $4\ \text{m}$ 的卫星本体的最大差值达到 10^2 及 $10^6\ \text{km}$ 量级,目标姿态变化对探测能力具有显著影响。

关键词 光学器件;空间目标;姿态变化;探测能力;信噪比;探测距离

中图分类号 O432.1; O435.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.1223002

Influence of Attitude Variation on the Detection Ability of Satellite Photoelectric Imaging System

Yang Lu Niu Yanxiong Lü Jianming Zhang Ying Liu Wenwen Li Jianping Niu Haisha

(Department of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract In order to study the influence of satellite attitude variation on the detection ability of the satellite photoelectric imaging system, the targets in $0.38\sim 0.78\ \mu\text{m}$ spectrum of visible light radiation are calculated. The visible light reflectance model of the space-based optical observation is established on the basis of basic radiation theory. According to the geometric structure and material properties of the target, the influence of attitude variation on the area of effective incident section is analyzed. The formulas of the signal-to-noise ratio (SNR) and detection distance are derived, the influence of attitude variation on the detection capability is numerically simulated. The calculation results indicate that when the attitude changes over a period of time, to the $2.2\ \text{m}\times 2.7\ \text{m}$ solar panel, the maximum difference of SNR and detection distance can reach 10^1 and $10^5\ \text{km}$ respectively with strong directionality, and to the satellite with $12\ \text{m}$ high and $4\ \text{m}$ diameter, the maximum difference can reach 10^2 and $10^6\ \text{km}$ respectively. Attitude variation has a significant impact on the detection ability.

Key words optical devices; space target; attitude variation; detection ability; signal-to-noise ratio; detection distance

OCIS codes 230.0250; 230.0290; 230.5160; 250.0040

1 引 言

近年来,空间信息的获取越来越重要,空间信息对夺取制空权赢得未来战争具有重要的作用。天基空间目标监视系统相对于地基空间目标监视系统具有不受地理位置、气候条件限制等优点,是现在各国获取空间态势信息的主要手段之一,是实现掌握空间信息的重要基础,已成为当今空间领域的前沿性

技术^[1]。

星载光电成像系统作为天基空间目标监视系统的重要组成部分,能否有效实现对目标的识别和定位跟踪是其探测能力的重要体现。系统的探测能力是指有效地从背景信号和噪声信号中提取有用的目标信号的本领,以信噪比(SNR)和探测距离为重要的技术指标^[2]。探测能力不仅与成像系统本身的性

收稿日期: 2014-05-20; 收到修改稿日期: 2014-07-10

作者简介: 杨 露(1989—),女,硕士研究生,主要从事图像处理方面的研究。E-mail: yl8908@163.com

导师简介: 牛燕雄(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事光电对抗方面的研究。E-mail: niuyx@buaa.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

能有关,还受限于目标的可见光反射特性。然而,姿态变化会严重改变可见光反射特性,所以基于目标的姿态变化特性,研究系统的探测能力具有极其重要的意义^[3-4]。目前,国内外对成像系统的探测能力分析已展开了一段时间,研究重点包括系统的性能参数以及目标的结构特性等,但是大多忽略了目标的姿态变化特性。

本文针对卫星目标姿态变化对成像系统探测能力的影响,建立了卫星目标光学观测的可见光反射特性模型,分析了姿态变化对目标有效入射截面积的影响,并根据推导的探测能力关于目标姿态变化的理论计算关系式进行了数值模拟研究。

2 空间目标姿态变化

2.1 空间目标光学建模

卫星是非自发光的空间目标,它的亮度主要是由太阳光照射产生。如图 1 所示,采用 J2000.0 惯性坐标系 $i-j-k$ 及目标本体坐标系 $x-y-z$,分析卫星目标表面的可见光反射特性^[5]。

在图 1 中,J2000.0 惯性坐标系 $i-j-k$ 的坐标原点为地球质心, i 轴在以地球平赤道面为基本平面内指向 J2000.0 的平春分点, k 轴为由地心指向北极的地球自转轴, j 轴由右手法则确定。目标本体坐

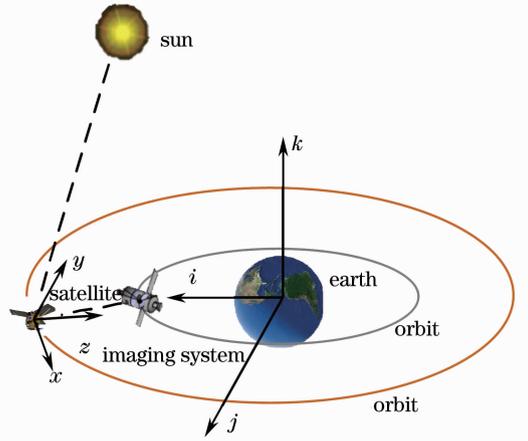


图 1 空间位置矢量关系示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of spatial position vector relation

标系 $x-y-z$, 坐标原点为目标质心, x 轴在目标轨道平面内指向目标运动方向, z 轴为目标质心指向地球质心的方向, y 轴由右手法则确定。通过三者的位置坐标关系,确定卫星目标表面可见光入射方向矢量及观测方向矢量,根据辐射传递过程以及观测条件对目标的光学可见性条件进行判断。

2.2 位置矢量计算

太阳、成像系统及卫星目标相对于地球的运动遵循开普勒定律^[6],用椭圆运动方程表示如下:

$$M = (t - \tau) \sqrt{\mu/a^3}, \quad (1)$$

$$|r| = a(1 - e^2)/(1 + e \cos f), \quad (2)$$

$$f = M + e(2 - e^2/4 + 5e^4/96) \sin M + e^2(5/4 - 11e^2/24) \sin(2M) + e^3(13/12 - 43e^2/64) \sin(3M) + 103e^4 \sin(4M)/96 + 1097e^5 \sin(5M)/960, \quad (3)$$

式中 M 为平近点角, μ 为地球引力常数, $\mu = 398600.47 \text{ km}^3/\text{s}^2$, e 为轨道偏心率, a 为轨道半长轴, τ 为过近地点时刻, r 为地心距离矢量, f 为真近点角, t 为观测时刻,均采用 J2000.0 标准历元起算的儒略日数计时。

由(1)~(3)式可得在 J2000.0 惯性坐标系中的矢量坐标为

$$p = R_z(-\Omega)R_x(-\phi)R_z(-\omega)p_0, \quad (4)$$

式中 Ω 为升交点赤经, ϕ 为轨道倾角, ω 为近地点幅角, $p_0 = [r \cos f \ r \sin f \ 0]^T$, $R_x(\theta)$ 、 $R_y(\theta)$ 、 $R_z(\theta)$ 为旋转矩阵,且有

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

为了便于目标特性分析,将各量在 J2000.0 惯性坐标系中的矢量坐标转换到目标本体坐标系,计算如下:

$$q = L_{001}R_z(\omega)R_x(\phi)R_z(\Omega)p, \quad (8)$$

式中 q 为各量在目标本体坐标中的矢量坐标, L_{001}

为坐标轴的反向变换矩阵, $L_{001} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ 。

根据(1)~(8)式,结合太阳、成像系统及卫星目标的轨道参数,得到三者的位置矢量坐标分别为 q_s 、 q_t 及 q_o ,从而利用距离公式和余弦定理,求出三者的位置距离关系。

3 空间目标姿态变化

目标姿态变化对其可见光反射特性有一定的影响,假设太阳所发出的总辐射量在空间方向上的分布是均匀的,则在波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 的可见光谱范围内,由普朗克黑体辐射公式^[6-7],可得到太阳在目标处的照度 E_d 为

$$E_d = \frac{R_s^2 c_1}{D_{so}^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_0}\right) - 1 \right]^{-1} d\lambda, \quad (9)$$

式中 $T_0 = 5900$ K为太阳温度, D_{so} 为太阳到目标的距离, R_s 为太阳半径, $R_s = 6.9599 \times 10^8$ m, c_1 为第一辐射常数, $c_1 = 14388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$, $\lambda_1 = 0.38 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 0.78 \mu\text{m}$, c_2 为第二辐射常数, $c_2 = 3.342 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \mu\text{m}^2$ 。

3.1 太阳帆板的姿态变化

卫星目标姿态变化有滚转、俯仰和偏航三种形式^[5-8]。其中,目标俯仰和偏航的转动轴与目标表面入射光线和反射光线分别在同一平面上,因此对光线入射角及观测角没有影响,不改变目标有效入射截面积。目标滚转时,目标表面光线入射角和观测角随着滚转会变化,改变目标的有效入射截面积。因此,本文主要研究目标的滚转与目标表面入射角、成像系统的探测角的关系,进而得到姿态变化对探测能力的影响,并以卫星的太阳帆板和本体为例。

太阳帆板的保护层是石英片^[9],具有很强的镜面反射,其反射太阳光的示意图如图2所示, θ_{sf} 为目标法向矢量与太阳光线的夹角, θ_{it} 为目标法向矢量与目标-系统连线的夹角。

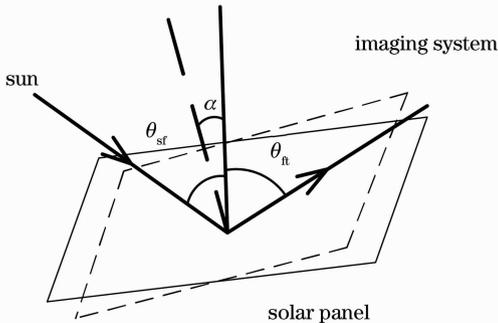


图2 太阳帆板表面反射示意图

Fig. 2 Schematic diagram of solar panel surface reflectance

当太阳与目标法向矢量成 θ_{sf} 夹角时,结合(9)式可推导出当太阳反射光线与目标法向矢量成 ψ 角方向时,目标的辐射亮度 $L(\psi)$ 为^[9]

$$L(\psi) = \frac{r_f E_d}{1.2} \exp\left[-\frac{(\psi - \theta_{sf})^2}{2\sigma^2}\right], \quad (10)$$

式中 r_f 为太阳帆板的总反射率, $r_f = 0.1$, σ 为高斯分布的方差,与太阳帆板表面的材料性能有关, $\sigma = 0.52$ 。

此时,成像系统入瞳处的辐射照度 $E_f(\psi)$ 为

$$E_f(\psi) = L(\psi) \frac{S \cos \theta_{it} \cos \theta_{sf}}{D_{it}^2}, \quad (11)$$

式中 S 为太阳帆板的总面积, $S = 2.2 \times 2.7 \text{ m}^2$, D_{it} 为目标到成像系统的距离, θ_{it} 为成像系统法向矢量与目标-系统连线的夹角。

若太阳和成像系统的位置保持不变,太阳帆板的辐射亮度随姿态变化 α 时的表达式为

$$L(\theta_{it} + \alpha) = \frac{r_f E_d}{1.2} \exp\left\{-\frac{[(\theta_{it} + \alpha) - (\theta_{sf} - \alpha)]^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (12)$$

因而,成像系统入瞳处接收到的辐射照度 $E'_f(\alpha)$ 为

$$E'_f(\alpha) = L(\theta_{it} + \alpha) \frac{S \cos(\theta_{it} + \alpha) \cos \theta_{sf}}{D_{it}^2}. \quad (13)$$

3.2 卫星本体的姿态变化

卫星本体涂层是为S781白漆^[9],作为理想的漫反射体,其表面反射太阳光示意图如图3所示。 θ_{ys} 为太阳入射光线与目标轴线的夹角, θ_{yt} 为目标轴线与目标-系统连线的夹角, φ 为太阳入射光线与目标-系统连线的夹角, α 为目标滚转角度。

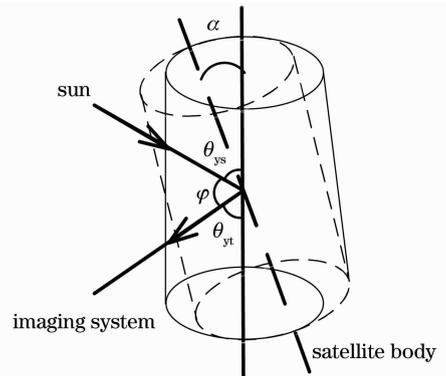


图3 卫星本体表面反射示意图

Fig. 3 Schematic diagram of satellite body surface reflectance

卫星本体反射的太阳光在探测器上的光谱辐射照度 E_y 为

$$E_y = L H r_y E_d \sin \theta_{yt} \sin \theta_{ys} [\sin \varphi + (\pi - \varphi) \cos \varphi] / (\pi D_{yt}^2), \quad (14)$$

式中 L 为卫星本体底面直径, $L=4\text{ m}$, H 为卫星本体高度, $H=12\text{ m}$, r_y 为与波长无关的目标表面反射率, $r_y=0.7$, D_{yt} 为卫星本体与成像系统的距离。

结合卫星本体的结构与材料特性, 当目标滚转 α 时, 成像系统的辐射照度 $E'_y(\alpha)$ 为

$$E'_y(\alpha) = L H r_y E_d [\sin \varphi + (\pi - \varphi) \cos \varphi] \times \sin(\theta_{yt} + \alpha) \sin(\theta_{ys} - \alpha) / (\pi D_{yt}^2). \quad (15)$$

将太阳帆板、卫星本体两部分辐射叠加起来, 从而得到成像系统入瞳处接收到的总辐射照度 $E_m(\alpha)$ 随卫星姿态变化的表达式为

$$E_m(\alpha) = E'_t(\alpha) + E'_y(\alpha). \quad (16)$$

综上所述, 在给定太阳、成像系统、卫星目标的轨道参数后, 求出三者目标本体坐标系下的矢量坐标, 得到太阳-目标、目标-系统的距离, 目标表面光线的入射角以及成像系统的观测角。在建立的可见光反射特性模型基础上, 根据目标的几何结构与材料特性, 当目标姿态变化时, 对目标表面反射光线进行遮挡判断, 得到成像系统入瞳处的辐射照度的变化量, 既而结合成像系统的性能参数, 进行目标姿态对成像系统探测能力影响的数值模拟研究。

4 成像系统探测能力分析

4.1 系统的信噪比

光电成像系统的信噪比是指进入成像系统的目标信号与成像系统总噪声信号的比值, 是衡量成像系统探测能力的重要性能指标之一。

4.1.1 噪声信号

成像系统在对目标探测时有很多种噪声, 主要包括目标辐射光子噪声、转移噪声、暗电流噪声、探测背景噪声、输出噪声、量化噪声、模式噪声、复合噪声等^[10-11]。本文忽略了转移噪声、输出噪声、量化噪声等噪声的影响, 主要考虑成像系统的探测背景噪声 n_B 、暗电流噪声 n_D 和目标辐射光子噪声 n_S ^[12-13]。用信号电子数的形式来表示噪声, 当卫星滚转 α 时, 目标辐射光子噪声的信号电子数为

$$N_s(\alpha) = \frac{\bar{\lambda} D'^2 \eta \pi t a^2}{d^2 h c} \cdot E_m(\alpha), \quad (17)$$

式中 η 为量子效率, $\eta=0.375$, t 为曝光时间, $t=0.005\text{ s}$, D' 为成像系统的有效通光口径, $D'=0.14\text{ m}$, τ 为成像系统的透射率, $\tau=0.35$, $\bar{\lambda}$ 为平均波长, $\bar{\lambda}=0.55\text{ }\mu\text{m}$, a 为 CCD 像素大小, $a=12\text{ }\mu\text{m}$, d 为成像系统造成的弥散斑直径, $d=1.2a$, h 为普朗克常数, $h=6.626196 \times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$, c 为光速。

4.1.2 信噪比

成像系统的信噪比 R_{SN} ^[14-15] 为

$$R_{SN} = \frac{N_s}{N}, \quad (18)$$

式中 N 为探测器系统总噪声的信号电子数。由于成像系统中的各种噪声是相互独立的, 系统总噪声是所有噪声的总和, 其表达式为

$$N = \sqrt{n_B^2 + n_S^2 + n_D^2} = \sqrt{N_B + N_S + N_D}, \quad (19)$$

式中 N_B 为探测器背景噪声的信号电子数, $N_B=500$, N_D 为探测器暗电流噪声的信号电子数, $N_D=10000$ 。

综上所述, 当卫星姿态变化 α 时, 成像系统的信噪比为

$$R_{SN}(\alpha) = \frac{N_s(\alpha)}{\sqrt{N_B + N_S(\alpha) + N_D}}. \quad (20)$$

4.2 系统的探测距离

在系统的工作温度、像素尺寸、阈值信噪比等影响因素不变的条件下, 目标与系统之间距离越远, 系统获取的信号越弱。因此, 如果系统能够探测的距离越大, 表明其信号处理能力越强, 传统的最大探测距离^[16-18] 为

$$R = \left(\frac{\pi \tau I D'^2 D^*}{2 \sqrt{A_d \Delta f} \cdot R'_{SN}} \right)^{1/2}, \quad (21)$$

式中 Δf 为成像系统的噪声等效带宽, $\Delta f = e/2t_d$, $e=0.5$ 为系统的效率常数, t_d 为积分时间, D^* 为成像系统比探测率, $D^* = 1 \times 10^6\text{ W}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}$, A_d 为成像系统的像素面积, $A_d = a^2$, R'_{SN} 为系统的阈值信噪比, I 为目标的发光强度。

根据(16)式, 目标姿态变化 α 时, 卫星目标总的发光强度 $I_m(\alpha)$ 为

$$I_m(\alpha) = E'_t(\alpha) \cdot D_{it}^2 + E'_y(\alpha) \cdot D_{yt}^2, \quad (22)$$

因此, 探测距离为

$$R(\alpha) = \left[\frac{\pi D'^2 D^* \tau \cdot I_m(\alpha)}{4 \sqrt{a^2 (e/2t_d)} \cdot R'_{SN}} \right]^{1/2}. \quad (23)$$

5 实验仿真与分析

5.1 太阳、成像系统和卫星目标轨道参数

太阳的轨道参数: 轨道半长轴 $a_s = 1.00000102\text{ Au}$ ($1\text{ Au} = 1.49597870 \times 10^8\text{ km}$); 轨道偏心率 $e_s = 0.01670862 - 0.00004204T - 0.00000124T^2$; 升交点赤经 $\Omega_s = 0^\circ$; 轨道倾角 $\varphi_s = 23.439291^\circ - 0.01300417^\circ T - 0.00000016^\circ T^2$; 近地点幅角 $\omega_s = 282.937347^\circ + 0.32256206^\circ T - 0.00015757^\circ T^2$, 太阳的过近地点时

刻 τ 为 1950-01-03 02:00:00。 $T = (t - 2451545.0) / 36525$, t 为观测时刻的儒略日数。

成像系统的轨道参数: 轨道半长轴 $a_i = 6863.10248$ km; 轨道偏心率 $e_i = 0.001$; 升交点赤经 $\Omega_i = 330.0^\circ$; 轨道倾角 $\phi_i = 97.39^\circ$; 近地点幅角 $\omega_i = 157.930^\circ$; 过近地点时刻 τ 为 2000-01-12 03:23:12。

卫星目标的轨道参数: 轨道半长轴 $a_o = 7028$ km; 轨道偏心率 $e_o = 0.05$; 升交点赤经 $\Omega_o = 60.0^\circ$; 轨道倾角 $\phi_o = 98^\circ$; 近地点幅角 $\omega_o = 30^\circ$; 过近地点时刻 τ 为

2002-04-03 17:00:05。

5.2 仿真与结果分析

结合太阳帆板和卫星本体的表面材料特性、成像系统的性能参数及轨道参数, 在观测时间为 2010-10-21 20:00:00 时, 分析空间目标的姿态变化对成像系统信噪比和探测距离的影响, 进行姿态变化对探测能力影响的数值模拟研究, 计算流程如图 4 所示。

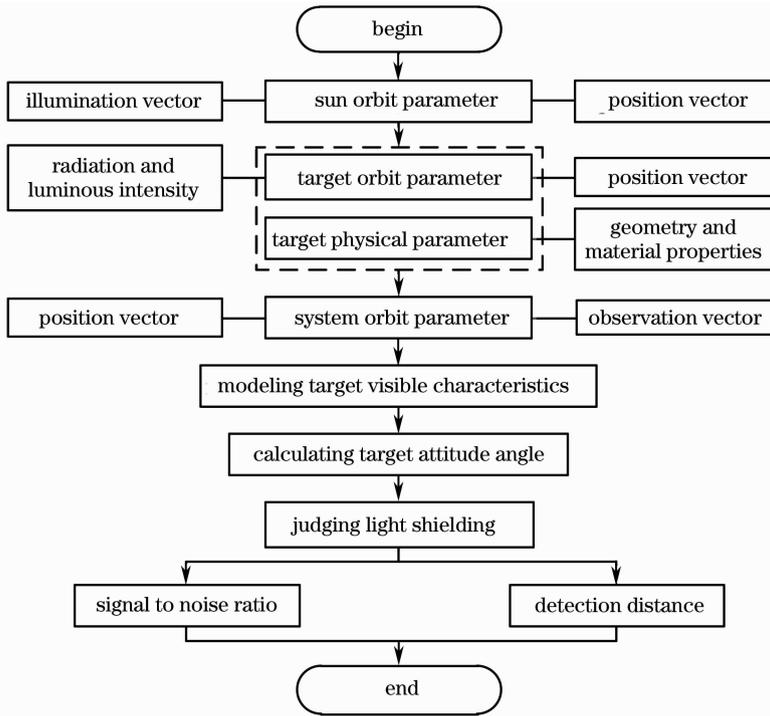


图 4 计算流程图

Fig. 4 Procedure diagram of calculation

太阳帆板、卫星本体、卫星在成像系统入瞳处的辐射照度仿真结果如图 5 所示, 系统的信噪比仿真结果如图 6 所示。在阈值信噪比为 0~20 的范围内, 探测距离关于阈值信噪比及目标姿态的仿真结果如图 7 所示。

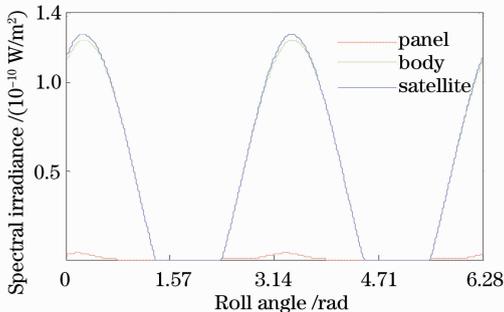


图 5 成像系统辐射照度

Fig. 5 Imaging system irradiance

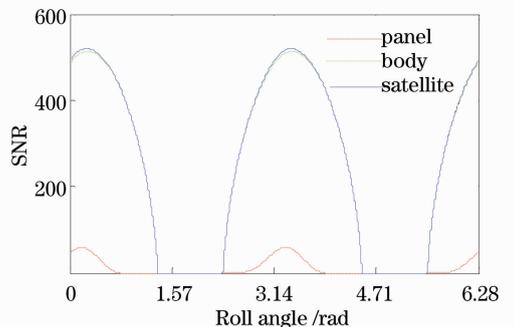


图 6 成像系统信噪比

Fig. 6 Imaging system SNR

从图 5~7 中可以看出, 辐射照度、信噪比和探测距离均呈周期性变化, 出现了峰值和零值, 表现出很强的方向性, 这与太阳帆板和卫星本体的几何结构及太阳、卫星、成像系统三者之间的位置关系有关。即当目标表面反射光线没有被遮挡时, 目标表

面的光线入射角和成像系统的观测角均在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间,目标的发光强度对成像系统入瞳处的照度才有贡献;相反,当目标表面反射光线被遮挡时,目标的发光强度很小,可以忽略不计。对于太阳帆板,其姿态变化在一个周期内时,目标表面反射光线未被遮挡的区间是 $(-\theta_{ft}, \frac{\pi}{2} - \theta_{ft})$ 及 $(\pi - \theta_{ft}, \frac{3\pi}{2} - \theta_{ft})$, 被遮

挡区间是 $(\frac{\pi}{2} - \theta_{ft}, \pi - \theta_{ft})$ 及 $(\frac{3\pi}{2} - \theta_{ft}, -\theta_{ft})$; 对于卫星本体表面反射光线未被遮挡的区间是 $(\pi - \theta_{yt}, \pi + \theta_{yt})$ 及 $(-\theta_{yt}, \theta_{yt})$, 被遮挡区间是 $(\theta_{ys}, \pi - \theta_{yt})$ 及 $(\pi + \theta_{ys}, -\theta_{yt})$ 。

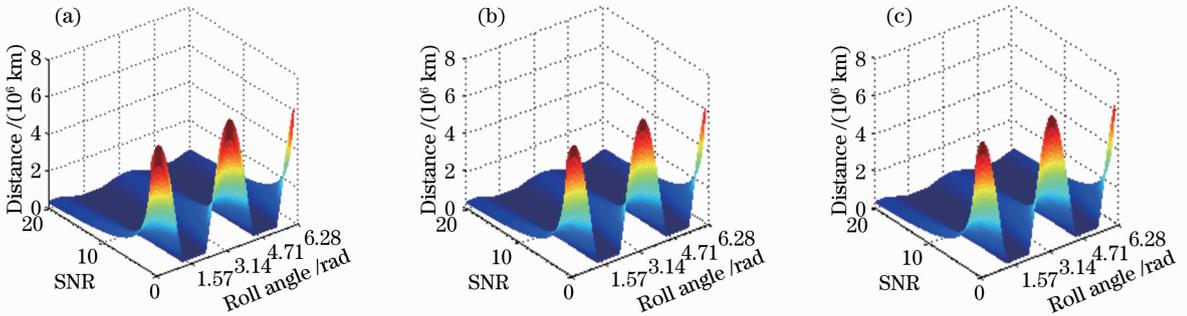


图 7 探测距离。(a)太阳帆板;(b)卫星本体;(c)卫星

Fig. 7 Detection distance. (a) Solar panel; (b) satellite body; (c) satellite

由图 5 可知,太阳帆板具有很强的镜面反射,最大辐射照度在 10^{-12} 量级,而卫星本体表面是漫反射,其最大辐射照度在 10^{-10} 量级,因此卫星的总体辐射照度主要由卫星本体决定。

在图 6 和图 7 中,当太阳帆板和卫星本体滚转角度分别为 $0.184, 3.334$ rad 及 $0.282, 3.424$ rad 时,探测系统的信噪比及探测距离有最大值,且太阳帆板的变化速率大于卫星本体。信噪比最大差值分别达到 10^1 及 10^2 量级,探测距离最大差值分别达到 10^5 km 及 10^6 km 量级,具有很强方向性。目标姿态变化时,探测系统的探测能力变化显著,并且主要由卫星本体决定。

6 结 论

利用目标、成像系统以及太阳之间的相对位置关系,建立了空间目标光学观测的可见光反射特性模型,分析了姿态变化对有效入射截面积的影响,推导了信噪比和探测距离与目标姿态的关系式。结合目标表面材料特性以及系统的性能参数,进行了姿态变化对探测能力影响的数值模拟研究。研究结果表明,目标姿态变化时,成像系统的信噪比和探测距离变化显著,有峰值和零值,表现出很强的方向性。对于 $2.2 \text{ m} \times 2.7 \text{ m}$ 的太阳帆板,信噪比与探测距离的最大差值达到 10^1 和 10^5 km 量级;对于高 12 m、直径 4 m 的卫星本体,信噪比与探测距离的最大差值达到 10^2 和 10^6 km 量级。因此,目标姿态

变化严重影响着星载光电成像系统的探测能力。数值分析结果验证了所建模型的正确性,为星载光电成像系统的探测和识别提供了有力的理论依据。

参 考 文 献

- 1 L W Schumann, T S Lomheim. Infrared hyperspectral imaging fourier transform and dispersive spectrometer: comparison of signal-noise based performance [C]. SPIE, 2000, 4480: 1-11.
- 2 Liu Yunmeng, Chai Jinguang, Wang Xuhui, *et al.*. Visible characteristics and calculation of detecting distance for space target [J]. Infrared Technology, 2009, 31(1): 23-26. 刘云猛, 柴金广, 王旭辉, 等. 空间目标可见光特性与探测距离估算[J]. 红外技术, 2009, 31(1): 23-26.
- 3 Zhao Bin, Yang Suhui, Wang Shitao, *et al.*. Optical modeling and simulative survey of small objects in space [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3395-3403. 赵彬, 杨苏辉, 王世涛, 等. 空间小目标的光学建模与模拟观测[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3395-3403.
- 4 L W Schumann, S Lomheim. Design constraints on advanced two-dimensional LWIR focal planes for imaging Fourier transform spectrometer sensors [C]. SPIE, 2001, 3063: 0150-0163.
- 5 Yuan Yan, Sun Chengming, Zhang Xiubao, *et al.*. Analysis of influence of attitude variation on visible characteristics of space target [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2748-2752. 袁艳, 孙成明, 张修宝, 等. 姿态变化对空间目标可见光特性的影响分析[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2748-2752.
- 6 Yu Jianhui, Su Zengli. Analysis of luminosity features of satellites on space-based surveillance [J]. Spacecraft TT&C Technology, 2006, 25(1): 52-56. 余建慧, 苏增立. 地基观测目标卫星光度特性分析[J]. 飞行器测控学报, 2006, 25(1): 52-56.
- 7 Wu Yan, Tang Yi, Liu Jianpeng, *et al.*. Optics design of far ultraviolet imaging spectrometer for ionosphere remote sensing [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0122001. 吴雁, 唐义, 刘健鹏, 等. 电离层遥感远紫外成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0122001.
- 8 Li Baoquan, Fang Yongchun, Zhang Xuebo. Unified rotation-

- based self-calibration method for cameras [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1115003.
- 李宝全, 方勇纯, 张雪波. 基于纯旋转运动的摄像机统一标定方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(11): 1115003.
- 9 Shu Rui. Research on Satellite Target Identification and Feature Extraction Method [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. 29—44.
- 舒 锐. 卫星目标识别与特征参数提取方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010. 29—44.
- 10 Chen Weizhen, Zhang Chunhua, Zhou Xiaodong. A study on luminosity features and signal noise ratio of space target [J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(12): 0716—0719.
- 陈维真, 张春华, 周晓东. 空间目标的光度特性及其成像信噪比研究[J]. *红外技术*, 2007, 29(12): 0716—0719.
- 11 Chen Xinjin, Yuan Yan, Li Liying, *et al.*. Analysis of signal to noise ratio for target detection [J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(4): 0397—0400.
- 陈新锦, 袁 艳, 李立英, 等. 目标探测的信噪比分析[J]. *应用光学*, 2007, 28(4): 0397—0400.
- 12 Yuan Yan, Sun Chengming, Huang Fengzhen, *et al.*. Modeling of ultraviolet characteristics of deep space target [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(8): 089501.
- 袁 艳, 孙成明, 黄锋振, 等. 深空背景下空间目标紫外特性建模方法研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(8): 089501.
- 13 Tu Yi, Yang Jian, Sun Zhiwei, *et al.*. Analysis of optical power of monochromatic LED beacon detected by visible light CCD [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(s1): s104003.
- 涂 遗, 杨 剑, 孙志伟, 等. 可见光 CCD 探测单色 LED 信标光功率分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(s1): s104003.
- 14 Wang Shitao, Zhang Wei, Wang Qiang. Measurement for detectivity of infrared detectors in low temperature background [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(3): 0484—0491.
- 王世涛, 张 伟, 王 强. 红外探测器件在低温背景下的探测率测试[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3): 0484—0491.
- 15 Cheng Jun, Zhang Wei, Bao Wenzhuo, *et al.*. Design and implementation of digital simulation system for detecting imaging of orbiting optical camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(9): 2136—2144.
- 程 军, 张 伟, 鲍文卓, 等. 在轨光学相机探测图像数字仿真系统的设计与实现[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(9): 2136—2144.
- 16 Zhao Feifei, Liu Yu, Yang Yi, *et al.*. Research on operating rang of imaging system technology based on AlGaIn solar-blind UV focal plane array detectors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(6): 061101.
- 赵菲菲, 刘 玉, 羊 毅, 等. AlGaIn 日盲紫外焦平面成像系统作用距离研究[J]. *激光与光电子进展*, 2014, 51(6): 061101.
- 17 Si Fuqi, Jiang Yu, Jiang Qingwu, *et al.*. Design of fore optical system in space-borne differential optical absorption spectrometer for atmospheric trace gas monitoring [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0322002.
- 司福祺, 江 宇, 江庆五, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪前置光学系统设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0322002.
- 18 Fang Xiang, Chen Jing, Wu Fengtie, *et al.*. Generation of long-distance quasi-non-diffracting beams using a concave axicon [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0508002.
- 方 翔, 陈 婧, 吴逢铁, 等. 产生长距离近似无衍射光束的凹锥透镜 [J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0508002.

栏目编辑: 史 敏