

文章编号: 0253-2239(2008)06-1178-05

地基光电系统空间目标探测影响因素分析

张己化^{1,2} 姚东升^{1,2} 谈斌^{1,3}

(¹ 新疆乌鲁木齐 21 信箱 189 分箱, 新疆 乌鲁木齐 841700; ² 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)
³ 石家庄军械工程学院基础部, 河北 石家庄 050003

摘要 光电系统的探测能力主要受探测天域的亮度、光电设备和探测器本身性能的影响, 而探测能力主要是以信噪比来衡量。在综合了上述影响因素基础上, 引入目标成像像元数 N , 给出了探测信噪比的理论公式; 分析了背景亮度、系统参量以及像点弥散对探测能力的影响; 结合实际情况, 给出了目标过境时段的目标探测情况分析, 理论分析得到目标在仰角 30° 左右可以观测, 理论分析结果与实验观测基本一致。因此, 该理论公式可以定量了解不同天空背景亮度、系统设计参量、各种因素引起的像点弥散对系统探测能力影响的大小, 并为系统优化设计与实际工作开展提供一定的科学依据。

关键词 光电探测; 探测能力; 信噪比; 空间目标

中图分类号 TN209 文献标识码 A

Analysis on Effect Factors of Ground-Based Electro-Optic System Detection Ability on Space Object

Zhang Jihua^{1,2} Yao Dongsheng^{1,2} Tan Bin^{1,3}

¹ Mailbox 21 Ext. 189, Urumchi, Xinjiang 841700, China
² Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China
³ Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China

Abstract The detection ability of an electro-optic system is related to sky luminance, the electro-optic (EO) system and detector. The primary specification for expressing detection ability is signal-to-noise ratio. Based on analysis of the effect factors, a calculation formula of detection ability, including the imaging number, is derived. The influence of the sky luminance, parameters of the EO system, and the dispersion of the object on the detection ability is mainly analyzed. Simulation is conducted through an example according to the space object model, and the theoretical results show that the space-object can be detected when elevation is greater than 30° . Theoretical results fit with the experimental research. The effects of sky luminance, parameters of system, dispersion of imaging point on detection ability under different conditions are quantitatively learned. Moreover, the scientific basis for the optimization design of the system and development of practical work is provided.

Key words electro-optic detection; detection ability; signal-to-noise ratio; space object

1 引言

目前白天对遥远星体的观测手段有多种, 由于星体目标本身不发光, 地基光电探测跟踪设备主要依靠目标反射的太阳光进行探测。目标能否被探测到由光电系统的探测能力大小决定, 而探测能力主要以探测信噪比来衡量, 信噪比取决于目标本身的亮度、探测背景条件、探测器性能^[1,2]。

被探测空间目标的亮度特性较为复杂, 主要包括目标的反射^[3]、散射和红外辐射等特性^[4~6]。本

文以人造卫星为代表, 从可见光的角度考察空间目标的亮度特性, 分析在天空背景亮度变化下, 系统对不同类型目标的探测能力以及系统参量和像点弥散对系统探测能力的影响, 分析了目标过境时段的系统探测能力, 给出有效提高系统探测能力的方法。

2 空间目标的亮度计算

人造天体目标一般依靠反射太阳光而本身并不发光, 主要的光谱特性和太阳光的光谱特性一致。

收稿日期: 2007-08-20; 收到修改稿日期: 2007-12-14

作者简介: 张己化(1983—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电探测技术与仿真分析等方面的研究。E-mail: zhjh822@163.com

导师简介: 姚东升(1968—), 男, 研究员, 博士, 主要从事物理电子学方面的研究。E-mail: dsysao1968@163.com

空间目标的辐射亮度来自太阳的辐射,设太阳的光谱辐照度为 $E(\lambda)$, λ 为波长,则空间目标上 dS 面元接收到的太阳辐射为^[7]

$$dF_1 = \int_{\lambda} E(\lambda) dS \cos \phi d\lambda, \quad (1)$$

式中 ϕ 为太阳光方向和面元法线方向夹角,设定面元的漫反射系数为 $\sigma(\lambda)$,则 dS 面元发射光的光通量为

$$dF_2 = \int_{\lambda} \sigma(\lambda) E(\lambda) dS \cos \phi d\lambda, \quad (2)$$

把面元看作为全扩展面,则在法线方向成 θ 角,距离为 R 的地面接收面元 dS' 上的光通量为

$$dF = \frac{\cos \theta}{\pi} \int_{\lambda} \sigma(\lambda) E(\lambda) dS \cos \phi d\lambda dS' \frac{1}{R^2}, \quad (3)$$

对目标在整个被照射面上积分,得到目标光谱特性对应的地面照度为

$$E_i = \frac{\sigma E_0}{\pi R^2} \int_S \cos \theta \cos \phi dS, \quad (4)$$

式中 E_0 为太阳到达地面的照度。

空间目标的几何形状非常复杂,通常有平面、球面、柱面和锥面等组合体构成,所以空间目标的地面照度可以近似表示成

$$E_m = \sum_i E_i, \quad (5)$$

式中 i 为平面、球面、柱面、锥面等。

天文学上,习惯于用视星等来表示天体的亮度。视星等是以人眼对天体进行标定的,两个辐照度相差 100 倍的星体,亮度相差 5 个星等。一般认为太阳的亮度在已知光源中是最亮的,在不考虑大气影响的条件下,即是在大气层外将太阳的星等定为 -26.74 。取太阳为参考星,那么可以得出地球上观测空间目标的视星等大小为

$$M_m = -26.74 - 2.5 \lg(E_m/E_0). \quad (6)$$

3 天空背景亮度计算

白天天空的亮度随天顶距、时间以及与太阳的夹角而变化,天空背景光是地球周围的大气对太阳光、地面反射光散射和折射的综合结果。

大气光学提供的资料表明^[8],白天天空明亮,晴朗天空的亮度一般变化为 $(2 \sim 6) \times 10^3 \text{ cd/m}^2$ 。太阳亮度随着太阳高角和太阳夹角的不同而变化,太阳高角高,夹角小,天空亮度增加,观测仰角增大,亮度减少。

通常把天空亮度换算成视星等来表示,再同以星等表示的空间目标进行比对,根据普森公式,两个天体的星等 m_1, m_2 和亮度 L_1, L_2 ,有如下关系:

$$m_2 - m_1 = -2.5 \lg(L_2/L_1). \quad (7)$$

根据天体光度测量结果得知^[8],大气层外每平方度视等星的亮度为 $8.4 \times 10^{-3} \text{ cd/m}^2$,则可以得到天空亮度在 $(2 \sim 6) \times 10^3 \text{ cd/m}^2$ 之间对应的星等,如表 1 所示。

表 1 天空背景亮度和视星等的对应关系

Table 1 Sky luminance versus star magnitude

Sky luminance / (10^3 cd/m^2)	Star magnitude / (m)
1	5.09
2	4.339
3	3.899
4	3.587
5	3.345
6	3.147
10	2.59

4 探测信噪比的计算

光电系统的探测能力一般用输出信号的信噪比来评定,信噪比定义为输出信号大小除以系统探测噪声的均方根值^[10]:

$$R_{SN} = I_s / (\bar{I}_N^2)^{1/2}, \quad (8)$$

I_s 为 CCD 一个像元的信号电流, $(\bar{I}_N^2)^{1/2}$ 为 CCD 一个像元的噪声电流的均方根值。

假设目标信号集中在探测器上的一个像元上,则可以推导出用光子数表示的探测信噪比的表达式。目标信号的光电子数为^[9]

$$S = \phi_s A_o f_s q_s \tau_o T, \quad (9)$$

式中 ϕ_s 为单位像素上的信号光子流, A_o 为望远镜接收面积, f_s 为系统对目标信号的滤光系数, q_s 为探测器对信号的平均量子效率, τ_o 为光学系统透射率, T 为积分时间。CCD 探测器接收到的背景信号对应的光电子数为

$$B = \phi_b A_o f_b q_b \tau_o T \alpha^2, \quad (10)$$

式中 ϕ_b 为背景光子流, q_b 为探测器对天空背景光的平均量子效率, α^2 为单位像素角面积, f_b 为系统对背景信号的滤光系数。背景信号产生的噪声为

$$S_b = (\phi_b A_o f_b q_b \tau_o T \alpha^2)^{1/2}, \quad (11)$$

单位像素上的信号光子流、背景光子流的大小分别为^[8] $\phi_s = 5.0 \times 10^{10-m/2.5} / \text{photon}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $\phi_b = 5.0 \times 10^{10} / 2.5^m \text{ photon}/[\text{m}^2 \cdot \text{s}(\text{")}]^2$ 。

在不考虑 CCD 转移噪声和热噪声的影响下,则系统信噪比可以表示为^[9]

$$R_{SN} = \frac{\phi_s A_o f_s q_s \tau_o T}{(\phi_b A_o f_b q_b \tau_o T \alpha^2)^{1/2}}, \quad (12)$$

当天体目标像所占像素个数大于 1 个时,对应的信噪比为

$$R'_{SN} = \frac{\phi_s A_o f_s q_s \tau_o T (\alpha^2 / \theta^2)}{(\phi_b A_o f_b q_b \tau_o T \alpha^2)^{1/2}}, \quad (13)$$

式中 θ^2 为目标成像对应 CCD 上的角面积。

将(12)式、(13)式综合为一个公式,利用目标在探测器上成像像元数 N 代替公式中的角面积参量。将光电系统的探测系统等效成一个聚焦系统,点目标成像在理想的情况下成一个点元,但是由于目标的运动和系统的不稳定等参量的变化会引起目标成像产生弥散,致使目标在探测器上成像为一个面元,所占像素的个数为

$$N = \text{ceil}[L/d]^2, \quad (14)$$

式中 $\text{ceil}(\cdot)$ 指将小数部分舍去然后整数部分加 1。 σ_i 为各类弥散角, f 为光电系统等效(组合)焦距, $L = f \cdot \tan \left[2\pi \frac{\sqrt{\sum \sigma_i^2}}{360 \times 3600} \right]$, d 为探测器像元的尺寸。

(14)式讨论的是方形像元,对于非方形像元,同样计算每一个线度上成像像元数目,然后相乘计算出目标在探测器上的成像像元数。

由(13)式、(14)式得到了考虑目标运动造成的像元数变化时的信噪比为

$$R'_{SN} = \frac{(\phi_s A_o f_s q_s \tau_o T / N)}{(\phi_b A_o f_b q_b \tau_o T \alpha^2)^{1/2}}, \quad (15)$$

则系统可探测星等的表达式为

$$m = -2.5 \lg \left[\frac{R'_{SN} (\phi_b f_b q_b \tau_o \alpha^2)^{1/2} N}{(5 \times 10^{10} \sqrt{A_o T f_s q_s \tau_o})} \right]. \quad (16)$$

5 影响因素分析

计算采用折反式光学系统^[10],口径为 650 mm,透射率大于 0.8,组合焦距为 3000 mm。探测器的像元数为 512 pixel \times 512 pixel,像元尺寸为 16 μm ,饱和电子数为 220 Ke,光谱响应 400~800 nm。

测量条件:天气晴朗,方位角以正北为零点,向东为正;在天空背景亮度在 $(2 \sim 6) \times 10^3 \text{ cd/m}^2$ 之间,对应为 3.2^m~4.3^m 星等。大气抖动 2",光学系统的镜头的衍射角弥散为 0.31"。目标在 CCD 靶面上的几何张角为 0.7"。要保证探测概率在 95% 以上,稳定跟踪提取所需要的最低信噪比为 6。为了表示方便,下面用 W_1 表示天空背景亮度。

5.1 环境影响

根据探测能力表达式,假设目标成像像元数为

一个像元时,可得到不同天空背景条件下系统的极限探测能力。

从表 2 可见,在系统的其他参量保持不变的条件下,天空背景每增加一个星等亮度,相应的系统探测能力下降 0.5^m~0.6^m 左右星等,这个结果和参考文献[10]的结论基本一致。

表 2 不同的背景亮度下系统极限探测能力

Table 2 Detection ability limit of system at different background luminance

$W_1 / (10^3 \text{ cd/m}^2)$	Detection ability limit / (^m)
1	9.90
2	9.50
3	9.27
4	9.12
5	9.00
6	8.91

5.2 系统参量影响

系统的极限与实际探测能力受系统的通光面积、积分时间、系统的视场、CCD 的量子效率和光谱区段等系统参量的影响。

系统口径的选择与探测技术的要求和探测器灵敏度相匹配,一般系统探测口径越大,能够探测到的极限星等越高。但是白天探测空间目标是一个复杂技术,实际上口径尺寸增大时,探测器饱和等也会导致对比度的损失,所以要综合考虑来确定系统的探测口径大小^[7]。

仅考虑在系统相对孔径且其他系统参量保持不变的情况下,即保证目标的成像照度信息不变,根据系统的探测能力表达式(16),可知系统口径对探测能力的影响。

图 1 给出了系统在探测信噪比为 6 的条件下,系统极限探测能力随着系统探测口径变化图。可见,在一定范围内,实际光电探测系统要增加一个星

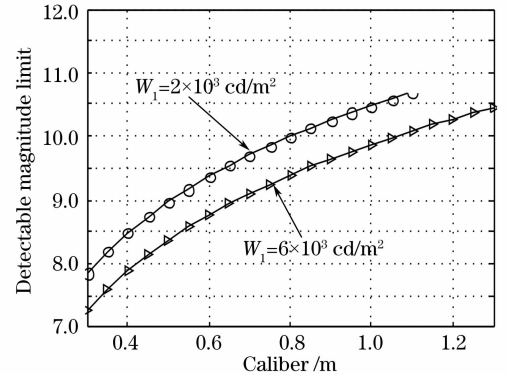


图 1 在不同的背景亮度下系统口径对应的系统探测能力

Fig. 1 Detection magnitude limit versus system caliber at different background luminance

等探测能力,探测系统口径要相应增加 1.5 倍左右。

5.3 像点弥散影响

空间目标的像点弥散对光电系统的探测能力影响较大,像点弥散主要包括以下几个方面^[10,11]:

- 1) 大气抖动引起的弥散,在白天一般为 2"~3";
- 2) 目标像点相对运动引起的弥散,探测器与目标的相对运动主要取决于系统的跟踪误差部分,包括系统误差和随机误差,跟踪的系统误差对像点弥散的影响相对较小,但是跟踪过程中的随机误差对像点弥散的影响较大;

3) 光学系统产生的像点弥散,这主要是弥散效应,光学系统成像质量和加工、调整等因素引起,一般经过精心设计和装调,光学系统的总弥散可以控制在 1"~2";

4) 光学系统的几何张角,与系统的参量和目标几何特性及距离有关,一般在 0.5"。

图 2 给出了系统在跟踪过程中的随机误差对系统探测能力的影响,可见系统在跟踪过程中的一系列的像点弥散量对系统的探测能力影响较为显著。从信噪比计算公式可知,各种引起像点弥散的因素对系统的探测能力的影响是一致的,探测能力是和探测器上的成像像元数成反比,而像元数是整数型的,所以实际系统的探测能力随系统的跟踪误差等变化是阶梯下降的。图 2 是为了方便说明问题,给出了平滑后的曲线。

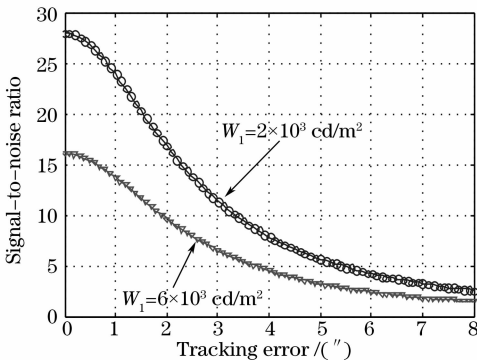


图 2 在不同背景亮度下系统的跟踪随机误差对信噪比的影响

Fig. 2 Signal-to-noise ratio versus tracking stochastic error at different background luminance

在弥散分类中,由于跟踪系统的随机误差是相对大量和不稳定量,对系统探测跟踪性能影响也相对重要。图 3 给出了系统在跟踪随机误差为 3"时,探测能力随目标视星等的变化曲线。

表 3 给出了在天空背景亮度从 1 × 10³ cd/m² 变化到 6 × 10³ cd/m² 时,系统对静态和动态目标的

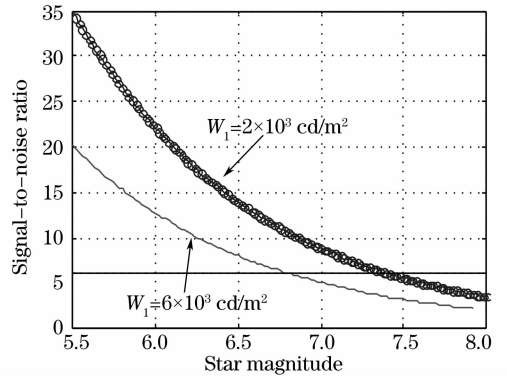


图 3 跟踪随机误差为 3"时,信噪比随目标视星等变化曲线
Fig. 3 Signal-to-noise ratio versus satellite magnitude when tracking error is 3"

探测能力计算结果情况。

表 3 在不同的背景亮度下对应的系统探测能力
Table 3 Detection ability of system under different background

$W_1 / (10^3 \text{ cd/m}^2)$	Stellar detectable	Satellite detectable
	magnitude / (m)	magnitude / (m)
1	8.36	6.85
2	8.00	6.47
3	7.76	6.25
4	7.61	6.09
5	7.49	5.96
6	7.38	5.87

由表 2 可知,假设目标能量集中在一个像元内,系统本身具备了非凡的极限探测能力,即系统的极限探测能力一般在 9^m 星等以上,有的接近于 10^m 星等。但是由于像点的弥散影响,目标能量不可能集中在一个像元尺寸。像点弥散导致目标成像像元数增加,目标成像能量分散,信噪比和对比度均降低。从表 3 可见,卫星的探测能力相对恒星的探测能力下降了 1.5^m 星等左右,主要影响因素是由于目标的运动,跟踪不平稳等引起的像点弥散导致目标成像像元数增加。

5.4 空间目标过境实际探测能力分析

根据特定的空间目标特性分析,包括目标运动特性、几何形状和物理特性,对空间目标的运动特性建模和目标视星等计算,并结合目标-观测站-太阳等相对空间关系可得到目标在一次过境时,星等随着观测俯角的变化曲线,如图 4 所示。

在没有考虑大气对目标视星等的影响条件下,目标的变化趋势如图 4 所示;在目标姿态不发生调整下,低仰角观测时,由于目标距离较远,目标亮度较低,视星等值较高,随着观测仰角增大,目标亮度增大,星等降低;随着目标的继续过境运动,亮度又

逐步下降,星等数变大。通常情况下目标亮度在航

捷点附近达到最大。

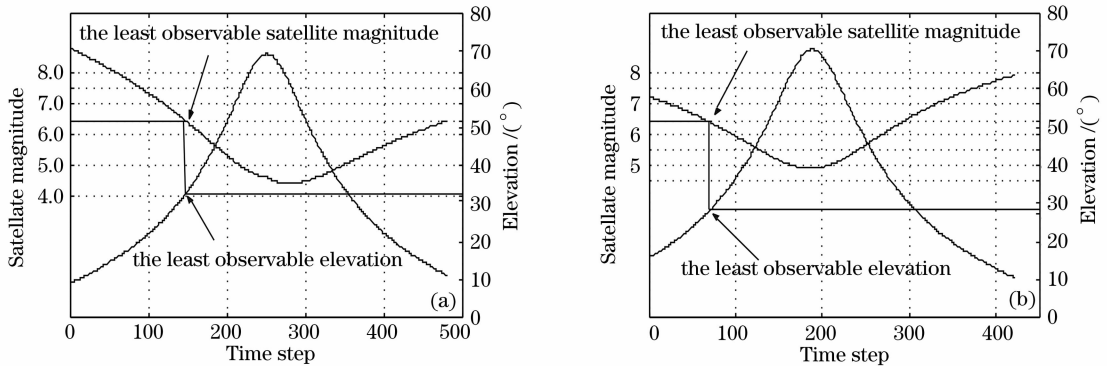


图 4 等效星等随俯仰角变化图。(a) 上午, (b) 下午

Fig. 4 Satellite magnitude as a function of elevation, (a) ante meridian, (b) post meridian

由目标的一次过境过程星等随仰角的变化,结合表 3 中系统的探测能力对比分析可见,在目标低仰角,由于目标距离较远,亮度较低;以观测天空背景亮度为 $2 \times 10^3 \text{ cd/m}^2$ (4.3^m 等星) 为例,从表 3 对应的探测能力表和图 4 可知,在目标的观测仰角在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 左右才可以观测,若考虑到大气传输和天空背景起伏的影响,目标亮度实际上要小一些,可观测最低仰角应该在 30° 左右,这个仿真结果与实验观测基本吻合。

6 结 论

通过对空间目标特性、天空背景特性分析的基础上,给出了系统探测能力的理论公式,并将目标成像像素数引入信噪比的计算公式;分析了天空背景亮度、系统特性参量(系统口径)以及目标成像的像点弥散对系统探测能力的影响;结合实际,计算了在特定参量下系统对不同类型目标的探测能力(可探测最低星等),在对空间目标亮度与运动特性仿真,给出了目标过境时段的目标探测情况分析。分析结果表明理论模拟结果和实验观测基本吻合。

系统探测能力主要是受强背景下目标的高速运动造成的低对比度和低信噪比影响,要想提高对目标观测的信噪比和对比度,就必须有效地抑制系统跟踪过程中的随机误差和减少光电接收器接收到的背景辐射光。下一步通过预测滤波技术抑制系统跟踪过程中随机误差,通过恒星和卫星的探测极限分析可知改善跟踪系统的随机误差是对提高系统探测能力的一个重要途径;采用滤波技术,包括光谱滤波技术和空间滤波技术,最大限度地减少光电接收器接收的背景辐射光子,抑制 CCD 饱和,同时尽量少衰减目标信号,提高探测信噪比和对比度。

参 考 文 献

- Zhang Keke, Zhou Feng, Fu Danying *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
- Yuan Jiahu, Gao Xiaodong. Analysis on detection ability of CCD EO system limited by noise [J]. *J. Data Acquisition & Processing*, 1998, **13**(suppl.): 79~82
袁家虎,高晓东. CCD 光电系统噪声受限的探测能力分析[J]. *数据采集与处理*, 1998, **13**(增刊): 79~82
- Shen Feng, Jiang Wenhan. Evaluation of ground spectrum characteristics and star magnitude of spatial object [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 1996, (4): 13~17
沈峰,姜文汉.空间目标的地面光谱照度和星等估计[J]. *中国空间科学技术*, 1996, (4): 13~17
- Wu Zhensen, Dou Yuhong. Visible light scattering and infrared radiation of spatial object [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1250~1254
吴振森,窦玉红.空间目标的可见光散射与红外辐射[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1250~1254
- Wu Zhensen, Dou Yuhong. Visible-light scattering and infrared radiation from spatial object [J]. *Applied Optics*, 2004, **25**(1): 1~4
吴振森,窦玉红.空间目标的可见光散射与红外辐射[J]. *应用光学*, 2004, **25**(1): 1~4
- Li Tie, Yan Wei, Wu Zhensen. Optimize parameter of BRDF model and calculation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 769~773
李铁,阎伟,吴振森.双向反射分布函数模型参量的估计与计算[J]. *光学学报*, 2002, **22**(7): 769~773
- Li Bincheng. Optical characteristic analysis of space target [J]. *Optic Electronic Engineering*, 1989, (2): 21~26
李斌成.空间目标的光学特性分析[J]. *光学工程*, 1989, (2): 21~26
- E. W. Rork, S. S. Lin, A. J. Yakutis. Ground-Based Electro-Optical Detection of Artificial Satellites in Daylight from Reflected Sunlight [R]. USA: Air Force Research Laboratory, 1982
- Wan Min, Su Yi, Yang Rui *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
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
- Wang Weiguo. Research of space object detecting under bright background [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics and Physics, 2005
王伟国.空间目标白天光电探测技术研究[D]. 长春:长春光学精密机械与物理研究所, 2005
- Wang Weiguo, Chen Tao, Zhang Tongshuang *et al.*. The research for effective distance of TV system on a theodolite [J]. *Chin. J. Scientific Instrument*, 2005, (8): 68~70
王伟国,陈涛,张同双等.电视成像系统作用距离分析[J]. *仪器仪表学报*, 2005, (8): 68~70