

文章编号: 0253-2239(2010)10-2935-06

天基可见光相机探测灵敏度研究

潘海斌 宋广华* 解利军 朱 博 何丽莎 郑 耀

(浙江大学空天信息技术研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要 随着遥感技术的发展,对载荷的性能提出愈来愈高的要求,特别是载荷的探测灵敏度,直接关系到能否探测到目标。如何满足和提高探测灵敏度,成为研制高性能遥感设备设计中的一个重要问题,从光度学和辐射度学原理出发,对空间目标探测信号的强度进行分析、计算。基于目标与噪声的数学表达式,根据经典检测理论推导出天基可见光(SBV)相机的探测灵敏度模型的数学表达式。将美国 SBV 相机参数代入该模型后,计算得到的灵敏度结果(15.55 视星等)与设计指标(15.5 视星等)只相差 0.05 视星等。由此可见该探测灵敏度模型具有相当的精度,可为天基可见光相机的研究设计提供理论参考。

关键词 空间光学;天基可见光相机;探测灵敏度;视星等;光度学

中图分类号 TN911 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20103010.2935

Research on Detection Sensitivity of Space-Based Visible Sensor

Pan Haibin Song Guanghua Xie Lijun Zhu Bo He Lisha Zheng Yao

(Institute of Aerospace Information Technology, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract Along with the development of remote sensing technique, performance demands of load become higher and higher. Especially the detection sensitivity of load is related to the ability of detecting target. How to meet and increase detection sensitivity of load is becoming a problem of developing high-performance remote sensing device. Based on the theories of photometry and radiometry, space target detection signal intensity is analyzed and calculated. According to classical detection theory, the model of detection sensitivity of space-based visible (SBV) sensor is derived based on the mathematical expression of target and noise. By substituting American SBV sensor parameters into the model, the error between calculation result (15.55 visual magnitude) and design specification (15.5 visual magnitude) of detection sensitivity is only 0.05 visual magnitude. This shows that the detection sensitivity model has considerable accuracy, and will provide a theoretical reference for space-based visible sensor research and design.

Key words space optics; space-based visible (SBV) sensor; detection sensitivity; visual magnitude; photometry

1 引 言

美国“空间中段试验”卫星(MSX)上的天基可见光(SBV)相机开辟了天基空间监视的先河,可实现对多种常驻空间目标的搜索、探测、跟踪和数据采集,有效弥补了地基观测的不足^[1~3]。SBV相机作为天基监视网的组网卫星探测系统其性能卓越,已探测发现了大量空间飞行器和空间碎片,同时也是弹道导弹探测和多弹头辨识的有力辅助手段^[3~6]。

SBV相机的探测任务属于点目标探测,是通过

被动探测空间目标反射的太阳光线,完成对其探测、捕获和跟踪。对相机的探测能力的分析和预估,是开展相机系统设计的基本前提之一。相机探测能力主要以相机探测灵敏度来衡量。相机探测灵敏度是指相机系统正确获取目标信息能力的大小。探测灵敏度分为绝对探测灵敏度与相对探测灵敏度,绝对灵敏度是相对灵敏度的极限值。SBV相机探测灵敏度通常指相机能够探测到最弱目标的目视星等,是设计SBV相机的一个关键指标^[7,8]。

收稿日期: 2009-12-30; 收到修改稿日期: 2010-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(61008048)资助课题。

作者简介: 潘海斌(1979—),男,博士,主要从事空间目标检测与红外图像处理方法等方面的研究。

E-mail: phbzll@zju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: ghsong@cs.zju.edu.cn

SBV 相机探测灵敏度除与相机固有的光学系统、CCD 探测器及输出电路有关外,还与图像处理方法有关,可通过增加信噪比,提高探测灵敏度^[9]。本文以美国 SBV 相机为例,通过分析影响 SBV 相机探测灵敏度的信号与噪声成像特性,对 SBV 相机探测灵敏度进行原理研究和理论计算公式的推导,建立 SBV 相机探测灵敏度模型。

2 相机参数

以美国 SBV 相机设计参数为依据研究 SBV 相机探测灵敏度。表 1 给出了美国 SBV 相机设计参数^[10]。

表 1 SBV 相机参数
Table 1 SBV parameter

| Parameter /unit | Value |
|--|-----------------|
| Spectral range / μm | 0.3~0.9 |
| Frame integration time/ s | 0.625 |
| Aperture/ cm | 15 |
| Quantization bits | 12 |
| Potential well depth/ e^- | 1×10^5 |
| Dark current/(e^- /pixel. s@ -40°C) | 18 |
| Quantum efficiency(average) | 27% |
| Output amplifier noise /(e^- RMS@ -40°C) | <6 |
| Camera sensitivity /Vmg | 15.5 |

3 探测灵敏度建模

3.1 目标成像信号电子数计算

SBV 相机对目标的成像过程由光学系统、CCD 探测器等环节组成。因此,影响目标成像信号强度的因素有:目标的星等和光谱,光学系统的入瞳、焦距、光谱透射比,CCD 的量子效率、积分时间、探测波段和光谱响应。图 1 给出了从目标视星等到成像信号电子数的转换关系示意图^[11]。根据图 1 的转

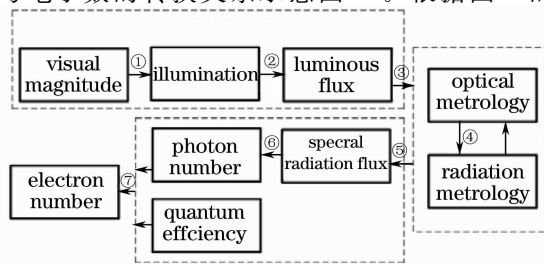


图 1 目标视星等与成像信号电子数的转换关系示意
Fig. 1 Transfer relationship between object visual magnitude and imaging electron number

化关系,其中步骤 1~7 的数学表达式分别为

$$E_t = 10^{0.4(-26.73-m)} E_s, \quad (1)$$

$$F = \pi D_{\text{input}}^2 E_t / 4, \quad (2)$$

$$F = \int_{0.38}^{0.78} F_\lambda d\lambda, \quad (3)$$

$$F_\lambda = K(\lambda) \Phi_\lambda, \quad (4)$$

$$\Phi_\lambda = \Phi_{\lambda_{\text{max}}} \Phi(\lambda r), \quad (5)$$

$$n_v(\lambda) = \Phi_\lambda / h\nu = \frac{\Phi_\lambda \lambda}{hc}, \quad (6)$$

$$n_e = \int_0^\infty n_v(\lambda) \eta_\lambda d\lambda. \quad (7)$$

根据上述公式,当 SBV 相机探测 m 星等目标时,CCD 产生的信号电子数可表示为

$$S_{\text{target}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\pi D_{\text{input}}^2 E_s K_{\text{trans}} \Phi(\lambda r) \eta \lambda s_{\text{int}}}{4 \times 10^{0.4(26.73+m)} h c \int_{0.38}^{0.76} K(\lambda) \Phi(\lambda r) d\lambda} d\lambda, \quad (8)$$

式中 λ_1, λ_2 为相机探测波段上下限; D_{input} 为入瞳直径; E_s 为太阳光照度; K_{trans} 为系统光学透射比,为 0.56 (含 30% 遮拦率); s_{int} 为 CCD 积分时间; η 为 CCD 量子效率,平均值为 0.27; $\Phi(\lambda r)$ 为太阳的相对光谱辐通量函数,如图 2 所示; $K(\lambda)$ 为光谱光视效能函数,表示对应波长为 λ 的单色光辐射通量可以产生多少相应的单色光通量,函数曲线如图 3 所示^[11]; E_t 表示恒星目标在入瞳处的照度; m 表示恒星星等; F_λ 表示光谱光通量; Φ_λ 表示光谱辐射量; $n_v(\lambda)$ 表示 CCD 在单位时间内接受某波长入的光子数; n_e 表示 CCD 像元单位内产生的电子数。

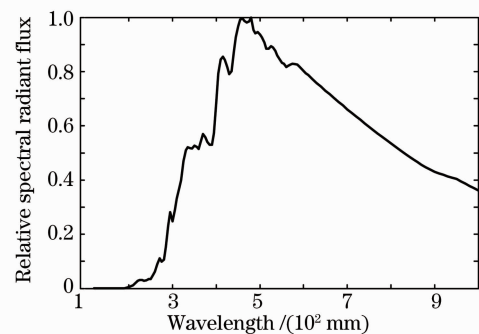


图 2 太阳的相对光谱辐通量曲线

Fig. 2 Curve of relative spectral radiation flux of sun

3.2 天基可见光相机噪声分析

SBV 相机主要噪声分量如图 4 所示^[12,13]。在 SBV 相机探测目标时,相机总的噪声以暗电流噪声、输出噪声、量化噪声与目标辐射光子散粒噪声

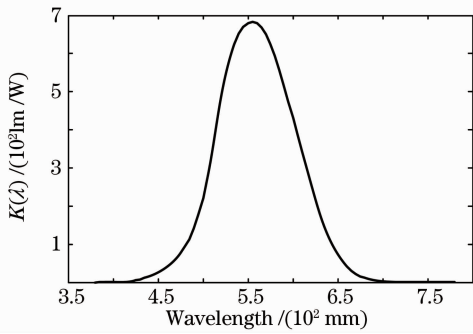


图 3 光谱光视效能曲线

Fig. 3 Curve of spectral luminous efficiency

为主。

1) 暗电流噪声是载流子的热产生而发生的随机过程, 可以用泊松分布描述, 其等值电子数 n_d 等于暗电流产生的电子数 N_d 的平方根, 即 $n_d = \sqrt{N_d}$ 。

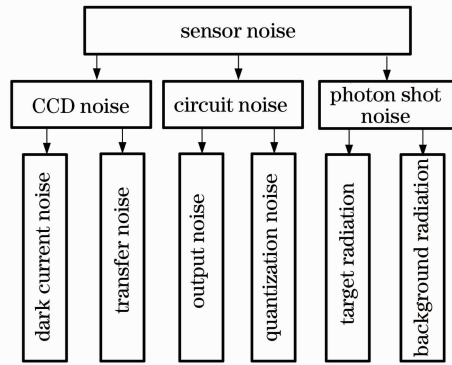


图 4 相机噪声分量

Fig. 4 Sensor noise component

2) 输出噪声属于暂态噪声, 是由于电路通道中各种噪声源(如放大器、可编程增益放大器和模数转换器)引起的信号电平随机波动, 在检测弱光信号时这种噪声对系统的信噪比影响较显著。输出噪声 n_o 可用高斯随机分布描述^[1], 即 $n_o \sim N(0, \sigma_o^2)$ 。在 SBV 相机中 $\sigma_o = 6$ 。

3) 模/数转换电路在将模拟信号转化为数字信号时, 一定范围内的模拟输入信号会产生相同的数字输出, 由此带来的误差称为量化噪声^[14]: $n_q = \frac{n_{well}}{2^N \sqrt{12}}$ 。其中 n_{well} 表示势阱深度, N 表示量化位数。

4) 目标辐射光子散粒噪声起源于入射光子流的随机特性, 遵从泊松分布, 同样是一种白噪声。目标辐射光子散粒噪声 n_{ps} 与目标信号是相关的, 它与信号总电荷数 n_{star} 的平方根成正比, 即 $n_{ps} = \sqrt{S_{target}}$ 。

根据上述几种主要噪声, SBV 相机的噪声模型可表示为

$$n_{SBV} = \sqrt{n_d^2 + n_o^2 + n_q^2 + n_{ps}^2} = \sqrt{N_d + \sigma_o^2 + n_q^2 + S_{target}} \quad (9)$$

3.3 天基可见光相机探测灵敏度模型

由经典检测理论(对应信噪比的门限作为判决有无目标的准则)可知, 实现最佳检测的原则是在一定条件下, 获取最大的探测率和最小的虚警率, 它们与信噪比之间满足一定的关系, 如图 5 所示^[9]。根据经典检测理论, 在给定探测概率和虚警概率的条件下, SBV 相机的检测依据^[9]为

$$R_{sn} = \frac{S_{target}}{n_{SBV}} = \frac{S_{target}}{\sqrt{N_d + \sigma_o^2 + n_q^2 + S_{target}}} \geq T_{sn} \quad (10)$$

式中 R_{SN} 为信噪比(SNR), T_{sn} 为最小可探测信噪比阈值。

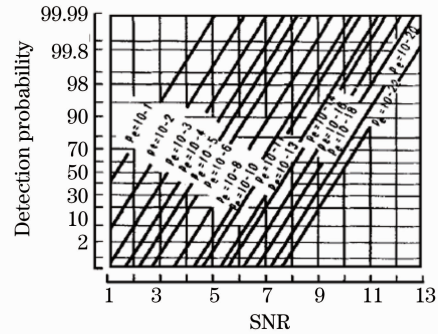


图 5 探测率、虚警率与信噪比的关系

Fig. 5 Relation among detection probability, false-alarm probability and SNR

美国 SBV 相机的探测概率不小于 99%, 虚警率不大于 1%^[15~17]。结合图 5 可知, SBV 相机的信噪比阈值 $T_{sn} = 5$ 。

解(10)式可得

$$S_{target} \geq \frac{T_{sn}^2 + \sqrt{T_{sn}^4 + 4T_{sn}^2(N_d + \sigma_o^2 + n_q^2)}}{2} \quad (11)$$

根据(8)式与(11)式, 可得 SBV 相机探测灵敏度模型数学表达式:

$$m = -26.73 - 2.5 \times \lg \left[\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K(\lambda) \Phi(\lambda r) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda r) \eta_\lambda \lambda d\lambda} \right] \cdot \frac{2hc \left(T_{sn}^2 + \sqrt{T_{sn}^4 + 4T_{sn}^2 \left(N_d + \sigma_o^2 + \frac{n_{well}}{2^N \sqrt{12}} \right)} \right)}{\pi E_s D_{input}^2 K_{trans} s_{int}} \quad (12)$$

4 结果分析

4.1 模型精度分析

将 SBV 相机参数代入本文提出的 SBV 相机探测灵敏度模型,得到的计算结果与美国 SBV 相机的设计指标进行对比,如表 2 所示。

表 2 本文计算结果与 SBV 设计指标对比
Table 2 Comparison of the calculation result and design specification of SBV

| Item | Detection sensitivity (visual magnitude) | SNR |
|--------------------------------|---|-----|
| Design specification of SBV | 15.5 | 5.0 |
| Calculation results | 15.55 | 5.0 |

从表 2 对比中可看出,根据本文的探测灵敏度模型计算得到的探测灵敏度与 SBV 相机的设计灵敏度相差较小(误差 0.05 视星等),由此可得出本文提出的 SBV 相机探测灵敏度模型具有一定的精确性。为了进一步证明模型的精确性,将美国某辅助遥感器参数^[18](如表 3 所示)代入本文模型,计算结果如表 4 所示。

表 3 美国某辅助遥感器参数
Table 3 American auxiliary remote sensor parameters

| Parameter / unit | Value |
|--|-------|
| Optical transmittance | 0.56 |
| Frame integration time/ s | 0.5 |
| Aperture/ cm | 22 |
| Dark current/(e ⁻ /pixel, s@-40 °C) | 18 |
| Quantum efficiency(average) | 66% |
| Output amplifier noise/(e ⁻ RMS@-40 °C) | <6 |
| Camera sensitivity/ Vmg | 17.3 |

表 4 本文计算结果与辅助遥感器设计指标及文献计算结果对比

Table 4 Comparison among the calculation results, design specification of auxiliary remote sensor, and calculation results of the literature

| Item | Detection sensitivity (visual magnitude) | SNR |
|--|---|------|
| Design specification of auxiliary remote sensor | 17.3 | 4.12 |
| Calculation results of the literature ^[18] | 17.4 | 3.5 |
| Fitting results of the literature ^[18] | 17.16 | 4.12 |
| Calculation results | 17.37 | 4.12 |

从表 4 对比中可看出,根据本文的探测灵敏度模型计算得到的探测灵敏度与美国辅助遥感器

计灵敏度相差较小(误差 0.07 视星等),相对于文献[18]提出的计算方法(误差 0.14 视星等)精度提高了一倍。由此可得出本文提出的 SBV 相机探测灵敏度模型具有一定的精确性与合理性。

4.2 相机参数对模型的影响

从(12)式可知,SBV 相机探测灵敏度与量子效率、信噪比阈值、光学系统入瞳孔径、光学透射比及 CCD 积分时间相关。基于美国 SBV 相机的参数,对这些关系进行分析。

1) 灵敏度与平均量子效率的关系如图 6 所示。从图 6 可以看出,平均量子效率与提高探测灵敏度成正相关,并且探测灵敏度的增加幅度随量子效率的增加而减小。

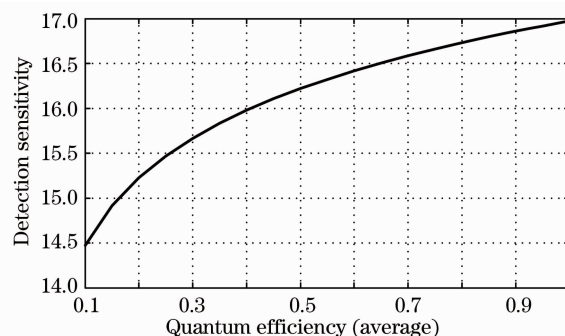


图 6 灵敏度与平均量子效率的关系

Fig. 6 Relation between detection sensitivity and average quantum efficiency

2) 灵敏度与信噪比阈值的关系如图 7 所示。从图 7 可以看出,灵敏度与信噪比阈值成反相关,当信噪比阈值从 5 降低到 2.5 时,探测灵敏度可再提高 1 视星等。信噪比阈值的确定由目标检测算法决定,因此采用好的目标检测算法,可以尽可能降低信噪比,增大相机探测灵敏度。

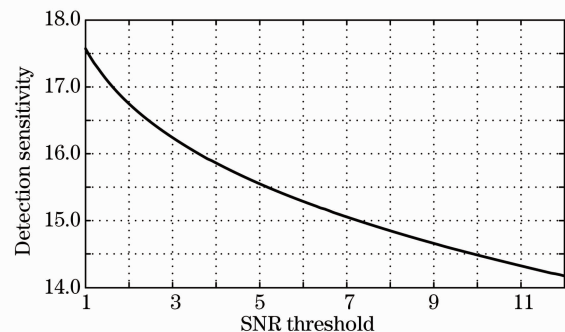


图 7 灵敏度与信噪比阈值的关系

Fig. 7 Relation between detection sensitivity and SNR threshold

3) 灵敏度与相机入瞳孔径的关系如图 8 所示。从图 8 中可以看出,增大相机入瞳孔径可以极大提

高相机的探测灵敏度。当相机入瞳口径从 15 cm 提高到 30 cm 时,探测灵敏度从 15.5 视星等提高到了 17 视星等。

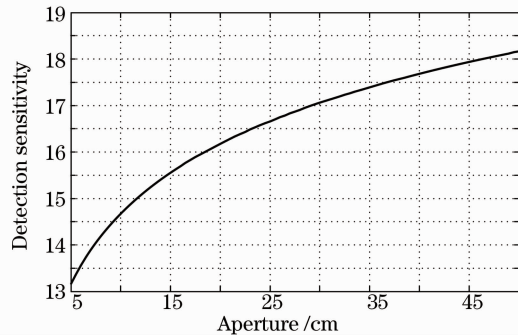


图 8 灵敏度与光学系统入瞳口径的关系

Fig. 8 Relation between detection sensitivity and aperture of optical system's entrance pupil

4) 灵敏度与光学透射比、CCD 积分时间的关系分别如图 9、图 10 所示。从图中可以看出,提高光学透射比与 CCD 积分时间,都可以提高相机探测灵敏度,并且增加趋势相同。

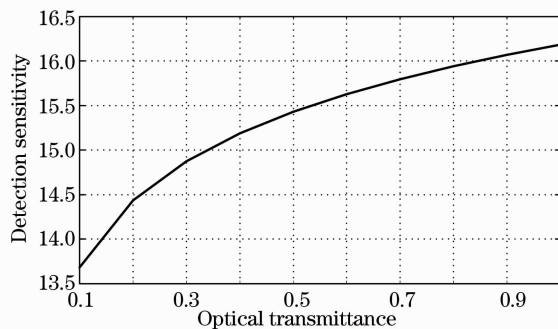


图 9 灵敏度与光学透射比的关系

Fig. 9 Relation between detection sensitivity and optical transmittance

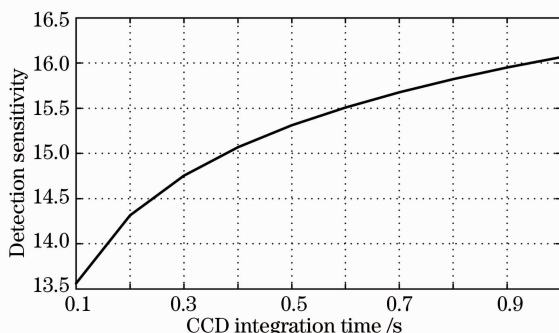


图 10 灵敏度与 CCD 积分时间的关系

Fig. 10 Relation between detection sensitivity and CCD integration time

综合以上分析可知,为有效地提高相机探测灵敏度,应尽量增加相机的入瞳口径、CCD 量子效率、

光学透射比与 CCD 积分时间,降低信噪比阈值。并且对于参数如表 1 所示的美国 SBV 相机来说,进一步提高灵敏度幅度的先后顺序为:入瞳口径>信噪比阈值>量子效率>CCD 积分时间 \approx 光学透射比。

5 结 论

从光度学和辐射度学原理出发,使用新的 SBV 相机探测目标成像信号电子数计算方法,替换以往的目标信号的光子流量密度计算方法,建立了新的 SBV 相机探测灵敏度模型。计算结果表明该模型在精度上有较大的提高,可以更精确地对 SBV 相机探测灵敏度进行分析和预估,指导相机的设计。同时,该模型同样可适用于其他类型的天文探测系统,具有一定的实用性。

从 SBV 相机探测灵敏度模型分析结果来看,为有效地提高相机探测灵敏度,应尽量增加光学系统的入瞳口径与光学透射比、增加 CCD 的量子效率与积分时间,并采用好的目标检测算法以降低信噪比阈值。

参 考 文 献

- Zhou Yiyu, Li Jun, An Wei. Information processing technology in optical space-based space surveillance [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(4): 43~48
周一宇, 李 骏, 安 玮. 天基光学空间目标监视信息处理技术分析[J]. *光电工程*, 2008, **35**(4): 43~48
- Wang Hongyuan, Zhang Wei, Wang Zhile. Visible characteristics of space satellite based on Nth cosine scattering distribution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 594~598
汪洪源, 张 伟, 王治乐. 基于高次余弦散射分布的空间卫星可见光特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 594~598
- Sharma Jayant. Space-based visible space surveillance performance[J]. *J. Guidance, Control, and Dynamics*, 2000, **23**(1): 153~158
- Stokes Grant H, von Braun Curt, Sridharan Ramaswamy *et al.*. The space-based visible program [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 1998, **11**(2): 205~229
- Sharma Jayant, Stokes Grant H, von Braun Curt *et al.*. Toward operational space-based space surveillance[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2002, **13**(2): 309~334
- Qi Changsong, Liu Enhai, Zhong Jianyong. Discussion on space-based deep space small moving target detection [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(5): 29~32
漆长松, 刘恩海, 钟建勇. 天基平台深空运动小目标检测[J]. *光电工程*, 2008, **35**(5): 29~32
- Peng Huafeng, Chen Jing, Zhang Bin. Limited magnitude detectivity of space-based opto-electronic telescope [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(8): 1~5
彭华峰, 陈 鲸, 张 彬. 天基光电望远镜极限星等探测能力研究[J]. *光电工程*, 2007, **34**(8): 1~5
- Liu Jinguo, Li Jie, Hao Zhihang. Study on detection sensitivity of APS star tracker[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(4): 553~557
刘金国, 李 杰, 郝志航. APS 星敏感器探测灵敏度研究[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(4): 553~557

- 9 Yuan Jiahu, Zhang Jianrong, He Shanjin. A study on detection sensitivity of navigation star sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1999, **26**(6): 1~6
袁家虎, 张建荣, 贺善金. 导航星敏感器探测灵敏度研究[J]. 光电工程, 1999, **26**(6): 1~6
- 10 Zhang Keke, Zhou Feng, Fu Danying. Research on space-based space surveillance visible sensor [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2005, **26**(4): 10~13
张科科, 周 峰, 傅丹鹰. 天基空间目标监视可见光遥感器研究[J]. 航天返回与遥感, 2005, **26**(4): 10~13
- 11 Zhang Wei, Pan Haibin, Bao Weizhuo. Digital image generation of star map[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(3): 676~681
张 伟, 潘海斌, 鲍文卓. 星空背景数字图像的生成[J]. 光学精密工程, 2009, **17**(3): 676~681
- 12 Zhang Hui, Zhong Jianyong, Yuan Jiahu. Circuit noise effects on star sensor position accuracy [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(6): 1052~1056
张 辉, 钟建勇, 袁家虎. 电路噪声对星敏感器星点定位精度的影响[J]. 光学精密工程, 2006, **14**(6): 1052~1056
- 13 Zhang Chen, Chen Chaoyang, Shen Xubang. Study on detection sensitivity of an APS star tracker [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(10): 17~20
张 晨, 陈朝阳, 沈绪榜. APS星跟踪器探测灵敏度研究[J]. 光电工程, 2004, **31**(10): 17~20
- 14 Wang Chen, Wang Hongqiang, Chen Minghua. Effect of image processor's noise on magnitude sensitivity of star sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(5): 858~862
王 辰, 王宏强, 陈明华. 成像器噪声对星敏感器星等灵敏度的影响[J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(5): 858~862
- 15 Peter L. Chu. Efficient detection of small moving objects[R]. MIT Lincoln Laboratory. 1989: 3~44
- 16 Peter L. Chu. Optimal projection for multidimensional signal detection[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1988, **36**(5): 775~778
- 17 Pan Haibin, Zhang Wei, Cong Mingyu. Image preprocessing algorithm for space target space-based detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2402~2407
潘海斌, 张 伟, 丛明煜. 一种空间目标在轨检测图像预处理算法[J]. 光学学报, 2009, **29**(9): 2402~2407
- 18 Zhang Keke, Fu Danying, Zhou Feng *et al.*. The study on detect ability calculation method of space object visible camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2006, **27**(4): 22~26
张科科, 傅丹鹰, 周 峰等. 空间目标可见光相机探测能力理论计算方法研究[J]. 航天返回与遥感, 2006, **27**(4): 22~26