

高准确度光束偏转装置的设计与分析*

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 100039)

摘 要 基于矢量折射定理推导了光束经过正交双棱镜后的偏转表达式. 给出了装置的主要设计参量; 用数值模拟的方法分析了主要误差项, 求出了总误差和实际准确度指标. 结果表明, 光束在水平张角及垂直张角 500 μrad 内可实现准确度优于 0.8 μrad 的偏转, 偏离准确度主要受随机误差影响; 反映到棱镜转角上的总误差为 12.72 arcsec, 引起的光束偏离误差为 0.365 μrad , 大于系统读数分辨率 0.0387 μrad , 且小于光束偏离准确度指标 0.8 μrad .

关键词 光学器件; 星间激光通信; 设计与分析; 双棱镜; 数值模拟

中图分类号 TH74 **文献标识码** A

0 引言

在卫星激光通信系统中, 跟瞄性能是保证系统通信质量的关键, 尤其是精跟瞄的性能要求很高, 一般需要达到十几个甚至几个微弧度^[1], 此时已接近衍射极限^[2]. 在进行飞行测试之前, 必须对如此高准确度激光通信终端的动静态性能进行精密测量^[3,4], 因此就需要设计出更高准确度的检测设备.

星间激光通信精跟瞄性能检测是通过模拟光束高准确度偏转来实现的, 主要有万向架法、反射型方法、折射型方法和等效棱镜方法等. 万向架法^[5]、反射型方法和等效棱镜方法^[6]的共同缺点是结构复杂、控制困难、准确度难以保证; 折射型方法主要有单棱镜折射^[7]和双棱镜同轴旋转折射^[8], 前者难以满足精跟瞄时光束多维变化的要求, 后者的机械结构较复杂, 难以实现高准确度的跟踪模拟. 本文第一次以双棱镜小角度正交旋转实现了光束在小视场内亚微弧度量级的偏转, 整体结构简单, 控制方便. 并推导了光束通过正交双棱镜的偏转表达式, 分析了影响光束偏转准确度的主要因素, 对各个误差项值进行计算, 评价了装置的准确度指标. 该装置可以满足通信终端精跟瞄动静态性能检测的要求, 并可应用于其他小视场光束传递检测.

1 装置的设计原理

1.1 设计原理

图 1 为本装置的光学原理, 两个绕正交轴旋转的相同棱镜为本装置的光学元件, 其主截面位置相互垂直, 棱角均为 α . 分别受驱动力 F_1 和 F_2 的作

用, 第一个棱镜绕水平轴旋转, 第二个棱镜绕垂直轴旋转. 入射光束折射后在水平方向和垂直方向产生精确的光束偏转.

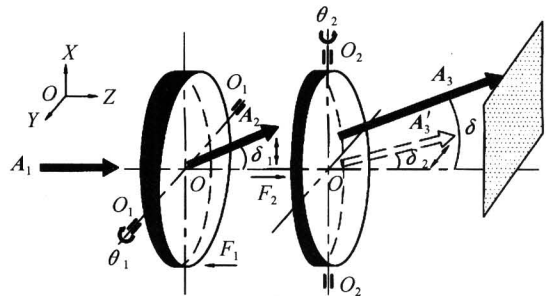


图 1 双棱镜光束偏转原理

Fig. 1 Schematic diagrams for double-prism refraction

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, 薄端指向 Y 轴正方向, 绕 X 轴旋转. 两个棱镜的楔形面都朝内. 规定棱镜旋转方向逆时针为正, 顺时针为负, 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.

为简化分析, 设单色光束沿 Z 轴正向垂直 XOY 面入射, 则入射矢量 $A_1 = (0, 0, 1)$, 光束经过第一个棱镜后的出射矢量为

$$A_2 = (\sin \delta_1, 0, \cos \delta_1) \quad (1)$$

式中

$$\delta_1 = -\theta_1 + \arcsin \left\{ \frac{\sin \alpha \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_1} + \cos \alpha \sin \theta_1}{\cos \alpha \sin \theta_1} \right\} - \alpha \quad (2)$$

从式(2)可以看出, 第一块棱镜使光束产生 x 方向的偏转.

$$\delta_2 = \alpha + \theta_2 + \arcsin \left\{ \frac{\sin \alpha \sqrt{n^2 - \sin^2 (\alpha - \theta_2)} - \cos \alpha \sin (\alpha + \theta_2)}{\cos \alpha \sin (\alpha + \theta_2)} \right\} - \alpha \quad (3)$$

式中, $\bar{n} = \sqrt{n^2 - (n^2 - 1) / \tan^2 (\arccos (\sin \delta_1))}$ 最后

*上海市科学技术发展基金(046105004)和中国科学院创新计划资助

Tel: 021-69918762 Email: yflich@yahoo.com.cn

收稿日期: 2005-05-20

的出射光束可以表示为

$$\mathbf{A}_f = (\sin \delta_1, -\cos \delta_1 \sin \delta_2, \cos \delta_1 \cos \delta_2) \quad (4)$$

定义视场以垂直张角和水平张角来表示. 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. 根据式(4), 垂直张角和水平张角的表达式为

$$\text{垂直张角: } \arctan \frac{x}{z} = \arctan \left(\frac{\tan \delta_1}{\cos \delta_2} \right) \quad (5)$$

$$\text{水平张角: } \arctan \frac{y}{z} = -\delta_2 \quad (6)$$

1.2 设计结果

本装置的设计指标为: 光束偏转范围为 $500 \mu\text{rad}$, 在整个偏转范围内光束的偏转角准确度优于 $0.8 \mu\text{rad}(1\sigma)$. 考虑到机械结构, 限制两个棱镜的最大旋转角度不大于 7° .

按照这个要求, 根据式(2)和(3)选取棱角, 棱角越小光束的偏转准确度就越高, 但是相同的棱镜转角下光束的偏转范围就越小, 棱角大则情况相反^[8]. 本装置取棱角 α 为 4° , 此时棱镜每旋转 1arcmin , 光束变化约为 $1 \mu\text{rad}$ 量级.

按式(5)和(6), 确定第一棱镜旋转角度为 $0 \sim 5^\circ$, 顺时针方向旋转; 第二棱镜旋转角度为 $0 \sim 7^\circ$, 逆时针方向旋转. 计算结果表明, 此时垂直张角和水平张角的变化量分别为 $514 \mu\text{rad}$ 和 $535 \mu\text{rad}$, 相对设计要求都有一定余量. 这样, 两个棱镜的初始位置都在 0° , 楔形面朝内, 主截面平行于 Z 坐标轴. 工作时两个棱镜的薄端均向外旋转.

2 影响光束偏转准确度的主要因素

2.1 主要因素分析

光束偏转准确度主要和棱镜偏转角度、棱镜棱角误差、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误差等因素有关.

为便于误差分析, 对上面公式进行适当的近似. 由于棱镜的顶角和转动角度较小, 因此 δ_1 和 δ_2 都比较小, 式(5)、(6)可以近似为

$$\text{垂直张角: } \arctan(x/z) \approx \delta_1 \quad (7)$$

$$\text{水平张角: } \arctan(y/z) \approx -\delta_2 \quad (8)$$

由于 $\bar{n} \approx n$, 经过简化后发现, 垂直方向的误差主要和第一棱镜有关, 水平方向的误差主要和第二棱镜有关.

因为两个棱镜独立对光束偏转产生作用, 所以首先分析影响第一棱镜偏转的误差因素, 得到垂直方向偏转误差结果, 再对影响第二棱镜偏转的误差因素进行分析, 得到水平方向偏转误差结果, 最后对

同时影响两个棱镜间的误差因素进行分析.

首先以第一棱镜为例讨论光束的偏转误差. 据此写出光束在垂直方向偏转角的全微分:

$$d\delta_1 = \frac{\partial \delta_1}{\partial \theta_1} d\theta_1 + \frac{\partial \delta_1}{\partial \alpha_1} d\alpha_1 + \frac{\partial \delta_1}{\partial n_1} dn_1 \quad (9)$$

根据式(2)得到

$$\frac{\partial \delta_1}{\partial \theta_1} = -1 + \frac{\cos \alpha_1 \cos \theta_1 - \frac{\cos \theta_1 \sin \alpha_1 \sin \theta_1}{\sqrt{n_1^2 - \sin^2 \theta_1}}}{\sqrt{1 - [\sin \theta_1 \cos \alpha_1 + \sqrt{n_1^2 - \sin^2 \theta_1} \sin \alpha_1]^2}} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \delta_1}{\partial \alpha_1} = -1 + \frac{-\sin \alpha_1 \sin \theta_1 + \cos \alpha_1 \sqrt{n_1^2 - \sin^2 \theta_1}}{\sqrt{1 - [\sin \theta_1 \cos \alpha_1 + \sqrt{n_1^2 - \sin^2 \theta_1} \sin \alpha_1]^2}} \quad (11)$$

$$(\partial \delta_1 / \partial n_1) = (n_1 \sin \alpha_1) / (\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_1} \cdot$$

$$\sqrt{1 - [\sin \theta_1 \cos \alpha_1 + \sqrt{n_1^2 - \sin^2 \theta_1} \sin \alpha_1]^2}) \quad (12)$$

当两个棱镜主截面位置间存在偏差时, 也会产生光束偏转误差. 主截面位置偏差主要指主截面间有一定垂直度误差或者棱镜主截面与旋转轴不垂直的情况. 该误差同时影响两个棱镜的偏转准确度.

一般的, 设两个旋转棱镜间相对转角为 β 时, 则出射光束的总偏转角可以近似表示为^[8]

$$\delta_3 = 2(n-1)\alpha \cos(\beta/2) \quad (13)$$

式中 $\beta/2$ 为单个棱镜转过的角度. 在本装置中两个棱镜主截面间相互垂直, 即 $\beta = \pi/2$, 设两个棱镜主截面间的垂直度误差为 $\Delta\beta$, 则

$$\delta_3 = 2(n-1)\alpha \cos\left(\frac{\beta + \Delta\beta}{2}\right) \quad (14)$$

此时由垂直度产生的误差为

$$\Delta\delta_3 = 2(n-1)\alpha \cos\left(\frac{\beta + \Delta\beta}{2}\right) - 2(n-1)\alpha \cos\frac{\beta}{2} \quad (15)$$

2.2 计算结果

对上述结论进行计算, 结果如图 2~5.

图 2 为光束偏转角的变化率情况, 随着棱镜旋转角度的增加, 光束偏转角变化率值单调递增. 当旋转

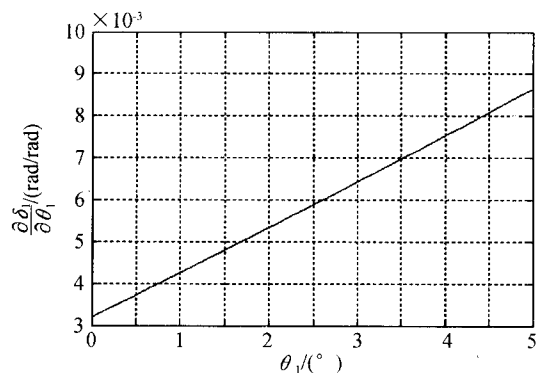


图 2 光束随棱镜转角的变化率

Fig. 2 Change rate of light beam with the prism rotation angle

角度为 $0 \sim 5^\circ$ 时, 光束随棱镜转角的变化率 $\partial\delta_1/\partial\theta_1$ (rad/rad) 最大值为 0.00865, 即 $0.0419\mu\text{rad}/\text{arcsec}$ (棱镜位置 5°); 最小值为 $0.00320\text{rad}/\text{rad}$, 即 $0.0155\mu\text{rad}/\text{arcsec}$ (棱镜位置 0°), 平均值为 $0.0287\mu\text{rad}/\text{arcsec}$. 棱镜转角误差属于随机误差, 引起该误差的主要因素源自装置的机械及控制系统误差.

图 3 给出了由于折射率 n 均匀性引起的光束偏转角的误差. 当折射率 n 在 1.516 和 1.5185 之间变化时, $\partial\delta_1/\partial n$ 的最大值为 0.0712rad, 即折射率 n 的均匀性为 $1\text{E}-6$ 时, 引起的光束偏转角误差约为 $0.0712\mu\text{rad}$. 折射率均匀性对光束偏转角度的影响不随棱镜旋转角度 θ 的变化而变化. 本装置要求光束偏转角分辨率为 $0.8\mu\text{rad}$ 时, 根据光学均匀性要求, 玻璃折射率的最大偏差 Δn_{max} 优于 $\pm 2\text{E}-6$. 折射率均匀性误差计为随机误差.

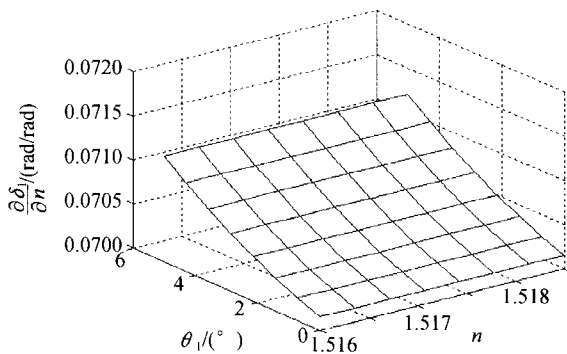


图 3 折射率均匀性对光束的影响

Fig. 3 Light beam affected by the homogeneity of refractive index

由图 4 可见, 棱角误差对光束偏转角的影响比较大. 随着棱角的增大光束偏转角单调增加, 且棱镜旋转角度越大, 对光束偏转角的影响越严重. 当旋转角 $\theta=0^\circ$, 棱角 α 在 $4^\circ \sim 6^\circ$ 之间变化时, $\partial\delta_1/\partial\alpha$ (rad/rad) 的最大值为 0.5280, 即 $2.56\mu\text{rad}/\text{arcsec}$, 最小值为 0.5218, 即 $2.53\mu\text{rad}/\text{arcsec}$. 当旋转角 $\theta=5^\circ$, 棱角 α 在 $4^\circ \sim 6^\circ$ 之间变化时, $\partial\delta_1/\partial\alpha$ 的最大值为 0.5441, 即 $2.64\mu\text{rad}/\text{arcsec}$, 最小值为 0.5334, 即 $2.59\mu\text{rad}/\text{arcsec}$. 棱角误差属于系统误差.

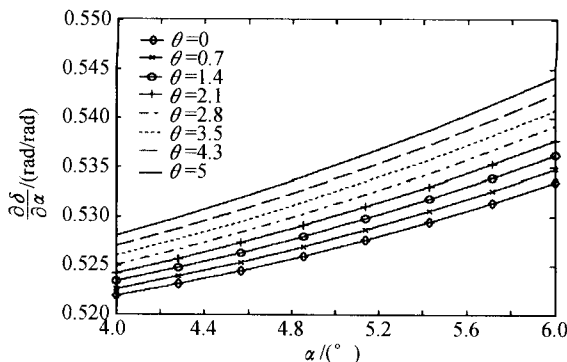


图 4 棱角误差对光束的影响图

Fig. 4 Light beam affected by the wedge angle error

上述三项误差在第二棱镜中同时存在, 即水平方向误差分析与上述类似, 不再赘述.

图 5 为因为两个棱镜主截面间不垂直而产生的光束偏转角误差. 当不垂直量较小时, 如图示在 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 之间, 光束偏转角误差与不垂直量近似成线性关系. 垂直度每变化 1arcsec , 引起的光束偏转误差为 $0.129\mu\text{rad}$. 单个棱镜主截面与旋转轴不垂直而产生的光束偏转角误差可以近似为该值的一半, 即 $0.065\mu\text{rad}/\text{arcsec}$. 垂直度误差属于系统误差.

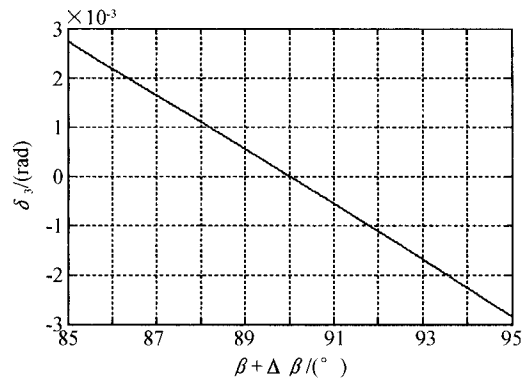


图 5 主截面间垂直度对光束偏转角的影响

Fig. 5 Light beam affected by the perpendicularity between two principle sections

3 装置的准确度分析

3.1 装置的技术方案

本装置采用开环控制^[9], 两个直线步进电机通过顶杆推进两个棱镜分别绕水平轴和垂直轴旋转, 转动轴的一侧都布置有模块式角度编码器^[10], 实时测量两个棱镜的转角. 两个直线电机的步距角为 $1.8^\circ/\text{step}$, 步长为 $2\mu\text{m}$, 作用力臂长 65mm ; 两个编码器的推荐测量步距 0.0015° , 约 5.4arcsec . 取步进电机的 $1/4$ 步长为最小进给, 则根据上述计算结果, 引起的棱镜最小转角为 1.518arcsec , 相应的光束平均偏转误差 $0.0436\mu\text{rad}$. 考虑到与棱镜最小转角的匹配, 取编码器的 $1/4$ 步距 (1.35arcsec) 为最小读数步距, 即系统的读数分辨率, 对应的光束偏转平均读数分辨率为 $0.0387\mu\text{rad}$.

3.2 具体误差分析

上述系统误差可以通过测量和程序修正的方法进行校正, 故误差分析时不予考虑, 而只计算随机误差的影响. 为了分析方便, 误差计算时将各种随机误差等效到棱镜转角 (即转动轴上) 误差上统一进行考虑, 进而求出光束的偏转误差. 主要误差包括:

1) 机械系统的随机误差. 本装置采用顶杆加转动轴的驱动方式, 主要的随机误差来源于机械转动部分, 经过计算转动误差为 $\sigma_1 = 12.3\text{arcsec}$;

2) 角度信息的数字量化误差: 最大值为步进电

机每前进四分之一步(如丢步、失步等)引起棱镜转角 $\theta_{1,2}$ 为 $\sigma_2 = 1.52\text{arcsec}$;

3) 编码器读数误差: 编码器最大读数误差等于编码器读数分辨率, 即棱镜转角的读数分辨率. 编码器读数分辨率已经设计为基本刻线的四倍频细分, 即每一步距被细分为 1.35arcsec , 所以编码器读数误差为 $\sigma_3 = 1.35\text{arcsec}$;

4) 棱镜折射率误差等效到棱镜转角上引起的误差为 $\sigma_4 = 2.51\text{arcsec}$.

均方合成上述四项误差, 则棱镜转角综合误差, 即总误差为: $\sigma_{\text{rms}} = 12.72\text{arcsec}$.

4 结 论

由计算结果可知, 由棱镜转角引起的光束偏转的平均角度变化率为 $0.0287\mu\text{rad}/\text{arcsec}$. 棱镜转角的读数分辨率(编码器步距 $1/4$ 细分)为 $1.35\mu\text{rad}/\text{arcsec}$, 相应的光束偏转平均读数分辨率 $0.0387\mu\text{rad}/\text{arcsec}$.

棱镜转角综合误差为 $\sigma_{\text{rms}} = 12.72\text{arcsec}$, 相应的引起光束平均偏转角度误差为 $0.365\mu\text{rad}$, 此值即为系统实际准确度. 显然, 这种读数分辨率和系统实际准确度的匹配是合理的, 即读数分辨率小于系统实际准确度. 本系统的设计技术指标是光束偏转准确度优于 $0.8\mu\text{rad}(1\sigma)$, 上述的读数分辨率和系统实际准确度都满足该要求.

参 考 文 献

1 Popescu A F, Furch B. Status of the European developments for laser intersatellite communications.

Proc of SPIE, 1993, **1866**: 10~20

- 2 高卫. 激光束衍射极限倍数 β 的确定方法. 光子学报, 2003, **32**(9): 1038~1040
Gao W. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9): 1038~1040
- 3 Racho C S, Portillo A. Characterization and design of digital pointing subsystem for optical communication demonstrator. *Proc of the SPIE*, 1999, **3615**: 250~261
- 4 Planche G, Laurent B, *et al.* Silex final ground testing and in-flight performances assessment. *Proc of SPIE*, 1999, **3615**: 64~77
- 5 Goodwein F E. A review of operational laser communication systems. *Proc of the IEEE*, 1970, **58**(10): 1746~1752
- 6 Juhala R E, Dube G. Refractive beam steering. *Proc of the SPIE*, 2004, **5528**: 282~292
- 7 Dagmar Senderáková, Anton Štrba. Analysis of a wedge prism to perform small-angle beam deviation. *Proc of SPIE*, 2003, **5036**: 148~151
- 8 Sandoval J, Paez G, Srojniak M. Opto-mechanical design of a prism rotator. *Proc of SPIE*, 2002, **4486**: 170~180
- 9 何国经, 张建奇, 徐军. 玫瑰扫描亚成像系统的性能分析. 光子学报, 2004, **33**(9): 1127~1130
He G J, Zhang J Q, Xu J. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9): 1127~1130
- 10 吕涛, 刘德森, 刘志麟, 等. 基于敏感 Fabry-Perot 腔光纤甫位移传感器的原理与设计. 光子学报, 2005, **34**(7): 1049~1052
Lü T, Liu D S, Liu Z L, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7): 1049~1052

Design and Analysis of High Accuracy Light Beam Deflection Device

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

¹Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

²Graduate School, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Received date: 2005-05-20

Abstract The deflection expressions, based on the vector refraction theorem, are derived from the light beam deflection through a pair of orthogonal prisms, and the main design parameters of the device are confirmed. The main error items are especially analyzed by the method of numerical simulation, and the total error and the actual precision index is also presented. The result shows the light beam, with the deflection precision of less than $0.8\mu\text{rad}$, can be deflected $500\mu\text{rad}$ in both the horizontal and the vertical field angle, the deflection precision of which is mostly influenced by the random errors. The total error converted on the rotation angle of prism is 12.72 arcsec , which causes the deflection error of light beam $0.365\mu\text{rad}$, greater than the reading resolution of system $0.0387\mu\text{rad}$ and less than the precision index of light beam deflection $0.8\mu\text{rad}$, so the design is rational and feasible.

Keywords Optics device; Inter-satellite laser communications; Double-prism; Numerical simulation



Li Anhu was born in 1974, in Anhui, P. R. China. Now he is a candidate for Ph. D. in Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Shanghai, China. His major research interests are computer aided machine design, opto-mechanism design, optical testing, etc. .