

# 星载光电成像系统建模与性能评估

张颖 牛燕雄 吕建明 杨露 牛海莎 耿天琪 许冰 李继扬

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

**摘要** 星载光电成像系统可实现对空间目标的有效探测,而探测距离是评价系统性能的重要指标。以太阳光辐射特性和深空背景特性为基础,分别建立了几何成像因素、探测器灵敏度、信噪比和成像分辨率影响下的系统作用距离的数学物理模型,推导了系统作用距离的表达式,对作用距离与曝光时间、探测器像元尺寸、有效通光口径等影响因素之间的关系进行了数值模拟研究。研究结果表明,对于有效尺寸为 $2\text{ m}\times 4\text{ m}$ 、平均反射率为0.3的平面目标,当光学系统口径为 $100\text{ mm}$ 、焦距为 $500\text{ mm}$ 、探测器像元尺寸为 $3.5\text{ }\mu\text{m}$ 时,系统对目标的最大作用距离为 $12\text{ km}$ ,作用距离主要受成像分辨率的限制。研究结果可为星载光电成像系统的设计以及系统性能评估提供一定的基础。

**关键词** 成像系统;星载光电系统;作用距离;信噪比;电荷耦合器件灵敏度;成像分辨率

中图分类号 O432.2; V474.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.021101

## Modeling and Performance Evaluation on Satellite-borne Photoelectric Imaging System

Zhang Ying Niu Yanxiong Lü Jianming Yang Lu Niu Haisha Geng Tianqi  
Xu Bing Li Jiyang

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

**Abstract** Satellite-borne photoelectric imaging system can detect space objects effectively and detection distance is an important parameter to evaluate system performance. System detection distance model influenced by the number of imaging pixel is established, detector sensitivity, signal-to-noise ratio and imaging resolution respectively and derive detection distance equation based on sun radiation and deep space radiation character. And then relations between detection distance and exposure time, pixel size and optics effective aperture are simulated. The results show that the maximum detection distance is  $12\text{ km}$  which is limited mainly by imaging resolution when object size is  $2\text{ m}\times 4\text{ m}$ , average reflectivity is 0.3, optics effective aperture is  $100\text{ mm}$ , detector pixel size is  $3.5\text{ }\mu\text{m}$  and focal length is  $500\text{ mm}$ . The result can provide theory guidance for the design and system performance evaluation of the satellite-borne photoelectric imaging system.

**Key words** imaging systems; satellite-borne photoelectric system; detection distance; signal-to-noise ratio; charge coupled device sensitivity; imaging resolution

**OCIS codes** 110.3010; 000.2170; 000.4430

## 1 引言

随着人类探索空间的深入,对空间目标信息的获取日趋重要,天基空间目标监视技术已成为当今空间探测领域的前沿性技术。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,可实现对重要空间目标的捕获和跟踪,同时获得空间目标的形状、尺寸、轨道参数等重要特征,是未来空间态势感知的重要发展方向。

世界各国都十分重视星载光电成像系统的研究。以美国在该方面的技术最为成熟,1996年,美国发射的中段试验卫星(MSX)验证了天基观测的可行性和有效性,卫星上搭载的可见光传感器(SBV)现已装备部

收稿日期: 2014-08-27; 收到修改稿日期: 2014-09-18; 网络出版日期: 2015-01-15

作者简介: 张颖(1989—),女,硕士研究生,主要从事光电对抗方面的研究。E-mail: ZYbeijing\_2007@126.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](http://www.opticsjournal.net)

队;美国于2002年部署“天基空间监视系统”(SBSS)研究计划,实现对空间目标的发现、锁定及跟踪<sup>[1-3]</sup>;国内在该方向起步较迟,但取得了一定的理论研究成果,文献[4-6]分别对星载光电成像系统的作用距离与影响因素间的定量关系进行了研究;空间相机有效口径的理论计算分析;对星载可见光相机的探测距离进行了仿真研究。但都未涉及系统探测性能的评估,未能得到系统对典型目标的作用距离。

本文以太阳的光照特性和深空背景特性为基础,建立了在成像像元数、探测器灵敏度、信噪比以及成像分辨率影响下的探测距离的数学物理模型,对系统探测距离与性能参数间的定量关系进行了数值模拟研究,得到了极限探测距离随影响因素的定量变化关系,分析了系统对典型空间目标的作用距离,结果可为星载光电成像系统的设计以及性能评估提供理论依据。

## 2 系统工作原理

星载光电成像系统由光电成像模块、控制模块、图像采集与显示模块三部分组成,其工作过程如图1所示。太阳光辐射在空间内分布,照射到空间目标表面的太阳光,会发生光的反射。由于目标组成材料、表面粗糙度以及介电常数等的差异,不同的目标表现出不同的太阳光反射特性。反射回波携带着目标信息在空间传输一段距离后进入探测系统,被电荷耦合器件(CCD)探测器的焦平面接收成像。图像采集与处理单元(CMOD)对CCD输出的电信号进行采集,通过一定的图像处理算法对图像进行处理,实现目标的探测与识别。

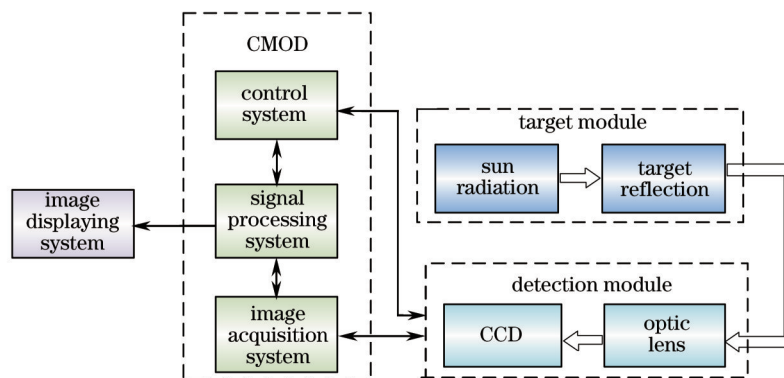


图1 星载光电成像系统原理图

Fig.1 Schematic of satellite electro-optic imaging system

### 2.1 太阳辐照特性建模

空间目标星载光电成像系统探测的是空间目标反射的太阳光,即空间目标信号来源主要是太阳光可见光谱段的辐射能量。根据普朗克黑体辐射公式,黑体辐射的单色辐出度为<sup>[7]</sup>

$$M(\lambda, T_0) = 10^{12} (C_1 / \lambda^5) \left[ \exp(c_2 / \lambda T_0) - 1 \right]^{-1}, \quad (1)$$

式中 $\lambda$ 为波长, $T_0$ 为黑体温度(K), $C_1 = 3.742 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \mu\text{m}^2$ 为第一辐射常数, $C_2 = 14388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 为第二辐射常数,单色辐出度 $M(\lambda, T_0)$ 的单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$ 。

通常太阳辐射可以认为是温度为5900 K的黑体辐射,太阳对目标的单色辐照度为

$$E(\lambda) = \frac{M(\lambda) \cdot A}{4\pi R^2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}, \quad (2)$$

式中 $A$ 为太阳表面积, $R$ 为日地平均距离。

在可见光0.38~0.76  $\mu\text{m}$ 波段,太阳对空间目标的辐照度为

$$M_1 = \int_{0.38}^{0.76} E(\lambda) d\lambda = 593.1 \text{ W}/\text{m}^2. \quad (3)$$

### 2.2 背景辐射分析

对空间目标进行探测时,探测器接收的背景光的主要来源有:太阳直接辐射、星体辐射、地球大气辐射和地球反照,太阳、地球和各种星体辐射光谱分别近似于5900 K、300 K以及3.5 K的黑体<sup>[8]</sup>,三者的辐射光谱分别如图2(a)~(c)所示。

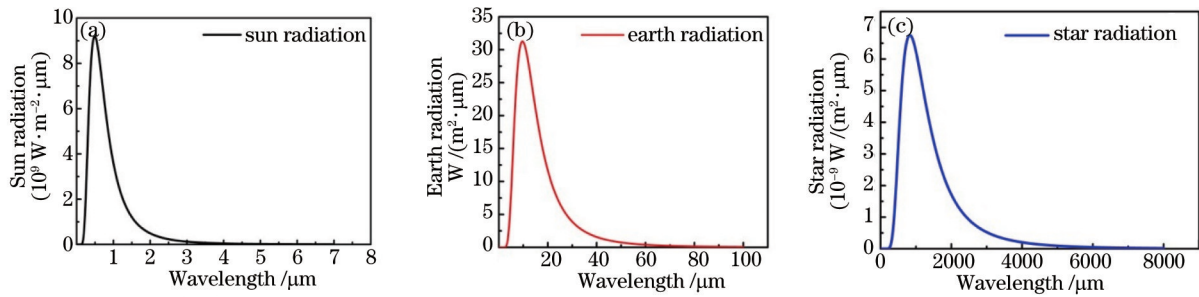


图2 黑体辐射光谱。(a) 太阳辐射光谱; (b) 地球辐射光谱; (c) 星体辐射光谱

Fig.2 Blackbody radiation spectra. (a) Solar radiation spectrum; (b) terrestrial radiation spectrum; (c) stellar radiation spectrum

由上图可知,太阳的直接辐射以可见光为主,而地球以及星体辐射在可见光波段的辐射近似为零,可以忽略不计,因此,太阳辐射是背景辐射的主要来源。由于地球对太阳光的反射光谱特性与入射光谱特性相似,因此地球对太阳光的反射是背景辐射的重要来源。若地球的平均反射率取值为0.3,则地球反射的太阳辐照度为 $177.9 \text{ W/m}^2$ 。因此,深空背景辐射包含两个部分即太阳的直接辐射和地球大气对太阳的反射。

### 3 系统探测能力分析

#### 3.1 系统参数选取

系统对典型空间目标的探测距离与系统的参数密切相关,选取的系统参数如下:平面目标的长度 $L=4 \text{ m}$ ,宽度 $W=2 \text{ m}$ ,表面材料的平均反射率 $\rho=0.3$ ;光学系统焦距 $f=500 \text{ mm}$ ,有效通光口径 $D=100 \text{ mm}$ ,光谱透射率 $\tau_0=0.7$ ;CCD探测器的灵敏度 $\phi_{\min}=0.05 \text{ lx}$ ,像元尺寸 $a=3.5 \mu\text{m}$ ,平均量子效率 $\eta=0.6$ ,像元填充因子 $\varepsilon=0.4$ ,暗电流噪声产生的光电子数 $N_D=18 \text{ photon/s}$ ,电子读出噪声产生的光电子数 $N_R=6 \text{ photon/s}$ ;曝光时间为 $t_0=0.1 \text{ s}$ ,工作波段平均波长 $\bar{\lambda}=0.57 \mu\text{m}$ ,背景噪声产生的光电子数 $N_B=200 \text{ photon/s}$ ,信噪比阈值 $T_{\text{sn}}=8$ ,目标在探测器焦平面横、纵方向所占的像元数为 $n_i=n_w=4$ 。

#### 3.2 成像像元数的影响

CCD探测器对空间目标进行成像时,依据成像几何关系,对于尺寸为 $L \times W$ 的目标,在探测器焦平面上所占的像元个数分别为

$$\begin{cases} n_i = \frac{L}{R \cdot a} \cdot f \\ n_w = \frac{W}{R \cdot a} \cdot f \end{cases} \quad (4)$$

式中 $R$ 为目标与探测系统之间的距离。

根据Johnson准则<sup>[9]</sup>,为实现对目标的探测,要求目标在像平面上成像的像元数不小于2。在实际探测过程中,光学系统的像点弥散以及目标相对运动引起的弥散等会使像点所占的像元数大于理想条件下的像元数。为现实对目标的有效探测,目标在像平面上成像的像元数至少为4,即 $n_i \geq 4, n_w \geq 4$ 。

通过分析(4)式,得到的不同距离处目标在垂直和水平方向上所占的像元的个数如图3所示。可知基于几何成像的理论,系统的极限探测距离为71 km。

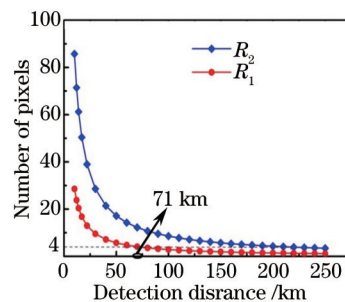


图3 探测距离与成像像元数

Fig.3 Detection distance versus object imaging pixel number

### 3.3 CCD探测灵敏度的影响

对于有效反射面积为 $L \times W$ 的平面目标,若太阳-平面连线与目标表面法线矢量的夹角为 $\theta_1$ ,探测系统-平面连线与目标表面法线的夹角为 $\theta_2$ ,则根据目标的反射特性以及余弦定律,入射光波经目标反射后,在距离目标 $R$ 处的辐照度为:

$$E_1 = \frac{\rho M_1 L W \cos \theta_1 \cos \theta_2}{R^2}. \quad (5)$$

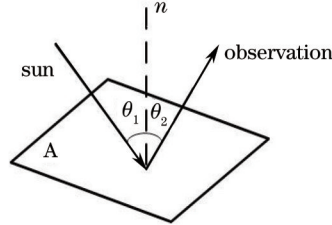


图4 目标反射特性示意图

Fig.4 Target reflection characteristic sketch map

则经空间目标反射的光信号经过入瞳处的光能量为

$$\phi = S E_1 \tau_0 = \frac{S \rho M_1 L W \tau_0 \cos \theta_1 \cos \theta_2}{R^2}, \quad (6)$$

式中 $S$ 为光学系统的入瞳面积, $S = \pi(D/2)^2$ :

当像元的尺寸为 $a$ ,目标所成的像元个数为 $4 \text{ pixel} \times 4 \text{ pixel}$ 时,则探测器焦平面单位面积接收的辐照度为

$$\phi_1 = \frac{\phi}{16a^2} = \frac{\rho \tau_0 S M_1 L W \cos \theta_1 \cos \theta_2}{16a^2 R^2}. \quad (7)$$

当 $\phi_1$ 不小于CCD能响应的最低照度 $\phi_{\min}$ 时,目标才能被探测。此时

$$\phi_1 \geq \phi_{\min}. \quad (8)$$

一般的CCD探测器的最低辐照度为 $10^{-2} \sim 10^{-3} [10]$ ,则探测器最低照度影响下的对空间目标的极限探测距离为

$$R = \sqrt{\frac{\pi \rho \tau_0 L W M_1 D^2 \cos \theta_1 \cos \theta_2}{64 a^2 \phi_{\min}}}. \quad (9)$$

目标在太空自由飞行时,由于不受地球引力和空气动力的作用,会产生三维姿态变化,光线的入射角和反射角在一定程度上是目标姿态的反映。为定量研究目标姿态对作用距离的影响,通过改变(9)式中 $\theta_1$ 与 $\theta_2$ 的值,得到了系统极限探测距离随目标姿态变化的曲线如图5所示。

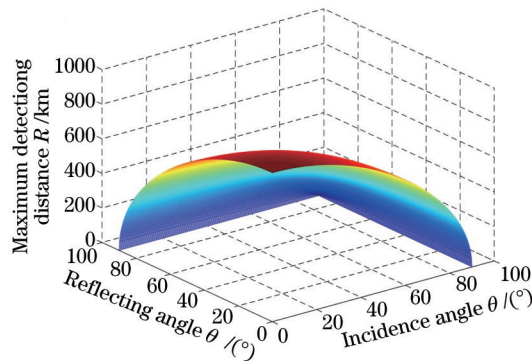


图5 目标姿态与探测距离

Fig.5 Target attitude versus detection distance

由图5可知,目标在不同姿态变化时,系统的极限探测距离介于 $0.7 \sim 860 \text{ km}$ 之间,探测距离变化范围较大。因此目标姿态对系统作用距离的影响显著。系统其他参数不变,当光线垂直入射到目标表面并垂直反射时,系统的探测距离最大,即 $\theta_1 = 0, \theta_2 = 0$ 。由此得到了目标在不同反射率条件下的系统极限探测距离随像元尺寸和光学系统孔径的变化规律如图6、7所示。

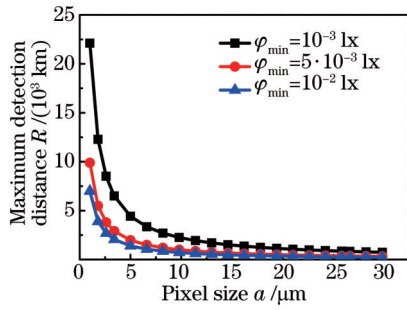


图6 像元尺寸与探测距离

Fig.6 Detection distance versus pixel size

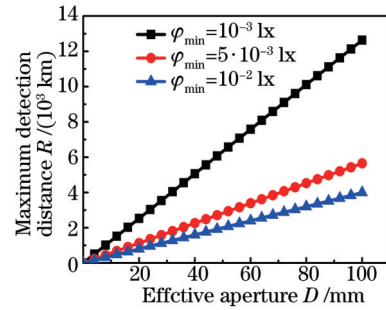


图7 光学系统的有效通光口径与探测距离

Fig.7 Detection distance versus effective aperture

当目标在探测器焦平面上的成像像元数一定时,像元尺寸越大,单位面积上的能量越小,系统的探测距离随之减小。由图6和图7可知,探测距离随像元尺寸和光学系统有效通光口径的变化规律相反,因此要实现系统的优化设计需要对系统参数进行匹配选择。

### 3.4 信噪比的影响

#### 3.4.1 目标信号计算

由(6)式得到探测器入瞳处的光能量,则探测器的每个像元响应的光电子数为<sup>[4]</sup>

$$N_s = \frac{\eta \epsilon t_0 \phi}{(hc/\lambda)n}, \quad (10)$$

式中  $h$  为普朗克常量,  $n$  为目标光斑在探测器上所占像元数。

#### 3.4.2 信噪比计算

探测器在对空间目标探测时,噪声来源有:探测背景噪声、光子噪声、探测器噪声、驱动电路、温度环境等固有噪声和引入噪声等,本文只考虑主要噪声,即光子噪声、探测器暗电流噪声、电子读出噪声和探测背景噪声。

以上提及的空间目标成像系统中的各种噪声是相互独立的。因此,系统总噪声的方差是所有噪声贡献的方差的总和,其计算公式为<sup>[11]</sup>

$$N_{\text{noise}} = \sqrt{n_b^2 + n_s^2 + n_d^2 + n_r^2} = \sqrt{N_B + N_S + N_D + N_R}. \quad (11)$$

信噪比(SNR)是衡量系统探测能力的指标,一般以电子数为单位定义信噪比:  $N_{\text{SNR}} = N_s/N_{\text{noise}}$ ,其中  $N_s$  为在一定时间内接收到的信号电子数,  $N_{\text{noise}}$  为同一时间内接收到的总噪声电子数。系统的信噪比为

$$N_{\text{SNR}} = \frac{N_s}{N_{\text{noise}}} = \frac{N_s}{\sqrt{N_B + N_S + N_D + N_R}}. \quad (12)$$

#### 3.4.5 极限探测距离计算

为使探测器能从噪声信号中提取出目标信号,在对空间目标进行成像探测时系统的信噪比必须大于等于由探测概率和虚警概率所确定的信噪比阈值  $T_{\text{sn}}$ ,即

$$\frac{N_s}{\sqrt{N_s + N_D + N_B + N_R}} \geq T_{\text{sn}}. \quad (13)$$

经过整理得

$$N_s \geq \frac{T_{\text{sn}}^2 + \sqrt{T_{\text{sn}}^4 + 4(N_B + N_D + N_R)T_{\text{sn}}^2}}{2}. \quad (14)$$

将(14)式代入(10)式得到系统极限探测距离与系统各参数间的关系式为

$$L \leq \sqrt{\frac{\pi D^2 S_1 \eta \epsilon t_0 \tau_0 \rho M_1 \bar{\lambda} \cos \theta_1 \cos \theta_2}{2h \text{cn}[T_{\text{sn}}^2 + \sqrt{T_{\text{sn}}^4 + 4(N_B + N_D + N_R)T_{\text{sn}}^2]}}}. \quad (15)$$

通过改变  $t_0$  以及  $D$  的值,得到的探测距离随光学系统的有效通光口径以及系统曝光时间的变化如下图8,图9所示。



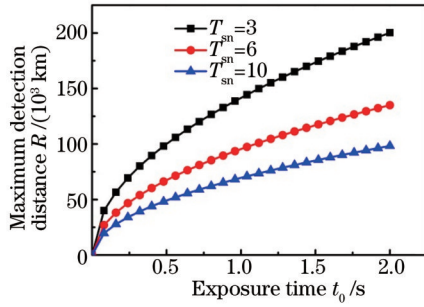


图8 曝光时间与探测距离

Fig.8 Exposure time versus detection distance

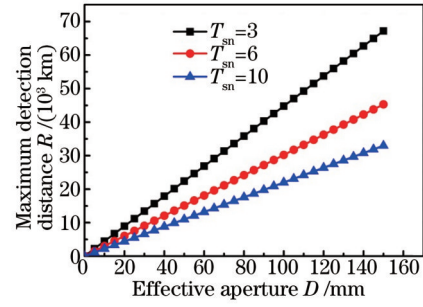


图9 通光口径与探测距离

Fig.9 Effective aperture and detection distance

### 3.5 成像分辨率的影响

光电成像系统的分辨率包含光学镜头的分辨率和接收 CCD 系统的分辨率两个部分。分辨率的定义是指系统在单位距离上的像平面每毫米能分辨开的线对数,单位为 lp/mm。若系统的分辨率为  $N$ ,物镜的分辨率为  $N_1$ ,接收系统 CCD 的分辨率为  $N_2$ ,则系统分辨率公式可表示为<sup>[12]</sup>

$$\frac{1}{N} = \frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}. \quad (16)$$

根据光的衍射理论和瑞利判据的定义,在不考虑像差的情况下,光学镜头分辨率可表示为

$$N_1 = \frac{1}{\sigma} = \frac{D}{1.22\lambda f}. \quad (17)$$

CCD 为离散采样器件,根据乃奎斯特采样定理,一个理想器件能够分辨的最高频率等于空间采样频率的一半,这个频率称为乃奎斯特极限频率。如果某探测器某方向的像元间距为  $a$ ,则该方向上的空间采样频率为  $1/a$ ,因此 CCD 探测器的分辨率为

$$N_2 = \frac{1}{2 \cdot a}. \quad (18)$$

对于(2)式中的波长,取波长的平均值  $0.57 \mu\text{m}$ ,则得到的光学镜头的分辨率  $N_1=287 \text{ lp/mm}$ 。CCD 探测器的像元尺寸为  $3.5 \mu\text{m}$ ,根据(17)式,得到其分辨率  $N_1=142 \text{ lp/mm}$ 。根据(16)式,得到光电成像系统的分辨率  $N=95 \text{ lp/mm}$ 。

摄像机的最小可分辨角  $\varphi$  受衍射和可分辨的线对数  $N$  的限制。 $\varphi$  由下式给出

$$\varphi = \max\left\{\frac{\lambda}{D}, \frac{1}{N \cdot f}\right\}. \quad (19)$$

根据 Johnson 准则,以 95% 的识别概率识别目标需要扫过目标的极限尺寸,且需要八周的最小空间频率或成像 16 个像元。在该条件下,得到识别距离  $R$  与目标极限尺寸  $L$  之间的关系为

$$\frac{L}{8} = R \cdot \varphi = \frac{R}{N \cdot f}. \quad (20)$$

目标的极限尺寸分别为 2 m 和 4 m 时,光学系统焦距  $f$  与探测距离  $R$  之间的关系曲线如图 10 所示。

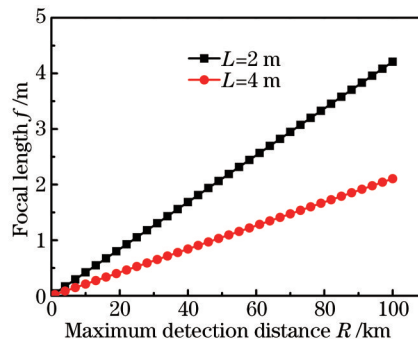


图10 焦距与探测距离

Fig.10 Focal length versus detection distance

根据上述分析可知,对于尺寸为  $2 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 、平均反射率为 0.3 的空间平面目标,系统对目标的探测距离为 12 km。

## 4 结 论

在可见光波段,分析了太阳的辐射特性和背景特性,建立了成像像元数、探测器灵敏度、信噪比以及成像分辨率约束下的系统的极限探测距离模型,对系统的性能进行了分析与评估。结果表明,对于尺寸为 $2\text{ m} \times 4\text{ m}$ 、表面反射率为0.3的平面目标,当光学系统焦距为 $500\text{ mm}$ 、有效通光口径为 $100\text{ mm}$ 、探测器像元尺寸为 $3.5\text{ }\mu\text{m}$ 、平均量子效率为0.7时,在成像像元数、成像分辨率影响下的系统对平面目标探测距离分别为 $71\text{ km}$ 、 $12\text{ km}$ ,而探测器灵敏度以及信噪比影响下的作用距离明显高于成像像元数以及成像分辨率影响下的作用距离。因此,综合上述分析,系统对目标的探测距离为 $12\text{ km}$ ,系统对目标的探测距离主要受成像分辨率的限制。

## 参 考 文 献

- 1 Cui Xiaoxiao. Situation of America space-based space objects surveillance system[J]. International Space, 2011, (7): 38-43.  
崔潇潇. 美国天基空间目标监视系统概况[J]. 国际太空, 2011, (7): 38-43.
- 2 E M Gaposchkin, C V Braun, J Sharma. Space-based space surveillance with the space-based visible[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2000, 23(1): 148-152.
- 3 Wang Jiejuan, Yu Xiaohong. The current development and characteristics analysis of foreign space based space surveillance[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2006, 17(4): 33-37.  
王杰娟, 于小红. 国外天基空间目标监视研究现状与特点分析[J]. 装备指挥技术学院学报, 2006, 17(4): 33-37.
- 4 Zhang Ying, Niu Yanxiong, Yang Lu, *et al.*. Analysis and study on detection capability of satellite photoelectric imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0111004.  
张 颖, 牛燕雄, 杨 露, 等. 星载光电成像系统探测能力分析与研究[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0111004.
- 5 Meng Qingwei, Zhang Wei, Long Funian. Analysis on detection ability of space-based space target visible camera[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 2079-2084.  
孟庆伟, 张 伟, 龙夫年. 天基空间目标可见光相机探测能力分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2079-2084.
- 6 Lu Dong, Zhang Zhanyue, Hao Dagong, *et al.*. Simulation and analysis of detection ability for space-based optical camera[J]. OME Information, 2011, 28(10): 30-43.  
卢 栋, 张占月, 郝大功, 等. 天基可见光相机探测距离仿真分析[J]. 光机电信息, 2011, 28(10): 30-43.
- 7 Lan Chaozhen. Modeling and Detecting Capability Analysis of Space-Based Space Object Optical Observation System [D]. PLA Information Engineering University, 2009. 04.  
蓝朝桢. 空间目标天基光学观测系统建模与探测能力分析[D]. 解放军信息工程大学, 2009. 04.
- 8 Li Yingchun, Tang Liming, Sun Huayan. Performance analysis of laser active imaging system used for spatial object[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2009, 19(1): 65-69.  
李迎春, 唐黎明, 孙华燕. 空间目标的激光主动成像系统性能分析[J]. 装备指挥技术学院学报, 2009, 19(1): 65-69.
- 9 Zhou Liwei. Target Detection and Recognition[M]. Beijing: Beijing Institute of Press, 2008. 24-30.  
周立伟. 目标探测与识别[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008. 24-30.
- 10 S G Demos, R R Alfano. Temporal gating in highly scattering media by the degree of optical polarization[J]. Opt Lett, 1996, 21(2): 161-163.
- 11 Chen Weizhen, Zhang Chunhua, Zhou Xiaodong. A study on luminosity features and signal noise ratio of space target [J]. Infrared Technology, 2007, 29(12): 716-719.  
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): 716-719.
- 12 Du Luquan, Wang Zeyong, Wang Li, *et al.*. Measuring lens maximum resolution by Matlab and CCD[J]. Science and Technology & Innovation, 2007, (8): 234-235.  
杜路泉, 王泽勇, 王 黎, 等. 用 Matlab 和 CCD 方法测量镜头的极限分辨率[J]. 科技与创新, 2007, (8): 234-235.

栏目编辑: 张浩佳