

高精度快速倾斜镜位置检测与标定

高一男, 宋延嵩, 张磊*, 董科研, 刘洋

长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022

摘要 在单探测器型复合轴系统中, 子轴跟踪启动后, 主轴因没有适当的控制输入而处于开环状态, 易导致目标脱离视场。为了避免这种情况, 需要系统将精确的压电陶瓷(PZT)位置反馈给主轴。单独使用 PZT 振镜的开环系统时, 无法对 PZT 振镜的倾斜角度进行较高精度的控制, 若辅以检测补偿系统, 则可以提高系统的控制精度。目标位置检测对于振镜控制具有重要的作用, 它为开环状态下的伺服系统提供精确的控制信息, 以保证目标始终在视轴的中心位置。根据 PZT 振镜的物理结构特点, 研究单探测器型复合轴系统中振镜位置的检测方法, 给出电路的设计原理, 同时提出一种新的利用光学自准直仪的标定方法; 给出控制公式, 并重复进行多组实验, 以对控制公式进行验证。实验结果表明, 控制误差可以保证在 $20 \mu\text{rad}$ 以内。该研究结果为单探测器型复合轴的控制系统设计提供了基础。

关键词 光通信; 复合轴; 位置检测; 压电陶瓷振镜; 自准直仪标定

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.090603

Fast and High-Precision Position Detection and Calibration for Tilt Mirror

Gao Yanan, Song Yansong, Zhang Lei, Dong Keyan, Liu Yang

National Defense Key Discipline Laboratory on Space-Ground Laser Communication, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In a single detector compound axis system, the target will be out of field when the principal axis is in an open-loop state and the controlling for input is not proper after starting auxiliary axis tracking. In order to avoid this situation, it is necessary to feedback the accurate position of piezoelectric ceramics (PZT) to the principle axis. When the PZT mirror is used independently in an open-loop system, the tilt angle of the PZT mirror cannot be controlled precisely. However, the control accuracy of the system can be greatly improved combined with detection and compensation systems. The detection of target position plays a significant role for mirror controlling, which can provide precise control information for servo system in open-loop state, so that it can ensure the target stay at the center of the optical axis. According to the physical structure characteristics of PZT mirror, the position detecting method for mirror in the single detector compound axis system is studied. The principle of the circuit design is present, and a new calibration method with optical autocollimator is proposed. The control formulas are given, and several repeating experiments are accomplished to verify these control formulas. The results show that the error can be controlled within $20 \mu\text{rad}$. The study provides foundation for the design of the control system of single detector compound axis.

Key words optical communications; compound axis; position detection; piezoelectric ceramics mirror; calibration of autocollimator

OCIS codes 060.4510; 040.1520; 120.1880

收稿日期: 2017-04-07; **收到修改稿日期:** 2017-05-02

基金项目: 国家自然科学基金(91438204)

作者简介: 高一男(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事空间激光通信系统高精度光束伺服技术方面的研究。

E-mail: gyn8682@126.com

导师简介: 宋延嵩(1983—), 男, 博士, 讲师, 主要从事空间激光通信系统光束伺服、光电跟踪和光电测试方面的研究。

E-mail: songyansong2006@126.com

* **通信联系人.** E-mail: zhanglei004171@163.com

1 引言

光束的瞄准、捕获、跟踪(PAT)控制技术是空间激光通信中的重要部分及技术难点^[1-2]。空间光通信的距离较远,但光束的束散角较小,通常约为几个微弧度,因此有效降低了其对空间激光通信发射功率的需求,但同时也对PAT系统的控制精度提出了更高的要求^[3]。

复合轴PAT系统是激光通信系统中的核心单元,分为单探测器型复合轴系统和双探测器型复合轴系统两类^[4-5]。双探测器型复合轴系统已获得广泛应用,并取得了较好的跟踪效果;单探测器型复合轴系统虽然具有结构简单、功耗低和可靠性高等优点,但其控制过程较为复杂,因此其应用范围受到了一定的限制^[6]。宋延嵩等^[7]提出一种新的单探测器型复合轴结构。该结构先由CCD相机与粗跟踪执行器形成闭环,以完成捕获和粗跟踪过程;再由该CCD相机与精跟踪执行器形成闭环,以实现精跟踪控制。王世森等^[8]分析了单探测器型复合轴结构中主轴与子轴单元如何解耦控制的问题,提出采用跟踪精度作为判断系统是否解耦的方法。

基于以上分析,提出一种新的解耦方法,在单探测器型复合轴系统中,为了使粗跟踪的主轴与精跟踪的子轴控制解耦,需要在子轴跟踪启动后,为主轴控制提供准确的PZT振镜位置及脱靶量信息。因此,在整个振镜模块中,精确的位置检测对后续伺服单元的控制以及快速、精确检测光斑质心具有重要的意义。本文介绍了单探测器型复合轴系统的工作原理,进一步讨论了位置检测单元,设计了检测电路,提出了一种新的标定方法,并给出控制公式;通过对实验数据进行优化,可将控制精度提高到 $20\ \mu\text{rad}$ 。

2 PZT 振镜位置检测原理

2.1 PZT 振镜的工作原理

图1为空间光通信中PAT系统示意图。在精跟踪系统中,精瞄执行机构应具有响应速度快、跟踪精度高的特点。目前精瞄执行机构主要采用振镜,其响应时间在微秒量级,精度可以达到 $1/10\ \mu\text{rad}$ 量级,完全满足精跟踪的要求。振镜的工作原理:利用驱动器改变驱动电压,使应变片发生形变并产生位移,从而驱动附加在驱动器上的反射镜偏转。

系统中采用PI(Power Integrations)公司生产的S-325型倾斜振镜,该振镜主要由3个控制柱组成,振镜物理结构示意图如图2所示。倾斜平台配备3个压电线性驱动器,每个压电驱动器的分布相差 120° ,可以

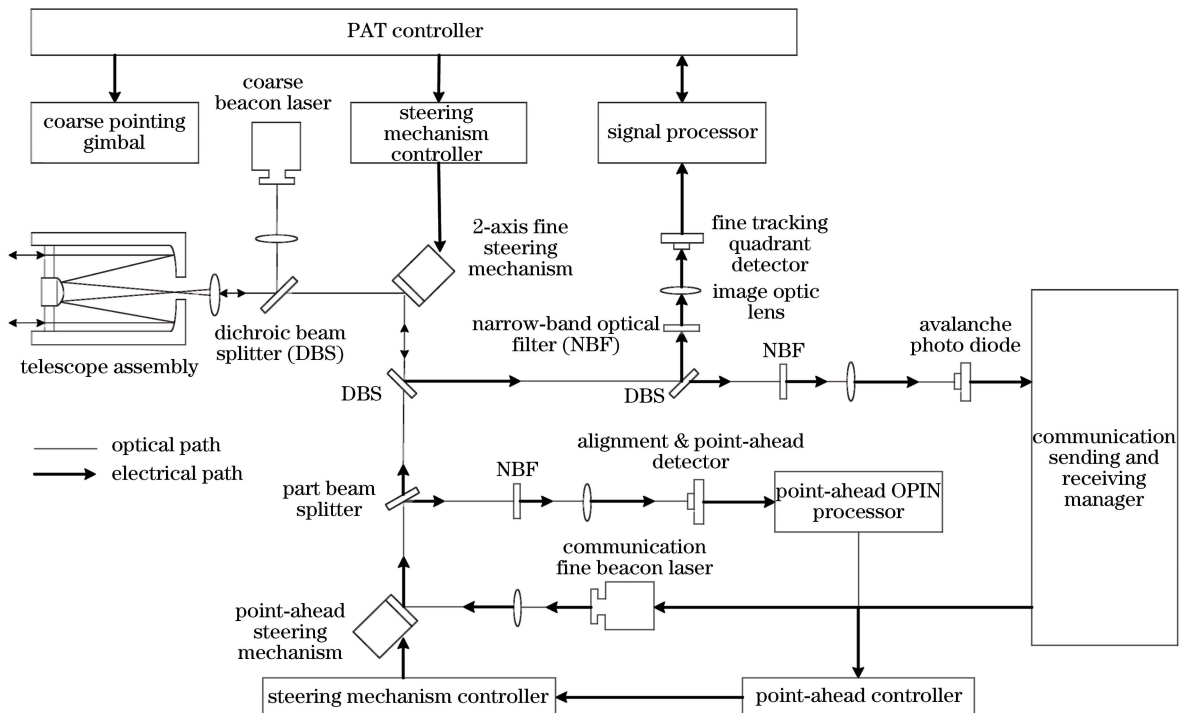


图1 空间光通信中PAT系统示意图

Fig. 1 Diagram of PAT system in space laser communication

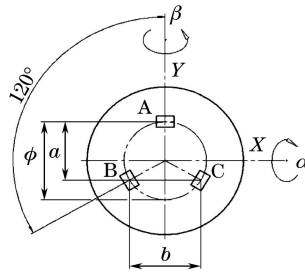


图 2 振镜物理结构示意图

Fig. 2 Schematic of galvanometer physical structure

在较宽的温度范围内获得非常高的角度稳定度。另外,该结构还有一个优点,当去掉压电驱动器上的驱动电压时,平台将自动恢复至中央位置。

图 2 中, X 、 Y 分别表示振镜驱动器的两个运动方向, A 、 B 、 C 分别表示振镜驱动器的 3 个控制柱, a 为 A 、 B 控制柱之间的距离 ($a = 8.7 \text{ mm}$), b 为 B 、 C 控制柱之间的距离 ($b = 10.0 \text{ mm}$), ϕ 表示通过 A 、 B 、 C 3 个控制柱的直径 ($\phi = 11.6 \text{ mm}$), α 、 β 分别对应 X 、 Y 两个方向的偏转角度。设 a' 、 b' 、 c' 分别代表 A 、 B 、 C 3 个控制柱的位移, 则各物理量满足:

$$a = \frac{b}{2}\sqrt{3}, \quad (1)$$

$$\phi = \frac{2b}{3}\sqrt{3}, \quad (2)$$

$$\alpha = a' - \frac{1}{2}(b' + c') \Big/ a, \quad (3)$$

$$\beta = (b' - c')/b. \quad (4)$$

由振镜物理结构及(1)~(4)式可知,振镜 A 、 B 、 C 3 个控制柱中任何一个控制柱位置的电压值的变化都会引起振镜平面的倾斜。根据光斑脱靶量处理及控制的要求,将该平面的变化过程归结为 X 、 Y 两个方向的运动。将光斑脱靶量解算后的位置信息传输给 A 、 B 、 C 3 个控制柱。利用控制柱位移量与检测电压的关系式,联合(3)、(4)式得到每个控制柱的角度控制量,从而实现振镜的实时控制。

2.2 振镜位置检测原理分析

振镜的每一个控制柱上都有对应的应变片,当驱动电压发生变化时,控制柱会随着电压的变化而伸长或缩短,从而产生位移,这时贴在控制柱上的应变片因受拉或受压而产生阻值的变化^[9]。基于此原理,采用惠斯通电桥测量电阻值的细微变化,当 4 个桥臂中有一个桥臂上的电阻值发生变化时,电桥的平衡就会被打破,进而产生电压输出^[10]。

检测系统的原理框图如图 3 所示,将接入的信号与两个高精度电阻组成惠斯通电桥,之后将电桥的两路输出信号输入到后面的差分放大器中,所得的电压信号与控制柱的位移量可以视为线性关系^[11],因此能够通过电压值反映出当前控制柱的绝对位移量。

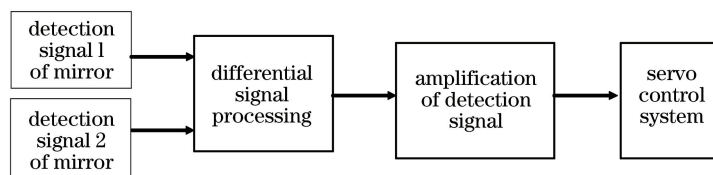


图 3 检测系统原理框图

Fig. 3 Functional block diagram of detection system

3 PZT 振镜位置检测模型分析

PZT 振镜位置检测单元的电桥设计图如图 4 所示,电桥电路上拉供电采用 $+10 \text{ V}$,需用连接器 (LEMO) 采集振镜的检测信号。

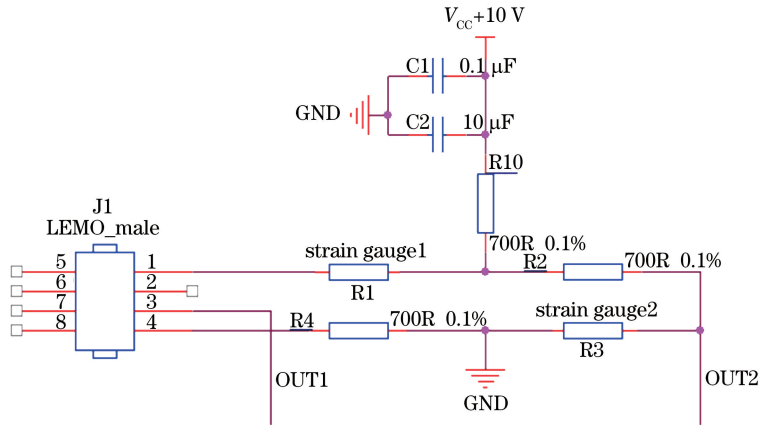


图4 PZT振镜位置检测单位的电桥设计图

Fig. 4 Design diagram of electric bridge of PZT galvanometer position detection

当应变片未发生形变时,由于阻值未改变,电桥将保持平衡,因而电压输出为零,即

$$V_{OUT} = V_{OUT1} - V_{OUT2} = 0, \quad (5)$$

式中 V_{OUT} 为两路输出电压的差值, V_{OUT1} 和 V_{OUT2} 分别为两路的输出电压。当应变片发生形变时,会引起 $R1$ 和 $R3$ 的阻值发生变化,从而使电桥处于不平衡状态,设 $R1$ 和 $R3$ 的阻值变化分别为 ΔR_1 、 ΔR_3 , 此时

$$V_{OUT} = V_{OUT1} - V_{OUT2} = 5 \times \frac{R_4}{R_1 + \Delta R_1 + R_4} - 5 \times \frac{R_3 + \Delta R_3}{R_2 + R_3 + \Delta R_3}, \quad (6)$$

式中 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 700 \Omega$, $\Delta R_1 = \Delta R_3 = \Delta R$, 因此有

$$V_{OUT} = -\frac{\Delta R}{1400 + \Delta R}. \quad (7)$$

信号经电桥模块后输出,其电压变化范围在 $0 \sim 100 \text{ mV}$ 之间,误差在 1 mV 之内,因此不利于信号采集,此时需进行放大处理。选择型号为 INA103 的放大器,以在低输入偏置电流和低失调电流误差条件下实现高精度、小噪声的差分放大作用,放大电路设计图如图 5 所示。

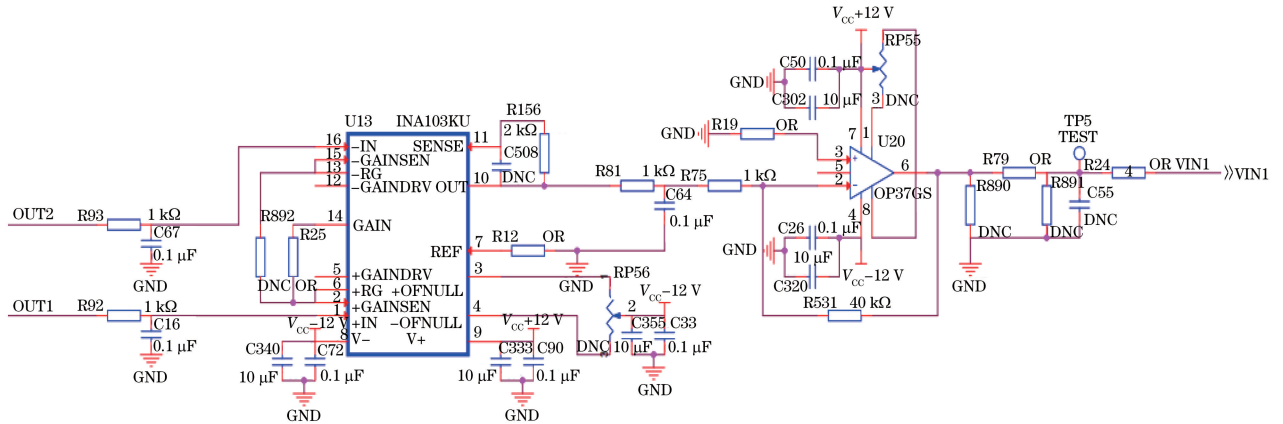


图5 放大电路设计图

Fig. 5 Design diagram of amplification circuit

4 位置检测的标定与优化

为分析输出电压与振镜偏转角度之间的关系,提出使用光学自准直仪标定的方法,利用光学自准直仪可以将精度控制在 $1''$ 以内(约为 $4.8 \mu\text{rad}$)。根据图 2 所示的振镜内部结构,通过调节 A、B、C 3 个控制柱位置处的驱动电压,可以使振镜平面与自准直仪保持平行。自准直仪标定装置如图 6 所示。

在闭环模式下,保持 B、C 2 个控制柱位置处的驱动电压不变,只调节 A 控制柱位置处的驱动电压,电压

的变化使该位置处的控制柱产生形变,位移也随之发生变化。保证两次位移步进量相同,振镜在Y方向出现角度偏移,通过自准直仪读出偏移角度,并做记录^[13],测得的30 μm 处的偏移角度如图7所示。该偏移角度与该点处控制柱的位移量成正比。

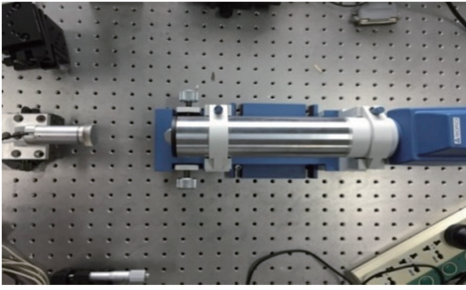


图6 自准直仪标定装置

Fig. 6 Autocollimator calibration device

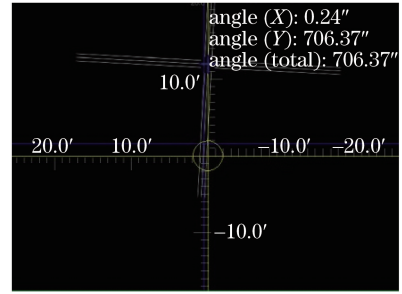


图7 30 μm 处的偏转角度

Fig. 7 Deflection angle at 30 μm

根据闭环模式下偏转角度与控制柱位移量的关系,加入PZT振镜位置检测电路。在开环模式下,改变驱动电压,通过自准直仪读出偏转角度,保证开环模式下的偏转角度与闭环模式下一致,测得输出电压值^[12]。表1为实验过程中得到的位移、偏转角度和检测电压数据。

利用最小二乘法对上述数据进行拟合,得到Y方向(即A柱)的控制式为

表1 A柱位移、偏转角度与检测电压之间的关系

Table 1 Relationship among displacement, deflection angle and detection voltage of column A

Displacement / μm	Deflection angle / ($''$)	Detection voltage / V
0	0	—
1	23	—
2	47	-0.300
3	70	0
4	94	0.356
5	117	0.607
6	141	0.995
7	165	1.280
8	188	1.600
9	212	1.980
10	235	2.240
11	259	2.600
12	283	2.950
13	306	3.250
14	330	3.620
15	353	3.970
16	377	4.300
17	400	4.620
18	424	4.980
19	447	5.240
20	471	5.600
21	494	5.940
22	518	6.270
23	542	6.600
24	565	6.840
25	588	7.190
26	612	7.550
27	635	7.800
28	659	8.200
29	683	8.580
30	706	8.820

$$y = 3.0189x_A + 3.009, \quad (8)$$

式中 y 为位移,单位为 μm ; x_A 为通过检测电路检测得到的 A 柱电压,单位为 V。图 8 为拟合得到的 Y 方向位移量与检测电压的关系曲线。

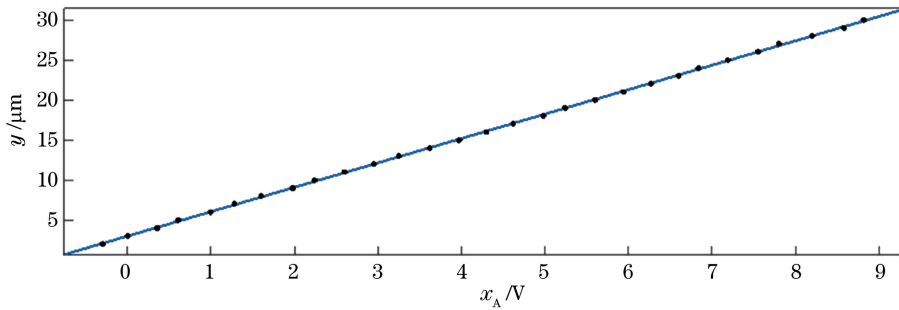


图 8 Y 方向位移量与检测电压的关系

Fig. 8 Relationship between displacement and detection voltage of Y direction

同理,可得到 x 方向 B、C 两柱的控制式为

$$y = 3.171x_B + 0.277, \quad (9)$$

$$y = 3.222x_C - 0.08155, \quad (10)$$

式中 x_B 、 x_C 分别为通过检测电路检测到 B、C 两柱的反馈电压。图 9 为拟合得到的 B、C 两柱 X 方向的位移量与检测电压的关系曲线。

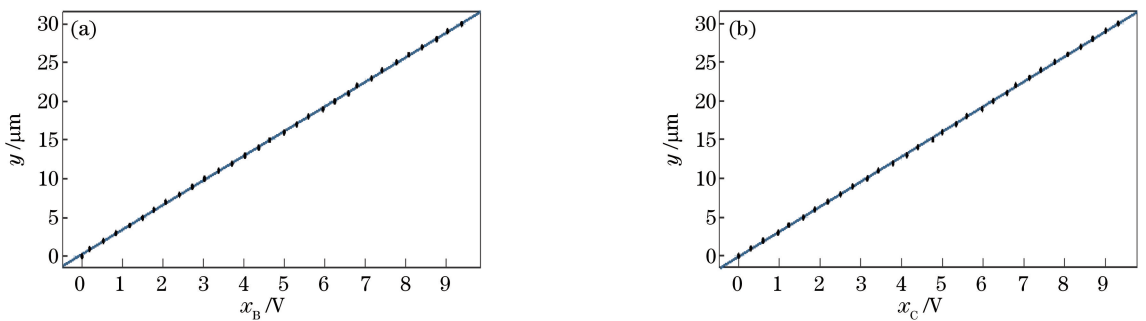


图 9 X 方向位移量与检测电压的关系。(a) B 柱;(b) C 柱

Fig. 9 Relationship between displacement and detection voltage in X direction. (a) Column B; (b) column C

将(8)~(10)式代入(3)、(4)式中,可得到 X、Y 两个方向的控制式为

$$\alpha = \frac{3018.9x_A + 2919.8}{8700}, \quad (11)$$

$$\beta = \frac{3165x_B - 3224x_C + 407.8}{10000}. \quad (12)$$

根据得到的控制公式,用电压反推偏转角度,并将其与观测的偏转角度进行对比。实验中同时使三路电路处于开环状态,接位置检测板,任意改变 3 个控制柱的驱动电压,观测自准直仪的偏转角度,记录此时 3 个检测电压值,将得到的电压值代入(11)、(12)式中计算角度,将计算得到的角度值与自准直仪所得结果进行对比,得到误差。根据得到的误差,在公式中附加一个修正值,进行重复性实验;逐渐缩小误差,最终将计算的角度值与实际偏转角度的差值控制在 $20 \mu\text{rad}$ 之内。

5 结 论

基于单探测器型复合轴系统,结合 PZT 振镜的物理结构,采用惠斯通电桥测量振镜内部应变片阻值的变化。针对振镜位置信息的标定提出一种新的标定方法,借助光学自准直仪将角度误差控制在 $1''$ 之内,同时给出控制公式,控制精度可提高至 $20 \mu\text{rad}$ 。该研究结果将为主轴处于开环状态时提供精确的控制信息,所提方法可保证精跟踪单元的控制精度。

参 考 文 献

- [1] Li Jing, Zhao Shubo. Reviews of space laser communication research[J]. *Electronic Test*, 2013 (3/4): 80-83.
李 静, 赵树波. 空间激光通信技术研究综述[J]. *电子测试*, 2013 (3/4): 80-83.
- [2] Bai Shuai, Wang Jianyu, Zhang Liang, *et al.* Development progress and trends of space optical communications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 070001.
白 帅, 王建宇, 张 亮, 等. 空间光通信发展历程及趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 070001.
- [3] Jiang Huilin, Tong Shoufeng, Zhang Lizhong. The technologies and systems of space laser communication[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 215-291.
姜会林, 佟首峰, 张立中. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 215-291.
- [4] Ma Jianguang, Tang Tao. Review of compound axis servomechanism tracking control technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 218-227.
马佳光, 唐 涛. 复合轴精密跟踪技术的应用与发展[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 218-227.
- [5] Jiang Huilin, Jiang Lun, Song Yansong, *et al.* Research of optical and APT technology in one-point to multi-point simultaneous space laser communication system[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(4): 0405008.
姜会林, 江 伦, 宋延嵩, 等. 一点对多点同时空间激光通信光学跟瞄技术研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0405008.
- [6] Zhao Xin, Song Yansong, Tong Shoufeng, *et al.* Dynamic demonstration experiment of acquisition, pointing and tracking system in space laser communications[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0305005.
赵 馨, 宋延嵩, 佟首峰, 等. 空间激光通信捕获、对准、跟踪系统动态演示实验[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0305005.
- [7] Song Yansong, Tong Shoufeng, Dong Yan, *et al.* Technique of compound axis control using single detector based on field programmable gate array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(4): 0406001.
宋延嵩, 佟首峰, 董 岩, 等. 基于现场可编程门阵列单探测器复合轴控制技术[J]. *光子学报*, 2014, 43(4): 0406001.
- [8] Wang Shisen, Tong Shoufeng, Song Yansong. Decoupling research and implementation of compound-axis servo system using a CCD detector[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(7): 81-89.
王世森, 佟首峰, 宋延嵩. 单探测器复合轴伺服系统解耦技术的研究与实现[J]. *光电工程*, 2012, 39(7): 81-89.
- [9] Mohan S, Alvarez-Salazar O, Birnbaum K, *et al.* Pointing, acquisition, and tracking architecture tools for deep-space optical communications[C]. *SPIE*, 2014, 8971: 89710H.
- [10] Yang Yi, Yang Zhen. Research on compound-axis APT system in satellite and ground station laser communication[J]. *Electronic Design Engineering*, 2013, 21(23): 27-30.
杨 宜, 杨 震. 星地激光通信复合轴 APT 系统仿真研究[J]. *电子设计工程*, 2013, 21(23): 27-30.
- [11] Alexander J W, Lee S, Chen C C. Pointing and tracking concepts for deep space missions[C]. *SPIE*, 2015, 3615: 230-249.
- [12] Song Yansong, Chang Shuai, Tong Shoufeng, *et al.* Feature analysis of airborne laser communication system and airborne laser communication experiment[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(12): 1206004.
宋延嵩, 常 帅, 佟首峰, 等. 航空激光通信系统的特性分析及机载激光通信实验[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1206004.