

文章编号: 0258-7025(2010)07-1756-06

# 基于四象限探测器的光斑检测跟踪技术

赵 馨 佟首峰 刘云清 宋延嵩 姜会林

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要** 主要解决空间激光通信精跟踪系统光斑实时检测与跟踪的问题。针对四象限探测器的特点,使用两级增益放大、数字信号处理(DSP)、振镜等系统,完成光斑实时检测与跟踪。对系统组成原理与设计原理进行了详细论证。搭建实验系统完成了相关实验。实验表明在入射光功率为  $1.3 \mu\text{W}$  时,四象限探测器可实现位置分辨率  $1.6 \mu\text{m}$ , 角度分辨率  $0.8 \mu\text{rad}$ ,在整个光敏面内具有 80 细分的能力,跟踪精度在 1 倍方差时为  $2.1 \mu\text{rad}$ 。系统设计时以 DSP 作为数据处理与控制系统核心,具有体积小、参数修改方便和便于工程化等优点。

**关键词** 空间激光通信;四象限探测器;光斑脱靶量;检测与跟踪;数字信号处理

中图分类号 TN929.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103707.1756

## Technology on Spot Detection and Tracking Based on Four-Quadrant Detector

Zhao Xin Tong Shoufeng Liu Yunqing Song Yansong Jiang Huilin

(College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract** The problems of spot detection and tracking in fine tracking of space laser communication systems are researched. According to the characteristics of four-quadrant detector, the spot detection and tracking system is designed by using two band amplification, digital signal processing (DSP) system, fast-steering mirror etc. The principles of composition and design are studied in detail. A testing system is set up, which can prove by experiment that when the incident power is  $1.3 \mu\text{W}$ , the position resolution of  $1.6 \mu\text{m}$ , angle resolution of  $0.8 \mu\text{rad}$ , and subdivision of 80 in photosensitive surface can be achieved. And the tracking precision is up to  $2.1 \mu\text{rad}$  in one time variance at the conditions of high signal-noise ratio. With digital signal processing used as the core in data processing and control system, this system has many advantages such as small size, convenience to modify parameters, and engineering etc.

**Key words** space laser communications; four-quadrant detector; miss distance of laser spot; detection and tracking; digital signal processing

## 1 引 言

由于自由空间激光通信具有通信容量大、传输速率高、隐蔽性好和抗干扰能力强等优点,因而具有广泛的发展前景。捕获、对准、跟踪(APT)子系统是空间激光通信系统的重要组成部分,其主要功能是完成快速、高概率视轴捕获(粗跟踪)及动态环境

下的高精度视轴跟踪(精跟踪)<sup>[1]</sup>。精跟踪系统对光斑检测精度与跟踪精度要求非常高,一般要求检测精度控制在  $1 \mu\text{rad}$  以内,才能保证其跟踪精度为几个微弧度<sup>[2]</sup>。

由于四象限探测器具有较高的灵敏度和位置分辨率、光谱范围宽、体积小、响应快和动态范围宽等

收稿日期: 2009-08-17; 收到修改稿日期: 2009-11-09

基金项目: 国家 863 计划(2003AA712014)资助课题。

作者简介: 赵 馨(1977—),男,博士研究生,讲师,主要从事空间光通信和光电检测等方面的研究。

E-mail: gps.ins@163.com

导师简介: 姜会林(1945—),男,教授,博士生导师,主要从事空间光通信和光学设计等方面的研究。

E-mail: hljiang@163.com

特点,因而在精跟踪和提前量检测中得到应用,例如日本 NASDA 研制的星地激光通信实验(LCE)系统使用四像限探测器完成光斑检测,使用快速倾斜镜(FSM)作为伺服执行机构完成光斑跟踪,使用模拟电路实现比例、积分(PI)控制。另一个主要原因是当激光通信选用 1550 nm 波段的光波作为通信光和信标光时,由于 CCD 器件受到限制,四像限探测器则是可选用的器件之一。同时应用此波段光波可实现通信光和精信标光共用同一光路,这对减小系统体积及重量十分有效。四像限探测器使用时需要注意大气湍流对其的影响,尤其是通信的水平链路。当链路大到一定的距离时,由于湍流引起的光强闪烁将造成光斑检测失效,有实验证明当水平距离为 12.5 km 时,四像限探测器已经失去光斑检测功能,而日本的 LCE 系统通信链路为垂直链路,这个链路大气湍流闪烁对四像限探测器影响很小。可以看出,四像限探测器应用于光斑检测时,适用于星间环境或是大气链路垂直环境,这点在系统设计时需要充分考虑<sup>[3,4]</sup>。本文所要研究的主要问题是光斑检测、跟踪系统设计,同时在设计时考虑系统小型化、

工程化等要求,在此基础上进行了相关实验。

## 2 系统组成原理

根据四像限探测器的特点设计光斑检测与跟踪系统,如图 1 所示。系统由四像限探测器、放大增益电路、模拟/数字(A/D)转换、数字信号处理(DSP)系统、数字/模拟(D/A)转换、功率放大、压电陶瓷(PZT)振镜等单元组成。实际应用中四像限探测器使用红外波段,典型应用为 800 nm 波段和 1550 nm 波段,为方便实验观测及操作,选用 532 nm 波长的激光器作为光源,四像限探测器采用可见光波段的 s4349。考虑检测到光信号的功率一般是波动的,使用两级放大系统,初级放大为 I-V 转换,设计时需要合理选用放大器及综合考虑电磁干扰布置印制电路板(PCB)走线,次级放大为可变增益放大,根据光功率的变化自动调整系统增益,防止光强饱和和效应出现。DSP 为系统数据处理系统,并完成相应控制功能。PZT 振镜为系统伺服执行机构<sup>[5~7]</sup>。

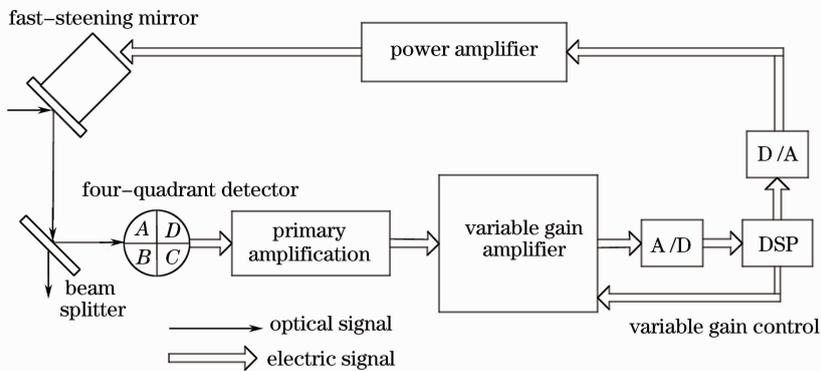


图 1 精跟踪系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fine tracking system

## 3 光斑检测及跟踪实现

### 3.1 放大增益

放大增益为两级放大系统,初级增益为 I-V 转换,核心问题是保证高带宽的条件下对有用的微弱信号放大。增益噪声主要来自 3 个方面,放大器噪声电压密度、噪声电流密度和电阻温度噪声。前两项是选用放大的标准之一。电阻噪声与阻值的根号成正比,而信号与阻值成正比,一般都要求反馈电阻的阻值取得很大。放大器选用的另一个主要标准是带宽增益积一定要高,初级增益固定在  $10^6 \sim 10^7$ 。当激光在大气中传输时,受到大气湍流运动的调制,

探测器接收到的信号从几赫兹到几百赫兹变化,放大器带宽需高于湍流运动速度。所以放大器选用带宽增益积为 1.6 GHz,偏置电流为 2 pA 的 OPA657,可将纳瓦级功率的光信号转换为毫伏级的电压信号(转换后的电压信号应该大于放大器的偏置电压 10 倍以上)。次级增益为可变增益放大,完成将毫伏级的电压信号转换为伏级信号,便于后续处理。

### 3.2 A/D 采样

需将四像限探测器输出的模拟信号转换为数字信号便于后续处理,为满足整个系统的带宽要求,采

样速率要求大于 10 kHz。

### 3.3 数字信号处理器

为减小系统体积,便于工程化实现,选用 DSP

器件 TMS320F2812 作为核心处理器,完成数字滤波、自动调整增益控制、质心计算和数字控制补偿函数等相关功能,其内部功能框图如图 2 所示。

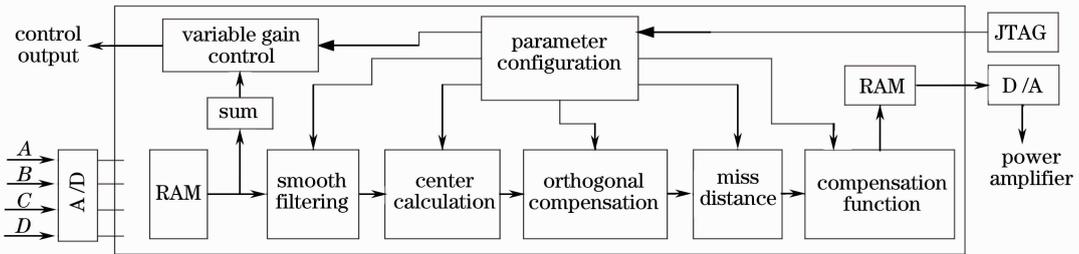


图 2 DSP 内部功能结构框图。RAM:随机存储器;JTAG:联合测试工作组

Fig. 2 Internal functional block diagram of DSP. RAM: random-access memory; JTAG: jointest action group

#### 3.3.1 数字滤波

四象限探测器检测光斑,其输出为模拟信号,噪声直接影响四象限探测器的光斑检测精度与细分能力,必须对噪声进行有效处理才能提高光斑检测精度,进而提高器件细分能力,使用数字滤波完成对噪声处理,5阶数字滤波差分方程为

$$y(n) = \frac{1}{5}[x(n) + x(n-1) + x(n-2) + x(n-3) + x(n-4)], \quad (1)$$

工作时可根据需要调整滤波阶数。

#### 3.3.2 质心计算

四象限探测器使用光斑质心算法<sup>[7,8]</sup>,只能按其能量分布形式进行光斑中心计算,其公式为

$$E_x = \frac{A + D - B - C}{A + B + C + D}, \quad E_y = \frac{A + B - C - D}{A + B + C + D}, \quad (2)$$

式中  $E_x, E_y$  表示位置误差信号,  $A, B, C, D$  表示象限探测器输入 4 路光能量转换为光电流信号大小。

#### 3.3.3 可变增益控制

在次级增益系统中使用可编程增益放大器(VGA),将探测器输出 4 路“和”信号( $A+B+C+D$ )作为反馈量来控制系统增益,当“和”信号大于设定阈值时,通过 DSP 发出指令连续控制可变增益放大器,使其放大倍数降低,自动调整系统增益。

#### 3.3.4 正交补偿

四象限探测器在机械安装时很难保证 4 个象限的完全正交性,这必然会对检测精度造成影响,同时有可能引起伺服系统的不稳定,造成系统振荡。可以在其内部设计正交补偿矩阵,通过数字补偿的方式进行校正,正交补偿矩阵为

$$C_N = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $\alpha$  为补偿角。

#### 3.3.5 脱靶量输出

计算后的光斑中心脱靶量经过补偿控制函数后通过 RS485 输出,送伺服系统,实时调整视振镜的偏转角度,完成精跟踪。工程上一般要求脱靶量输出速率优于 3 kHz,才能保证伺服系统带宽优于 300 Hz。

#### 3.3.6 控制补偿函数

与 LCE 系统使用模拟 PI 控制不同的是,本系统采用变结构数字控制补偿<sup>[9-12]</sup>。伺服控制为 I 型系统,设计时首先要对输入信号进行谱分析,确定需要抑制的频率段,然后根据控制带宽、闭环频率响应峰值等指标设计 I 型系统的各个转角频率,根据转角频率值给出模拟伺服控制函数,对模拟控制函数进行仿真分析发现,开环控制函数带宽优于 300 Hz,相位稳定裕度优于  $70^\circ$ ,符合带宽与稳定型要求。对模拟控制函数数字化得到数字控制补偿函数

$$H(z) = \frac{0.5844z^2 - 1.041z + 0.4585}{z^3 - 2.739z^2 + 2.479z - 0.7397}. \quad (4)$$

### 3.4 D/A 及功率放大

振镜驱动电压为模拟信号,经过 D/A 将 DSP 输出数字信号转换为模拟信号。将此模拟信号进行功率放大后可以驱动振镜工作。功率放大主要指标为:输出电压为  $-20 \sim 120$  V;输出平均功率为每通道 30 W;峰值功率为 200 W;控制输入电压为  $-2 \sim 12$  V。

### 3.5 PZT 振镜

在光斑跟踪系统中,伺服执行器件要求具有响应时间短、跟踪精度高的特点。目前执行器件一般都采用振镜,本系统选用 PI 公司的 E-500。其开环角度范围为  $-2.5 \sim 2.5$  mrad;角度分辨率为  $0.1 \mu\text{rad}$ 。

### 4 实 验

搭建座面实验系统测试光斑检测精度与跟踪精度，系统由发射端与接收端两个部分构成，其原理框图如图 3 所示。发射端由激光器、两级扩束系统、可变光阑、振镜和计算机等构成，通过计算机模拟卫星振动功率谱，控制振镜模拟卫星振动将光束发射出去；接收端模拟粗精复合轴，完成光斑检测与跟踪，由接收光学系统(模拟卡式系统)、粗跟踪系统(由粗振镜、粗跟踪 CCD 相机、图像处理器 FPGA 等组成)、精跟踪系统(与图 1 结构相同，只是增加了监视 CCD 相机便于光斑监视与数据处理分析)等部分构成<sup>[13]</sup>。

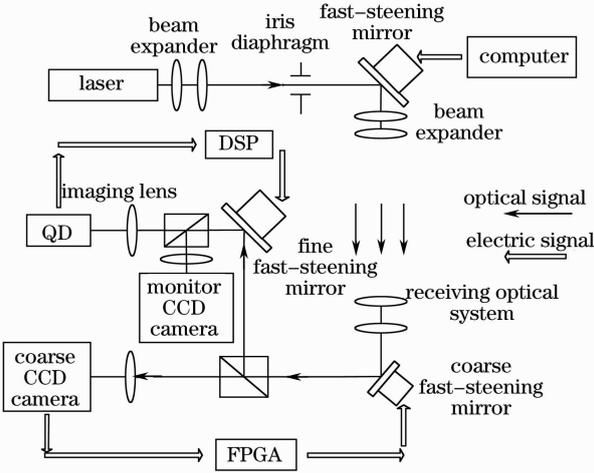


图 3 实验系统组成示意

Fig. 3 Block diagram of experimental system

#### 4.1 光斑检测精度

光斑检测精度<sup>[14]</sup>测试条件为夜晚室内(实测背景光的功率基本为零)，光斑大小为探测器光敏面的一半。图 4 给出输入光信号的功率为 40 nW 时光斑检测极限灵敏度噪声曲线，从图 4 中可以看出噪声占整个光敏面的 0.8 左右(整个光敏面为 2)，则光斑只能实现 2 细分，检测精度很差；图 5 给出输入光信号功率为 1.3 μW 时的噪声曲线，从图中可以看出噪声占整个光敏面的 0.025，则在整个光敏面内可以实现

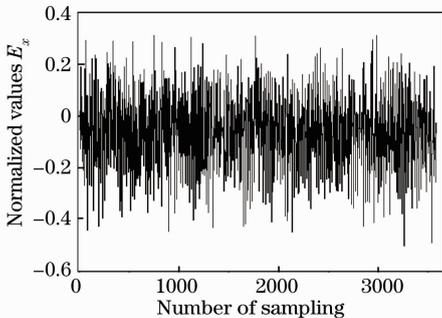


图 4 极限灵敏度噪声测试

Fig. 4 Test on limit sensitivity noise

80 细分，表明当信噪比提高到约 32 倍时，细分能力提高为原来的 40 倍，光斑细分能力提高，四像限探测器的线性范围增大。图 6 给出在高信噪比条件下对四像限探测器细分能力的测试曲线。

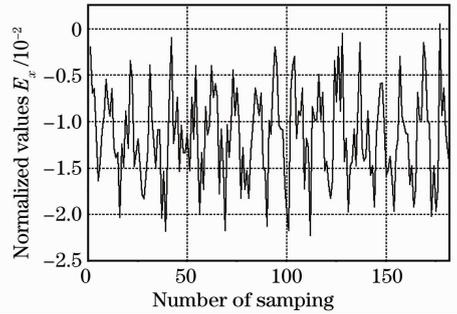


图 5 高信噪比测试

Fig. 5 Test on high signal-to-noise ratio

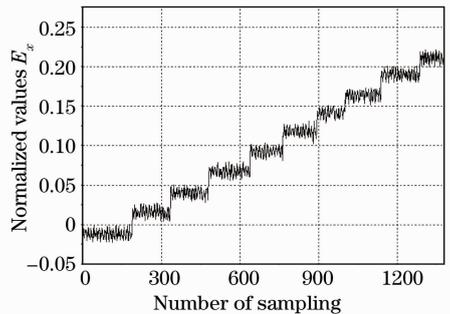


图 6 细分能力测试

Fig. 6 Test on subdivision capability

在高信噪比条件下使用振镜对位置分辨率及角度分辨率进行测试，振镜转动范围为 -2.5 ~ 2.5 mrad(0~100 V)，成像系统焦距为 300 mm，实验时振镜最小输入电压为 0.0527 V，经过换算可知最小位置分辨率为 1.6 μm。在空间激光通信系统中对光斑检测精度，一般优于 1 μrad，如果采用焦距为 2 m 的卡式系统，角度分辨率为 0.8 μrad，符合空间激光通信对光斑检测精度的要求。

#### 4.2 光斑跟踪精度

发射端模拟卫星振动，接收端使用粗精复合系统对光斑进行跟踪<sup>[15,16]</sup>，图 7 给出监视 CCD 相机粗精复合轴系统光斑实时脱靶量数据，数据前半端为经过粗跟踪后的脱靶量数据，后半端为经过精跟踪后的脱靶量数据。图 8 给出后半段精跟踪光斑脱靶量数据放大结果。

对图 8 光斑脱靶量进行数据统计，统计结果如表 1 所示，从表中可以看出峰峰值对应 3.4 pixel；3 倍方差对应 2 pixel，2 倍方差对应 0.9 pixel，1 倍方差对应 0.7 pixel。系统像元分辨率为 3 μrad(相机像元尺

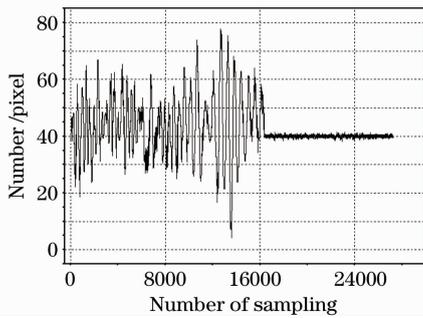


图 7 监视相机光斑脱靶量

Fig. 7 Miss distance of the laser spot from monitor CCD camera

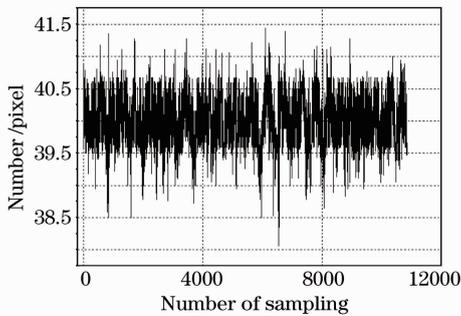


图 8 精跟踪光斑脱靶量

Fig. 8 Miss distance of the laser spot from fine tracking 寸  $10.6 \mu\text{m}$ , 卡式系统放大倍数 12 倍, 二次物镜焦距 300 mm), 所以系统跟踪精度为: 峰峰值时跟踪精度为  $10.2 \mu\text{rad}$ ; 3 倍方差时跟踪精度为  $6 \mu\text{rad}$ , 2 倍方差时跟踪精度为  $2.7 \mu\text{rad}$ , 1 倍方差时跟踪精度为  $2.1 \mu\text{rad}$ 。图 9 给出数据统计直方图。

表 1 数据统计结果

Table 1 Statistical results

| Value | Count | Count sum | Percentage sum /% |
|-------|-------|-----------|-------------------|
| 38.1  | 1     | 1         | 0.00921           |
| 38.3  | 1     | 2         | 0.01843           |
| 38.5  | 9     | 11        | 0.10136           |
| 38.7  | 16    | 27        | 0.24880           |
| 38.9  | 36    | 63        | 0.58054           |
| 39.1  | 135   | 198       | 1.82455           |
| 39.3  | 168   | 366       | 3.37265           |
| 39.5  | 1590  | 1956      | 18.02433          |
| 39.7  | 1982  | 3938      | 36.28824          |
| 39.9  | 1171  | 5109      | 47.07888          |
| 40.1  | 2547  | 7656      | 70.54921          |
| 40.3  | 1396  | 9052      | 83.41320          |
| 40.5  | 1134  | 10186     | 93.86288          |
| 40.7  | 564   | 10750     | 99.06008          |
| 40.9  | 52    | 10802     | 99.53926          |
| 41.1  | 38    | 10840     | 99.88942          |
| 41.3  | 11    | 10851     | 99.99079          |
| 41.5  | 1     | 10852     | 100               |

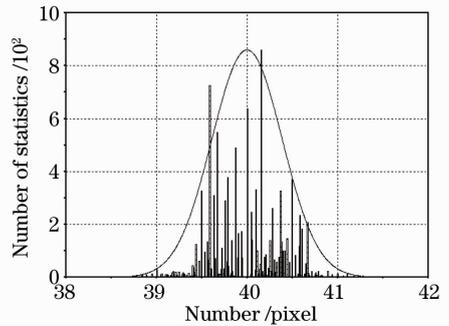


图 9 数据统计直方图

Fig. 9 Statistics histogram

## 5 结 论

四像限探测器在空间激光通信精跟踪系统及提前量检测系统中得到应用, 针对其器件特点设计了一种光斑的实时检测与跟踪系统, 实验表明本系统符合空间激光通信系统对光斑检测及跟踪精度的要求。实际中主要完成以下工作: 1) 设计实现了高精度光斑检测电路; 2) 采用具有自动调整功能的放大系统, 满足了光斑检测的实时性要求; 3) 以 DSP 作为核心单元, 完成数据处理与补偿控制, 实现了小型化设计的要求, 便于工程应用; 4) 设计了数字补偿控制器, 满足系统带宽与稳定性的要求; 5) 搭建实验系统完成检测精度、细分能力和跟踪精度等测试。

## 参 考 文 献

- Zhao Xin, Wang Shifeng, Tong Shoufeng *et al.*. Initial alignment of antenna for laser communication system between aircraft and a ground station [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(7): 1190~1195
- 赵馨, 王世峰, 佟首峰等. 飞机-地面间激光通信天线的初始对准[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(7): 1190~1195
- M. Jeganathan, A. Portillo, C. Racho *et al.*. Lessons learnt from the optical communications demonstrator (OCD) [C]. *SPIE*, 1999, **3615**: 23~30
- Toni Tolker, Nielsen, Gotthard Oppenhaeuser. In orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX[C]. *SPIE*, 2003, **4635**: 1~15
- T. Y. Yan, M. Jeganathan, J. R. Lesh. Progress on the development of the optical communications demonstrator [C]. *SPIE*, 1997, **2990**: 94~101
- V. Nikulin, R. Khandekar, J. Sofkaa *et al.*. Acousto-optic pointing and tracking systems for free-space laser communications [C]. *SPIE*, 2005, **5892**: 58921C
- Gerardo G. Ortiz, Shinhak Lee, Steve Monacos *et al.*. Design and development of a robust ATP subsystem for the altair UAV-to-ground lasercomm 2.5 Gbps demonstration[C]. *SPIE*, 2003, **4795**: 103~114
- Eric Saint Georges, John Sender, Gennady *et al.*. Free-space optical communication beam acquisition and tracking optimization with 8-segments PSD and small spot size[C]. *SPIE*, 2007, **6709**: 670909
- Han Cheng, Bai Baoxing, Yang Huamin *et al.*. Study four-

- quadrant detector in the free space laser communication [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2030~2034
- 韩 成, 白宝兴, 杨华民等. 自由空间激光通信四像限探测器性能研究[J]. 中国激光, 2009, **36**(8): 2030~2034
- 9 Tong Shoufeng, Jiang Huilin, Liu Yunqing *et al.*. Optimum design of bandwidth for the APT coarse tracking assembly in free space laser communication [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(9): 16~20
- 佟首峰, 姜会林, 刘云清等. 自由空间激光通信系统 APT 粗跟踪伺服带宽优化设计[J]. 光电工程, 2007, **34**(9): 16~20
- 10 Vladimir V. Nikulin, Mounir Bouzoubaa, Victor A. Skormin *et al.*. Decentralized adaptive control for laser beam tracking systems[C]. *SPIE*, 2001, **4272**: 200~208
- 11 R. Joseph Watkins, Hong-Jen Chen, Brij N. Agrawal *et al.*. Optical beam jitter control[C]. *SPIE*, 2004, **5338**: 204~213
- 12 J. Sofka, V. Nikulin. Bit error rate optimization of an acousto-optic tracking system for free-space laser communications[C]. *SPIE*, 2006, **6105**: 61050L
- 13 Ding Tao, Xu Guoliang, Zhang Xuping *et al.*. Control of bit error rate introduced by platform vibration for free space optical communication[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 499~502
- 丁 涛, 许国良, 张旭苹等. 空间光通信中平台振动对误码率影响的抑制[J]. 中国激光, 2007, **34**(4): 499~502
- 14 Leihong Zhang, Yan Yang, Wenbing Xia *et al.*. Linearity of quadrant avalanche photodiode in laser tracking system[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(8): 728~731
- 15 Wang Shifeng, Zhang Guoyu, Chen Jianfeng *et al.*. Smart tracking CCD camera with miss distance calculation function[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2008, **29**(9): 1986~1989
- 王世峰, 张国玉, 陈剑峰等. 具有脱靶量计算功能的智能跟踪相机的研制[J]. 仪器仪表学报, 2008, **29**(9): 1986~1989
- 16 Yu Siyuan, Han Qiqi, Ma Jing *et al.*. Size selection of dispersive spot imaging on CCD in a satellite optical communication terminal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 69~73
- 于思源, 韩琦琦, 马 晶等. 卫星光通信终端 CCD 成像光斑弥散圆尺寸选择[J]. 中国激光, 2007, **34**(1): 69~73