

文章编号: 0253-2239(2006)05-0975-5

星间激光通信光束微弧度跟瞄性能检测装置的设计原理*

李安虎^{1,2} 孙建锋¹ 刘立人¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 基于矢量折射定理,研究了透射光束通过双棱镜实现微弧度量级偏转的设计原理,解决了星间激光通信精跟瞄检测的难题。推导了正交双棱镜实现光束偏转的精确公式,提出以水平张角和垂直张角表达光束视场,并说明了单棱镜实现光束偏转的一般情况。根据设计指标和计算结果确定了棱镜的主要参量,进而对光束的偏转结果进行了数值模拟。最后的实验结果与模拟结果基本一致。结果表明:取棱镜棱角 α 为 4° 时,棱镜每旋转 $1'$,透射光束变化约 $1 \mu\text{rad}$;分别控制双棱镜在其最小偏向角一侧小角度偏转,可以实现光束在水平方向和垂直方向 $500 \mu\text{rad}$ 范围内的精确扫描,装置的扫描精度可以达到 $0.2 \mu\text{rad}$ 。

关键词: 光学器件; 光束微弧度偏转; 数值模拟; 双棱镜

中图分类号: TH74 文献标识码: A

Design Principle of Performance Testing Device for Laser Beam Microradian Pointing and Tracking in Intersatellite Laser Communications

Li Anhu^{1,2} Sun Jianfeng¹ Liu Liren¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)
(² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Starting from vector refraction theorem, the design principle of transmitted laser beam through double-prism to perform microradian deviation is researched, and the testing problem of fine pointing and tracking in intersatellite optical communications is solved. The accurate formula for laser beam deviation through a pair of orthogonal prisms is derived, the visual field defined as level field angle and vertical field angle is proposed, and the general situation of laser beam deviation through single prism is also presented. The main parameters of prisms, according to design object and calculation result, are confirmed, and then the numerical simulation on the deviation result of laser beam is carried out. The final results from the tests accord well with those from the theoretical analysis. The results show, when the prism wedge angle is 4° , the transmitted laser beam changes about $1 \mu\text{rad}$ as the prism rotates $1'$; when the small angle deviation on one side of the minimum deviation angle of each prism is controlled, the scanning range of laser beam in the horizontal and vertical direction is not less than $500 \mu\text{rad}$, and the scanning precision of the device is superior to $0.2 \mu\text{rad}$.

key words: optics device; laser beam microradian deviation; numerical simulation; doubleprism

1 引 言

在星间激光通信系统的研制过程中,系统性能的实验室动态模拟和验证是其中极为重要的内容。如美国宇航局的光通信演示设备(OCD)^[1],日本空间激光通信实验室验证系统(Ground Optical Assistance for LUCE)^[2],以及欧共体 SILEX 计

划^[3],都在实验室内对太空环境下的激光通信情况进行了系统的性能检测。由于星间激光通信传输距离很远,为了保证系统的通信性能,实验室性能检测的一项重要工作就是检测通信终端的精跟瞄特性。精跟瞄工作视场角一般设计为几百微弧度,束宽通常为十几个甚至几个微弧度,如 SILEX 系统中为

* 上海市科学技术发展基金(046105004)和中国科学院创新计划资助课题。

作者简介: 李安虎(1974~),男,安徽寿县人,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事大型精密光学测控设备、光学测试、机械 CAD/CAM/CAE 的研究。E-mail: yfiah@yahoo.com.cn

收稿日期: 2005-05-12; 收到修改稿日期: 2005-10-20

8 μrad (天线口径 250 mm)^[4],此时已接近衍射极限。在进行飞行测试之前,必须对如此高精度的激光通信终端的动静态性能进行精密测量。

精跟瞄系统性能检测是通过模拟光束偏转来实现的,精度要求优于被测终端的跟踪精度,即1 μrad 量级甚至更低。在 SILEX 系统中,精跟瞄系统采用压电驱动两块快速倾斜透镜结构,瞄准噪声为 5 μrad (1σ),其性能检测通过大量模拟仿真软件和各种电子设备而搭建的半物理半仿真的测试平台来实现,终端的静态性能测试则由大口径平行光管等终端测试地面光学辅助设备来完成^[5,6]。高速倾斜镜结构由压电陶瓷或电磁元件驱动以实现小视场内的精确跟踪,跟踪精度优于 0.5~1 μrad ,可用于一般的精跟踪扫描,但难以完成对被测终端的性能检测^[7]。折射式楔形棱镜可实现光束的精确扫描,主要有旋转单棱镜结构^[8]和同轴旋转双棱镜结构^[9],跟瞄精度由棱角决定,棱角越小实现的跟踪精度越高,但是单棱镜难以满足光束多维偏离变化要求,而双棱镜同轴旋转的机械结构一般较复杂,很难保证实际精度。

本文提出以两个相同的级联棱镜正交旋转来检测光束精跟瞄性能的装置,在卫星通信领域第一次利用正交双棱镜实现光束的精跟踪性能测试。主要特点是光束偏离角与棱镜机械转角成百倍量级的减速比,在机械结构精度要求不高的情况下实现了亚微弧度量级的高精度光束扫描,装置整体结构简单、控制方便。同时,本文还首先基于矢量折射定理严格推导了光束通过级联正交旋转双棱镜的精确表达式,讨论了棱镜参量的选择问题,给出了设计结果、精度要求及实验验证。

2 原理分析

2.1 正交旋转双棱镜光束偏转原理

如图 1,建立直角坐标系 XYZ,第一个棱镜的主截面位于 XOZ 面内,薄端指向 X 轴负方向,绕 Y 轴旋转;第二个棱镜的主截面位于 YOZ 面,且薄端指向 Y 轴正方向,绕 X 轴旋转。规定棱镜逆时针方向旋转为正,顺时针方向旋转为负,转动角度分别为 θ_1 和 θ_2 。利用矢量折射定理,可以得到入射光束偏转后在水平方向和垂直方向的视场范围。

设入射光线沿 Z 轴正方向传播,单位矢量为

$$\mathbf{A}_1 = (\sin \varphi \cos \theta, \cos \varphi, \sin \varphi \sin \theta) = (a_1, b_1, c_1), \quad (1)$$

式中 φ 为入射光线矢量和 Y 轴正方向(即第一棱镜

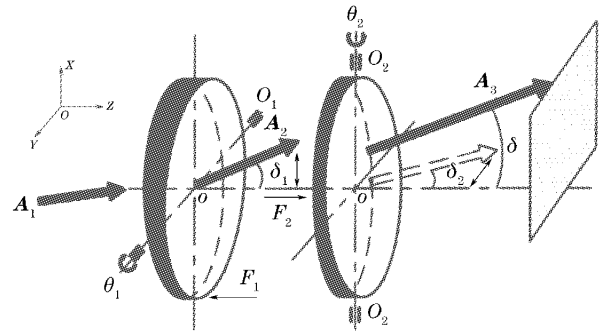


图 1 双棱镜折射光束的原理图

Fig. 1 Schematic diagrams for double prisms refraction (棱方向)之间的夹角, θ 为入射光线矢量在主截面内投影和 X 轴正方向之间的夹角。根据矢量折射定理,可以推导出入射光束通过第一个棱镜和第二个棱镜后出射光线的单位矢量和两个棱镜旋转角度之间的关系。

光束经过第一个棱镜后的单位矢量为

$$\mathbf{A}_2 = (\sin \varphi \cos \theta_{11}, \cos \varphi, \sin \varphi \sin \theta_{11}) = (a_2, b_2, c_2), \quad (2)$$

经过第一棱镜的光束偏离角为

$$\delta_1 = i_1 + \arcsin(\sin \alpha \sqrt{n_1^2 - \sin^2 i_1} - \cos \alpha \sin i_1) - \alpha, \quad (3)$$

其中 $i_1 = \pi/2 - \theta - \theta_1$ 为光束对第一棱镜的入射角; $\theta_{11} = \theta - \delta_1$,为光束矢量经过第一个棱镜后在 XOZ 面内的投影与 X 轴正方向之间的夹角; $n_1^2 = n^2 + (n^2 - 1) \cot^2 \varphi$,为第一棱镜的等效折射率。

再对 \mathbf{A}_2 进行变换:

$$\mathbf{A}_2 = (\cos \varphi', \sin \varphi' \sin \theta_{12}, \sin \varphi' \cos \theta_{12}), \quad (4)$$

其中 $\varphi' = \arccos(\sin \varphi \cos \theta_{11})$,为光束矢量经过第一个棱镜后与 X 轴正方向之间的夹角; $\theta_{12} = \arctan(\cot \varphi / \sin \theta_{11})$,为光束矢量经过第一个棱镜后在 YOZ 面内的投影与 Z 轴正方向之间的夹角。

则经过第二个棱镜的出射光束矢量为

$$\mathbf{A}_3 = [\cos \varphi', \sin \varphi' \sin(\theta_{12} - \delta_2), \sin \varphi' \cos(\theta_{12} - \delta)] = (a_3, b_3, c_3), \quad (5)$$

光束偏离角:

$$\delta_2 = i_2 + \arcsin(\sin \alpha \sqrt{n_2^2 - \sin^2 i_2} - \cos \alpha \sin i_2) - \alpha, \quad (6)$$

式中 $i_2 = \theta_{12} + \alpha + \theta_2$ 为光束对第二棱镜的入射角, $n_2^2 = n^2 + (n^2 - 1) \cot^2 \varphi'$,为第二棱镜的等效折射率。

定义视场为折射光束的垂直张角和水平张角。垂直张角即出射光束在 XOZ 面内的投影和 Z 轴的夹角;水平张角即出射光束在 YOZ 面内的投影和 Z 轴的夹角。

垂直张角:

$$\arctan\left(\frac{a_3}{c_3}\right) = \arctan\left[\frac{\cot \phi'}{\cos(\theta_{12} - \delta_2)}\right], \quad (7)$$

水平张角:

$$\arctan\left(\frac{b_3}{c_3}\right) = \arctan\left[\frac{\sin(\theta_{12} - \delta_2)}{\cos(\theta_{12} - \delta_2)}\right] = \theta_{12} - \delta_2, \quad (8)$$

同时可以得到光束总的偏离角 δ , 即入射光束和出射光束之间的总夹角:

$$\delta = \arccos(a_1 a_3 + b_1 b_3 + c_1 c_3). \quad (9)$$

2.2 旋转单棱镜光束偏转的一般情况

表 1 不同棱角 $\alpha(^{\circ})$ 对应的光束偏离角 $\delta(\mu\text{rad})$ 和光束偏离角变化率 $\partial\delta/\partial i[\text{rad}/(^{\circ})]$

Table 1 Deviation angle δ (μrad) for different $\alpha(^{\circ})$ and change rate $\partial\delta/\partial i[\text{rad}/(^{\circ})]$

α	max δ	min δ	range of δ	max($\partial\delta/\partial i$) / 10^{-5}	min($\partial\delta/\partial i$) / 10^{-5}	mean($\partial\delta/\partial i$) / 10^{-5}
2	18245	18050	195.1	0.9800	-1.900	-0.4518
3	27448	27082	366.6	1.133	-3.209	-1.019
4	36720	36121	599.0	1.063	-4.768	-1.818
5	46073	45171	901.4	0.7708	-6.587	-2.854
6	55519	54235	1284	0.2528	-8.677	-4.134
7	65071	63315	1756	4.933	-11.05	-5.665
8	74744	72433	2312	-1.472	-13.73	-7.457

表 1 表明, 在相同的入射角范围内, 随着棱镜棱角的增大光束的偏离角范围越来越大, 光束的偏离角的变化率也越来越大, 即实现的光束偏离精度就越低。所以设计时棱角大小必须综合视场和精度要求合理选取。表 1 同时表明, 当棱镜的棱角较小时, 入射角每变化 $1''$, 出射光束的变化在微弧度量级。所以当入射光束在静态情况时, 让棱镜在小范围内偏摆, 则等效于光束入射角的连续变化, 即可实现出射光束微弧度量级的精确偏离。

2.3 棱镜主要参量的确定

装置的设计指标: 光束扫描范围为 $500 \mu\text{rad}$, 在整个偏转范围内光束的偏转角精度优于 $0.2 \mu\text{rad}^{[10,11]}$ 。考虑到机械结构, 限制两个棱镜的最大旋转角度不大于 7° 。

表 2 不同棱角与最小偏向角和棱镜转角间的关系

Table 2 Relationship of different wedge angel, minimum deflection angle and rotation angle ($^{\circ}$)

$\alpha_{1,2}$	3	4	5	6	7
$\delta_{1,2}$	1.5496	2.0668	2.5846	3.1032	3.6227
i_1	-2.4333	-3.0613	-3.7097	-4.5806	-5.2903
i_2	-0.7619	-0.93651	-1.129	-1.3871	-1.7419
θ_1	-2.4333~7.1111	-3.0613~5.1111	-3.7092~2.8889	-4.5806~2.2222	-5.2903~0.88889
θ_2	-0.7619~8.7302	-0.93651~7.2063	-1.129~6.1905	-1.3871~5.1746	-1.7419~4.6667

根据表 1 和表 2 确定棱角 $\alpha=4^{\circ}$, 此时棱镜每旋转 $1'$ 光束变化约在 $1 \mu\text{rad}$ 量级, 且在 $500 \mu\text{rad}$ 光束扫描范围内, 棱镜的旋转空间较小, 可以满足设计要求。确定第一棱镜旋转角度为 $0\sim 5^{\circ}$, 顺时针方向

简化上述推理, 可以得到单棱镜折射的一般情况, 偏向角用符号 δ 表示。设棱镜折射率 n , 入射光线入射角为 i_1 。其符号规定为光线到法线顺时针为正, 逆时针为负。偏向角 δ 由入射光线方向按锐角转至出射光线方向, 顺时针为正, 逆时针为负。

由折射定理可推算出:

$$\delta = i + \arcsin(\sin \alpha \sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \cos \alpha \sin i) - \alpha, \quad (10)$$

设光束入射角在 $\pm 5^{\circ}$ 范围内变化, δ 与 α 的关系如表 1 所示。

根据该要求, 为了获得预定的扫描范围和偏转角精度, 必须综合考虑棱镜的偏转角度和棱镜棱角两个因素。

棱镜的旋转区间主要与最小偏向角及光束扫描范围有关。为了便于控制, 棱镜的旋转区间应该位于最小偏向角一侧的单调区间。根据棱镜棱角值可以计算出不同棱角值对应的光束最小偏向角。

折射棱镜的最小偏向角公式:

$$\delta_{\min} = 2\arcsin n \cdot \sin(\alpha/2) - \alpha. \quad (11)$$

表 2 列出了两个棱镜的棱角 $\alpha_{1,2}$ 取不同值时对应的最小偏向角 $\delta_{1,2,\min}$ 及对应最小偏向角 $\delta_{1,2,\min}$ 时的光束入射角 i_1 和 i_2 , 并给出了在光束扫描范围为 $500 \mu\text{rad}$ 时两个棱镜在最小偏向角一侧各自需要旋转的最小范围 θ_1 和 θ_2 。

第二棱镜旋转角度为 $0\sim 7^{\circ}$, 逆时针方向旋转。这样两个棱镜的初始位置都在 0° , 平面侧都朝外, 且主截面垂直于 Z 坐标轴, 工作时两个棱镜的薄端均向外旋转。

对在上述棱镜参量条件下的光束扫描结果进行数值计算,结果如图 2 和图 3 所示。

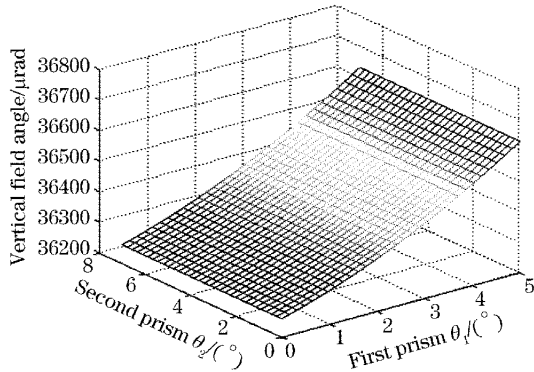


图 2 光束的垂直张角

Fig. 2 Vertical field angle of laser beam

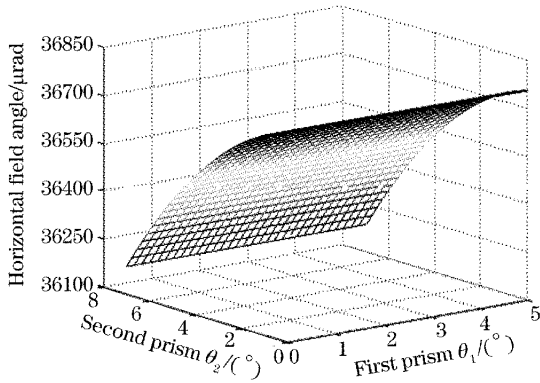


图 3 光束的水平张角

Fig. 3 Horizontal field angle of laser beam

图 2 给出光束垂直张角随两个棱镜旋转角度的变化。垂直张角主要受第一棱镜旋转的影响,随第一棱镜旋转角度的增加而单调递增。当 $\theta_1 = 0^\circ \sim 5^\circ$ 时,垂直张角在 $36206 \sim 36720 \mu\text{rad}$ 之间变化,变化量为 $514 \mu\text{rad}$,相对设计要求还有一定余量。

图 3 为光束水平张角随两个棱镜旋转的变化情况。水平张角主要受第二个棱镜旋转的影响,随第二棱镜旋转角度的增加而单调增加。当 $\theta_2 = 0^\circ \sim 7^\circ$ 时,水平张角在 $36130 \sim 36705 \mu\text{rad}$ 之间变化,变化量为 $575 \mu\text{rad}$,相对设计要求也有一定余量。

3 影响扫描精度的主要因素

光束的扫描精度主要和棱镜偏转角度误差、棱角误差、折射率均匀性、入射光束与 X 轴的夹角误差及两个棱镜主截面间垂直度等因素有关。

对(3)式进一步微分求解,得到各种因素对光束扫描精度的影响,考虑到两个棱镜主截面间的不垂直度,最后计算结果如表 3 所示。表中的系统误差可以通过实验测量的方法进行校正。

表 3 主要误差源引起的光束扫描误差(μrad)

Table 3 Scanning errors caused by the main error sources (μrad)

Main errors	$\delta\theta_1/(')$	$\delta\theta_2/(')$	$\delta n/10^{-6}$	$\delta\alpha/(')$	$\delta\beta/(')$
Max errors	2.515	2.515	0.0712	2.638	0.129
Min error	0.93	0.93	0.0712	2.559	
Error style	Random			System	

注: $\delta\theta_1, \delta\theta_2$ 分别为第一、第二棱镜的转角误差, δn 为玻璃的折射率均匀性, $\delta\alpha$ 为棱镜棱角误差, $\delta\beta$ 为两个棱镜主截面间的垂直度。

本装置的设计指标为,在整个偏转范围内光束的偏转角精度优于 $0.2 \mu\text{rad}$ 。根据表 3 中的光束偏转角最大变化率($\partial\delta/\partial\theta_{1,2}$)为 $2.515 [\mu\text{rad}/(')]$,则单棱镜旋转精度的最低要求为:

$$\frac{0.2 \mu\text{rad}}{2.515 \mu\text{rad}/(')} = 4.771''$$

由于两个棱镜独立产生作用,所以装置的机械系统及控制系统精度必须优于 $4.771''$ 。在整个装置设计中,机械控制系统的精度设计尤为关键,它直接影响双棱镜旋转角精度,由此产生的扫描随机误差是本装置的主要误差源^[12]。

4 实验及结论

本装置中两个棱镜独立产生作用,共同实现透射光束在水平方向和俯仰方向的精确扫描,因此可以用单棱镜旋转实现光束一维精确扫描的实验验证本装置设计原理的正确性。文献[7]用马赫-曾德尔干涉仪通过干涉测量的方法,精确的给出了棱镜转角与光束偏离角之间的关系。实验装置如图 4 所示,主要包括两个半透半反镜 Z_1 和 Z_2 、两个全反镜 Z_3 和 Z_4 ^[13]。入射光束波长 λ 为 632.8 nm ,经 Z_1 透射和反射分成两条光路,分别经全反镜 Z_3, Z_4 反射,再经 Z_2 反射和透射,最后在接收屏 S 上产生干涉。棱镜 W 被放置在图示光路中,光束经棱镜 W 透射和镜子 Z_2 反射后和另一条光路的光束形成夹角,在接收屏 S 产生干涉条纹;转动棱镜,则干涉条纹数发生变化。棱镜棱角 α 为 5° ,按图示方向旋转角度 $\theta \in (-5^\circ \sim 5^\circ)$ 。

用一个线性螺母控制棱镜转角,螺母旋转(每周 360°)圈数为 m 。在棱镜转动转角 $\theta \in (-5^\circ \sim 5^\circ)$ 内,可以证明 θ 与 m 为线性关系, $d\theta/dm = (0.53 \pm 0.03)^\circ$,所以根据 m 值便可以方便的求得棱镜的旋转角度 θ 。设螺母每旋转 m 单位圈,在条纹区长度

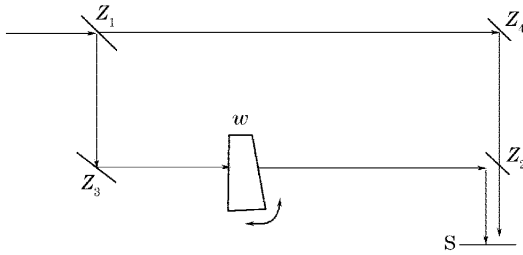


图4 马赫-曾德尔干涉仪测量偏转楔棱镜

Fig. 4 Rotating wedge prism tested in Mach-Zehnder interferometer

L 内的条纹数为 n , 则两束干涉光之间的夹角, 即棱镜旋转产生的光束偏离角 δ 可表示为

$$\delta = 2 \arcsin \left[\frac{\lambda}{2(L/n)} \right]. \quad (14)$$

图5为实验测得的棱镜转角 $\theta \in (-5^\circ \sim 5^\circ)$ 和光束偏离角 δ 之间的关系, δ 的变化范围约 0.0515° ; 图6为棱镜转角与光束变化率之间的关系, 棱镜每旋转 1° 引起的光束偏离角约为 0.01° 。实验结论和前述的理论计算结果相一致。

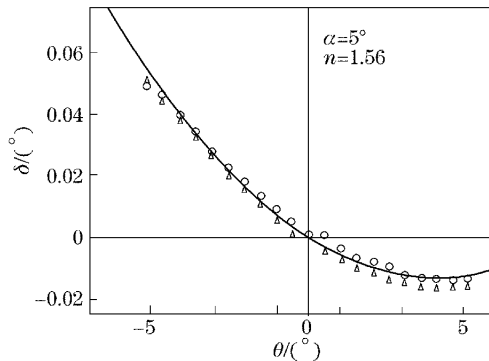


图5 棱镜旋转引起的光束偏离

Fig. 5 Wave vector deviation by rotated wedge prism

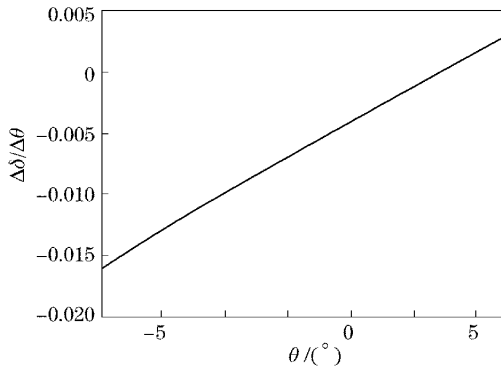


图6 光束偏离角相对光束入射角的变化率

Fig. 6 Rates of change for deviation angle versus incident angle

上述实验采用单棱镜旋转方案进一步证实了本装置设计原理的正确性。当棱镜棱角 α 为 4° 时, 棱

镜转角与光束偏离角约为百倍量级关系。在棱镜旋转精度要求不高的情况下, 却可以实现精确的光束扫描, 从而简化了机械及控制系统设计, 这是本装置的一个主要特点。级联双棱镜绕正交轴旋转的设计方案, 则巧妙的解决了通信终端精跟瞄系统在垂直方向和俯仰方向光束偏离的检测难题。计算及实验结果表明, 系统的检测视场在垂直和俯仰方向都不小于 $500 \mu\text{rad}$, 检测精度可以达到亚微弧度量级, 远优于一般的光束扫描检测装置。该装置还可广泛应用于其他小视场光束传递模拟及动态性能检测中, 具有较强的实用价值。

参 考 文 献

- 1 Caroline S. Racho, Angel Portillo. Characterization and design of digital pointing subsystem for Optical Communication Demonstrator[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3615**: 250~261
- 2 Morio Toyoshima, Shiro Yamakawa, Toshihiko Yamawaki *et al.*. Ground-to-satellite optical link tests between Japanese laser communications terminal and European geostationary satellite ARTEMIS[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5338**: 1~15
- 3 G. Planche, B. Laurent *et al.*. Silex final ground testing and in-flight performances assessment[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3615**: 64~77
- 4 A. F. Popescu, B. Furch. Status of the European developments for laser intersatellite communications[C]. *Proc. SPIE*, 1993, **1866**: 10~20
- 5 Gotthard Oppenhäuser. Silex program status-a major milestone is reached[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **2990**: 2~9
- 6 Michel Bailly, Eric Perez. The pointing, acquisition and tracking system of Silex European program; a major technological step for intersatellites optical communication [C]. *Proc. SPIE*, 1991, **1417**: 142~157
- 7 Toni Tolker Nielsen. Pointing, acquisition and tracking system for the free space laser communication system, SILEX[C]. *Proc. SPIE*, 1995, **2381**: 194~205
- 8 Dagmar Senderáková, Anton Štrba. Analysis of a wedge prism to perform small-angle beam deviation [C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5036**: 148~151
- 9 J. Sandoval, G. Paez, M. Srojniak. Opto-mechanical design of a prism rotator[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4486**: 170~180
- 10 Paul W. Scott, Philip W. Young. Impact of temporal fluctuations of signal-to-noise ratio (burst error) on free-space laser communication system design optical technologies for communication satellite applications [C]. *Proc. SPIE*, 1986, **616**: 174~181
- 11 Wang Jianmin, Tang Junxiong, Sun Dongxi *et al.*. Stud on the uniform beacon used for the free space laser communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 7~10 (in Chinese)
- 王建民, 汤俊雄, 孙东喜 等. 卫星激光通信均匀信标光的研究 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 7~10
- 12 Xu Rongwei, Liu Liren, Liu Hongzhan *et al.*. Support schemes and thermal deformation analysis of large-aperture interferometer mirrors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 809~815 (in Chinese)
- 徐荣伟, 刘立人, 刘宏展 等. 大型干涉仪镜子的支承设计与温度变形分析 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(6): 809~815
- 13 Xu Rongwei, Liu Hongzhan, Liu Liren. Phase-shifting vectorial-shearing intergerometer with Mach-Zehnder configuration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 269~274 (in Chinese)
- 徐荣伟, 刘宏展, 刘立人. 马赫-曾德尔型相移矢量剪切干涉仪 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 269~274