

旋转双棱镜指向系统转角补偿偏差修正方法

邱赛^{1,2}, 盛磊^{1*}, 高世杰¹, 刘永凯¹, 伞晓刚¹, 吴佳彬¹

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对旋转双棱镜系统解算困难、误差源众多和指向精度较低的问题,提出了一种补偿旋转双棱镜指向系统转角的修正方法,采用求偏导和建立全微分方程的方法建立光束指向误差与棱镜转角误差关系,解算出补偿角。经实验验证:在99.57%的指向区域中,指向偏差最大值由 1.8742° 降低为 1.4753° ,均方根由 0.1401° 降低为 0.0893° ,补偿棱镜转角修正方法可有效提高指向精度。

关键词:激光通信; 旋转双棱镜; 指向模型; 偏差修正; 系统误差

中图分类号:TN384 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2021)02-0041-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.02.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Correction method for angle compensation deviation of rotating biprism pointing system

QIU Sai^{1,2}, SHENG Lei^{1*}, GAO Shijie¹, LIU Yongkai¹, SAN Xiaogang¹, WU Jiabin¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Aiming at the problems of the rotating biprism system, such as the difficulty of solution, many error sources and low pointing accuracy, a correction method is proposed to compensate the rotation angle of the rotating biprism pointing system. In this paper, the relationship between the beam pointing error and the prism angle error is established by solving the partial derivative and establishing the total differential equation, and the compensation angle is calculated. Experiments have verified that in 99.57% of the pointing area, the maximum pointing deviation is reduced from 1.8742° to 1.4753° , and the root mean square is reduced from 0.1401° to 0.0893° . The compensation prism angle correction method can effectively improve the pointing accuracy.

Key words: laser communication; rotating biprism; pointing model; deviation correction; system error

0 引言

在空间激光通信中,通信终端对质量和体积要求较高^[1],传统的指向系统由于使用了万向式指向机构,其质量普遍较大^[2-8],而旋转双棱镜系统可以在较小的体积下实现较大的光束偏转,因此旋转双棱镜系统非常适用于空间激光通信环境中^[9-10]。然而,旋转双棱镜

系统中,出射光束与双棱镜转角间为非线性关系,解算困难^[10],且系统中存在较多的误差源影响光束指向,因此旋转双棱镜系统指向精度较低^[11-12]。目前,旋转双棱镜的指向方法主要有一级近轴近似方法和非近轴光线追迹方法。国防科学技术大学周远等人^[13-14]对比分析了一级近轴近似和非近轴光线追迹这2种方法的研究结果,并进行了旋转双棱镜指向实验验证,他们发现非近轴光线追迹方法能准确地描述系统光束偏转机制,而传统的一级近轴近似方法的分析结果与实验值存在偏差,且光束的偏转角越大,偏差越明显。但是,周远等人的研究成果并未考虑系统存在的误差源对指向结果的影响。文献^[11]研究了装配误差对非近轴光线追迹方法解算准确度的影响,其实验结果表明轴承中的误差对指向精度影响比较大。一级近轴近似

收稿日期:2020-08-08。

基金项目:长光复旦联合基金(NO.Y80732E)资助。

作者简介:邱赛(1997—),男,河南泌阳人,硕士研究生,2017年于中国地质大学(武汉)获得学士学位,现就读于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所机械电子工程专业,主要从事激光通信领域的旋转双棱镜光束指向系统的误差分析与修正方面的研究工作。

*通信作者:盛磊(E-mail: sljlu@163.com)。



邱赛, 盛磊, 高世杰, 等: 旋转双棱镜指向系统转角补偿偏差修正方法

和非近轴光线追迹这两种解算方法均未考虑实际旋转双棱镜系统中存在的系统误差, 而文献[11]的研究仅仅分析了误差对指向精度的影响, 未补偿或修正系统误差。本文分析非近轴光线追迹方法的指向方案, 结合旋转双棱镜指向原理, 提出采用补偿双棱镜转角的方法将实际指向位置修正至理论指向位置的修正方法。

1 旋转双棱镜指向模型

本文基于非近轴光线追迹方法对旋转双棱镜实际系统进行偏差修正, 引用文献[13]中的旋转双棱镜模型作为本文的旋转双棱镜系统理论指向模型, 旋转双棱镜系统原理图如图 1 所示。

非近轴光线追迹方法得到的出射光束的方向余弦为:

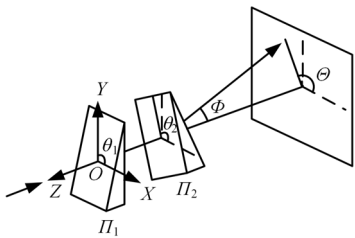


图 1 旋转双棱镜系统原理图

$$\begin{cases} K = a_1 \cos \theta_1 + a_3 \sin \alpha_2 \cos \theta_2 \\ L = a_1 \sin \theta_1 + a_3 \sin \alpha_2 \sin \theta_2 \\ M = a_2 - a_3 \cos \alpha_2 \end{cases} \quad (1)$$

其中, K 、 L 和 M 分别为出射光束的方向余弦; θ_1 、 θ_2 分别为棱镜 Π_1 、 Π_2 的旋转角, 其范围为 $0 \sim 360^\circ$; a_1 、 a_2 和 a_3 为计算过程中用到的参数, 计算如式(2)所示。

$$\begin{cases} a_1 = \frac{n_2}{n_1} \sin \alpha_1 (\cos \alpha_1 - \sqrt{n_1^2 - \sin^2 \alpha_1}) \\ a_2 = \frac{n_2}{n_1} (\sqrt{n_1^2 - \sin^2 \alpha_1} \cos \alpha_1 + \sin^2 \alpha_1) \\ a_3 = -(a_1 \sin \alpha_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) - a_2 \cos \alpha_2) + \sqrt{1 - n_2^2 + (a_1 \sin \alpha_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) - a_2 \cos \alpha_2)^2} \end{cases} \quad (2)$$

其中, α_1 、 α_2 分别为棱镜 Π_1 、 Π_2 的楔角, n_1 、 n_2 分别为棱镜 Π_1 、 Π_2 的折射率。出射光束的偏转角 Φ 和方位角 Θ 分别为:

$$\Phi = \arccos(-M), \Theta = \begin{cases} \arctan(\frac{L}{K}), K > 0, L \geq 0 \\ \arctan(\frac{L}{K}) + 2\pi, K \geq 0, L < 0 \\ \arctan(\frac{L}{K}) + \pi, K < 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, Φ 、 Θ 分别为出射光束偏转角和方位角。当方向余弦 K 、 L 同时为 0 时, 出射光束无偏转, 方位角 Θ 无意义, 该指向为系统奇异点^[6]。此时, 光斑位于靶面中心, 双棱镜的旋转角 θ_1 、 θ_2 之差为 180° 或者 -180° 。在本文中, 奇异点附近的光束指向不予考虑。

2 旋转双棱镜偏差修正

2.1 修正原理

本文采用 Zmax 软件分别仿真理论旋转双棱镜系统出射光束指向区域和带有误差源的旋转双棱镜出射光束指向区域。在误差影响下的旋转双棱镜系统中, 误差分别设定为: 棱镜 Π_1 倾斜角为 $-30'$, 棱镜 Π_2 倾斜角为 $40'$, 这 2 个误差是随机选定的。旋转双棱镜系统的 2 块棱镜的楔角均为 17.2° , 折射率均为 1.9228, 直径均为 5 mm。靶面与棱镜间距为 12 mm, 采用 Zmax 仿真得到的指向区域基本重合, 分辨比较困难, 因此本文采用示意图说明 2 个指向区域间的关系, 如图 2 所示。

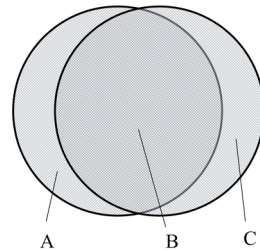


图 2 光束指向区域示意图

指向区域分为 A、B 和 C 三部分, 其中, 理论光束指向区域为 A+B 区域, 是一个直径为 19.96 mm 的标准圆形。引入误差源的光束实际指向区域为 B+C 区域, 是一个长轴为 20.21 mm、短轴为 19.65 mm 的椭圆形。B 区域为理论指向区域与实际指向区域重合区, A、C 区域为理论指向区域与实际指向区域未重合区, 其中 A 区域约占理论区域的 0.32%, 可将其忽略。因此, 本文采用补偿旋转双棱镜转角的方法将偏离理论位置的误差修正到理论位置, 提高指向精度。

2.2 修正算法

基于上述旋转双棱镜系统光束的指向模型, 即式(1)~式(3), 分别求出 Φ 、 Θ 对 θ_1 、 θ_2 的偏导数 PA_1 (即 $d\Phi/d\theta_1$)、 PA_2 (即 $d\Phi/d\theta_2$)、 PB_1 (即 $d\Theta/d\theta_1$) 和 PB_2 (即 $d\Theta/d\theta_2$), 如式(4)所示。

$$\begin{aligned} PA_1 &= \cos \alpha_2 a_1 \sin \alpha_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) [1 - (a_2 - a_3 \cos \alpha_2)^2]^{-\frac{1}{2}} - \\ &\quad \cos \alpha_2 [a_1 \sin \alpha_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) - a_2 \cos \alpha_2] \times a_1 \sin \alpha_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) \times \\ &\quad \left\{ 1 - n_2^2 + [a_1 \sin \alpha_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) - a_2 \cos \alpha_2]^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \times \\ &\quad (1 - (a_2 - a_3 \cos \alpha_2)^2)^{-\frac{1}{2}} \} \\ PA_2 &= -\cos \alpha_2 a_1 \sin \alpha_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) [1 - (a_2 - a_3 \cos \alpha_2)^2]^{-\frac{1}{2}} + \\ &\quad \cos \alpha_2 [a_1 \sin \alpha_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) - a_2 \cos \alpha_2] \times a_1 \sin \alpha_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) \times \\ &\quad \left\{ 1 - n_2^2 + [a_1 \sin \alpha_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) - a_2 \cos \alpha_2]^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \times \\ &\quad (1 - (a_2 - a_3 \cos \alpha_2)^2)^{-\frac{1}{2}} \} \\ PB_1 &= (a_7 K - La_8) \times [a_1^2 + (a_3 \sin \alpha_2)^2 + 2a_1 a_3 \sin \alpha_2 \cos(\theta_2 - \theta_1)]^{-1} \\ PB_2 &= (a_{12} K - La_{13}) \times [a_1^2 + (a_3 \sin \alpha_2)^2 + 2a_1 a_3 \sin \alpha_2 \cos(\theta_2 - \theta_1)]^{-1} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $a_4 \sim a_{13}$ 的计算如式(5)所示。

$$\begin{aligned} a_4 &= [a_1 \sin \alpha_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) - a_2 \cos \alpha_2] a_1 \sin \alpha_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) \\ a_5 &= \left\{ 1 - n_2^2 + [a_1 \sin \alpha_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) - a_2 \cos \alpha_2]^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \times \\ &\quad (1 - (a_2 - a_3 \cos \alpha_2)^2)^{-\frac{1}{2}} \} \\ a_6 &= -a_1 \sin \alpha_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) + a_4 / a_5 \\ a_7 &= a_1 \cos \theta_1 + \sin \alpha_2 \sin \theta_2 a_6 \\ a_8 &= -a_1 \sin \theta_1 + \sin \alpha_2 \cos \theta_2 a_6 \\ a_9 &= [a_1 \sin \alpha_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) - a_2 \cos \alpha_2] a_1 \sin \alpha_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) \\ a_{10} &= \left\{ 1 - n_2^2 + [a_1 \sin \alpha_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) - a_2 \cos \alpha_2]^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \} \\ a_{11} &= a_1 \sin \alpha_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) - a_9 / a_{10} \\ a_{12} &= a_3 \sin \alpha_2 \cos \theta_2 + \sin \alpha_2 \sin \theta_2 a_{11} \\ a_{13} &= -a_3 \sin \alpha_2 \sin \theta_2 + \sin \alpha_2 \cos \theta_2 a_{11} \end{aligned} \quad (5)$$

本文用 Matlab 计算得到 PA_1 、 PA_2 、 PB_1 和 PB_2 , 仿真结果表明: 仅当 θ_1 与 θ_2 之差为 180° 或 -180° 时, PA_1 、 PA_2 、 PB_1 和 PB_2 不连续, 此时光斑位置在中心点, 即奇异点上, 其余区域的 PA_1 、 PA_2 、 PB_1 和 PB_2 均连续, 可用于建立全微分方程。

根据指向模型, 建立全微分方程如式(6)所示。

$$\begin{cases} \Delta \Phi = \Delta \theta_1 PA_1 + \Delta \theta_2 PA_2 \\ \Delta \Theta = \Delta \theta_1 PB_1 + \Delta \theta_2 PB_2 \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\Delta \Phi$ 、 $\Delta \Theta$ 分别为出射光束偏转角误差和方位角误差, $\Delta \theta_1$ 、 $\Delta \theta_2$ 分别为棱镜 Π_1 、 Π_2 的转角补偿角。本实验采用曲面拟合方法对 $\Delta \theta_1$ 、 $\Delta \theta_2$ 进行拟合, 拟合公式如式(7)所示。

$$\begin{cases} \Delta \theta_1 = (\Delta \Theta \times PA_2 - \Delta \Phi \times PB_2) (PB_1 \times PA_2 - PB_2 \times PA_1)^{-1} = \\ \quad r_1 \theta_1^2 + r_2 \theta_1 + r_3 \theta_2^2 + r_4 \theta_2 + r_5 \\ \Delta \theta_2 = (\Delta \Theta \times PA_1 - \Delta \Phi \times PB_1) (PB_1 \times PA_2 - PB_2 \times PA_1)^{-1} = \\ \quad r_6 \theta_1^2 + r_7 \theta_1 + r_8 \theta_2^2 + r_9 \theta_2 + r_{10} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $r_1 \sim r_{10}$ 为待拟合的参数。式(7)中, $\Delta \Phi$ 、 $\Delta \Theta$ 可以通过相机靶面获取的光斑位置得到, PA_1 、 PA_2 、 PB_1 和 PB_2 由式(4)计算得到, θ_1 、 θ_2 可通过电机反馈的角度获取, 其范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$, 楔角 α_1 、 α_2 均为 17.2° , 折射率 n_1 、 n_2 均为 1.9228。所用棱镜参数与 Zmax 仿真参数保持一致。将拟合后的 $\Delta \theta_1$ 、 $\Delta \theta_2$ 代入指向模型中修正光束指向。

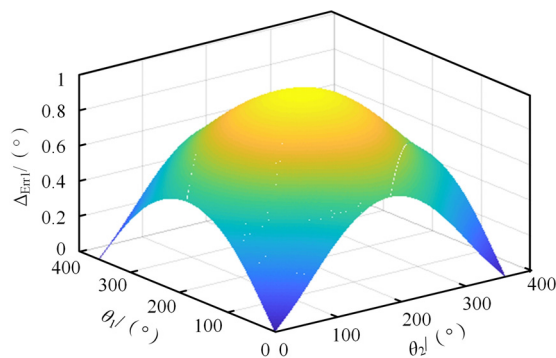
2.3 Matlab 仿真结果

本文在计算机中对旋转双棱镜系统进行仿真分析, 采用三角函数模拟作为误差加入指向模型的双棱镜转角中进行仿真, 仿真中不考虑奇异点附近的光束指向数据。本文将偏转角和方位角误差平方和的平方

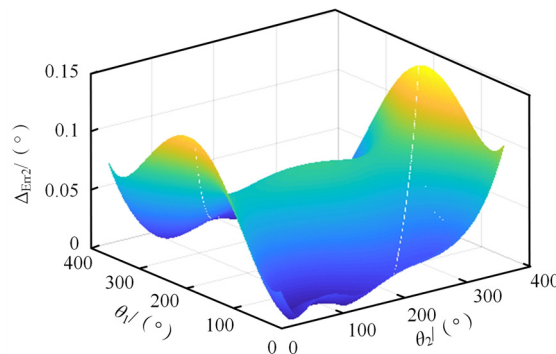
根作为指向误差的总误差 Δ_{Err} , 计算公式如式(8)所示。修正前、后的总误差图如图3所示。其中, Δ_{Err1} 为修正前总误差, Δ_{Err2} 为修正后总误差。

$$\Delta_{\text{Err}} = \sqrt{\Delta \Phi^2 + \Delta \Theta^2} \quad (8)$$

由 Matlab 仿真可知, 旋转双棱镜系统未修正时, 其最大指向误差为 1° , 指向误差的均方根为 0.2136° 。经上述修正算法修正后, 其最大指向误差为 0.1482° , 指向误差的均方根为 0.03° , 指向精度显著提高。



(a) 修正前总误差

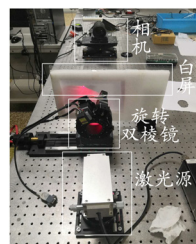


(b) 修正后总误差

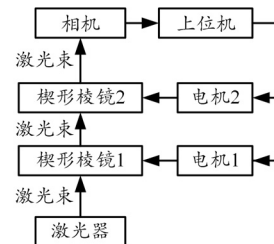
图3 仿真结果修正前、后总误差图

3 实验验证及结果分析

为验证补偿转角修正算法的有效性, 本文建立了旋转双棱镜实验平台, 如图4所示。在旋转双棱镜实验平台中, 上位机控制电机旋转, 电机通过齿轮系统带动2块棱镜转动, 2块棱镜耦合转动改变光束光程,



(a) 实物图



(b) 原理框图

图4 旋转双棱镜实验平台

邱赛, 盛磊, 高世杰, 等: 旋转双棱镜指向系统转角补偿偏差修正方法

实现光束偏转。激光器固定在实验台上, 激光器发射的激光束与棱镜直角面垂直, 激光透过 2 块棱镜最终入射至相机靶面形成光斑。相机将图像传输至上位机进行图像质心提取, 可获取高精度的光斑位置, 由此可计算出射光束实际指向位置。由于相机视野较小, 本实验中采用白屏方法采集全部指向范围内光束实际指向位置。

图 5 为旋转双棱镜实验系统修正前光束指向偏差图。旋转双棱镜实验系统中存在诸多误差源, 未对

旋转双棱镜修正时, 其指向偏差较大。根据式(7)计算可得 2 个旋转棱镜的转角补偿角如图 6 所示。

由图 6 可知, $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_2$ 的部分区域数值过大, 拟合补偿意义不大, 且这部分指向区域仅占总指向区域的 0.43%, 集中于总指向区域的中心和外围边缘, 因此本实验不予补偿这部分区域。剩余的区域根据两棱镜转角差可分为 $-355^\circ \sim -185^\circ$ 、 $-175^\circ \sim -5^\circ$ 、 $5^\circ \sim 175^\circ$ 、 $185^\circ \sim 355^\circ$ 这 4 个区域, 采用 Matlab 拟合工具箱对这 4 个区域的 $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_2$ 分别进行多项式曲面拟合得拟合函数,

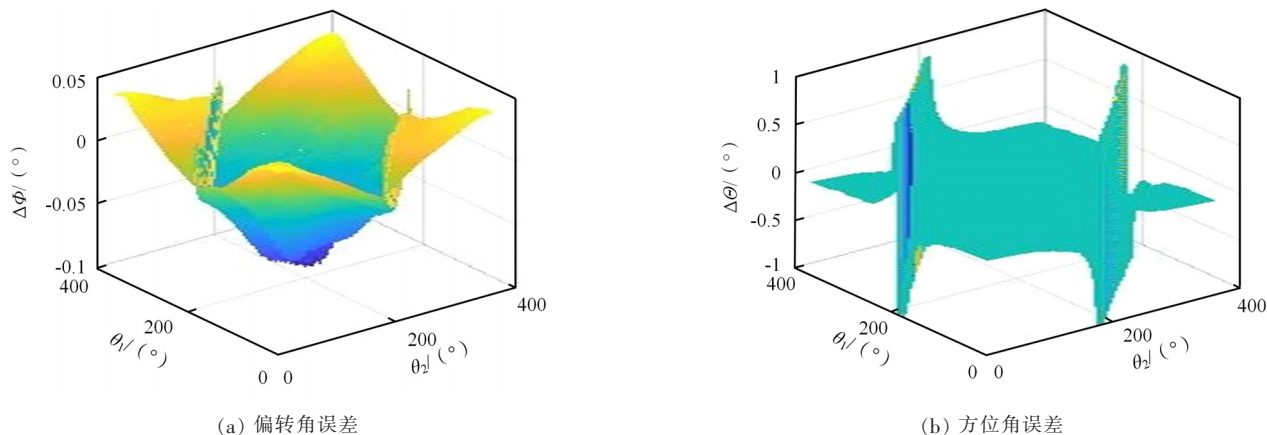


图 5 修正前光束指向偏差图

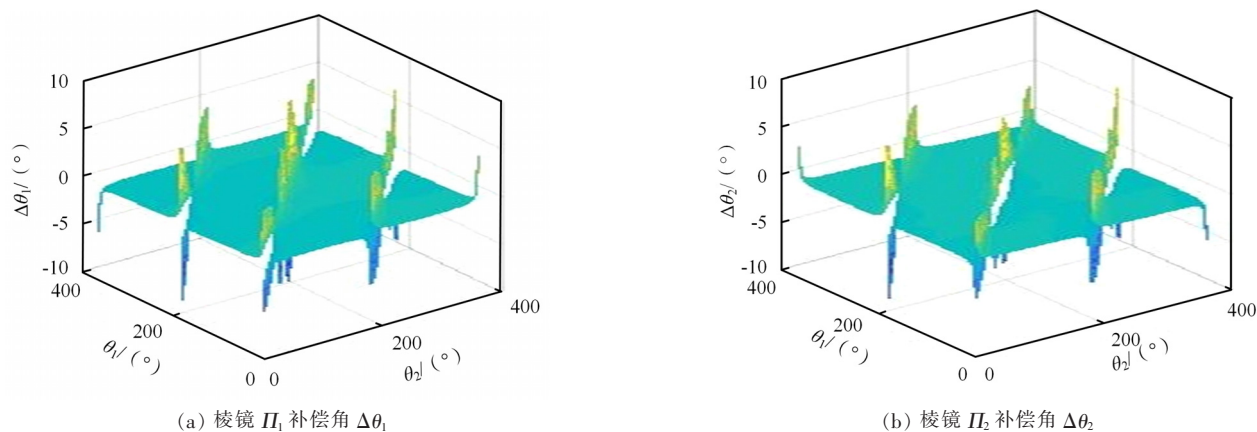


图 6 两旋转棱镜的补偿角图

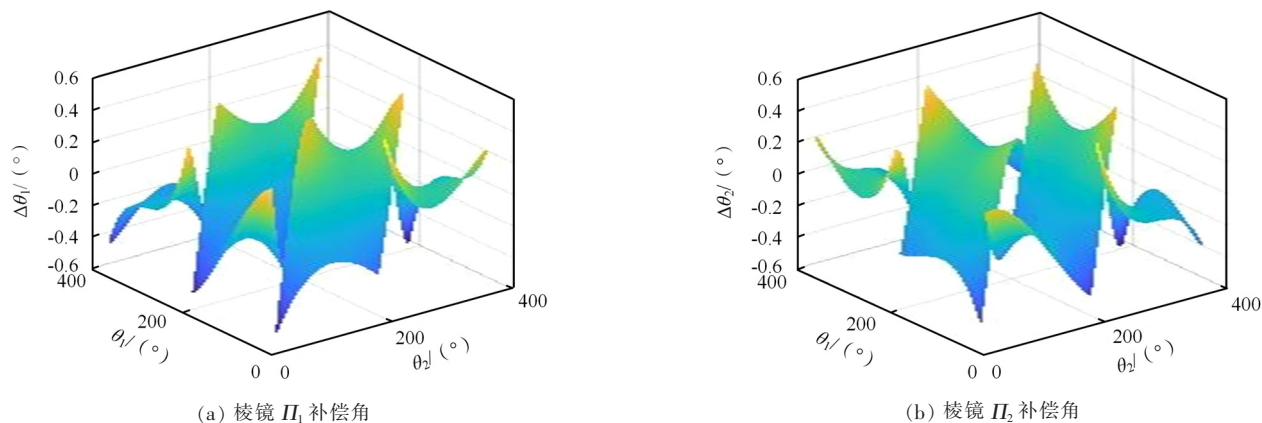
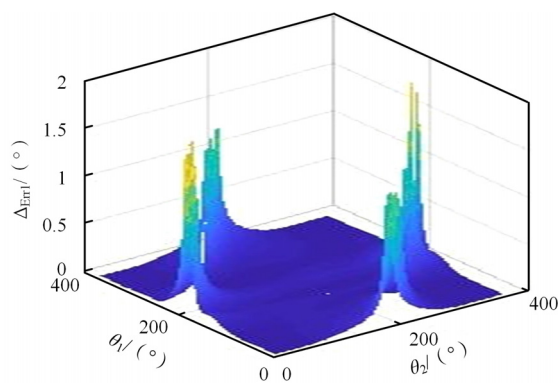


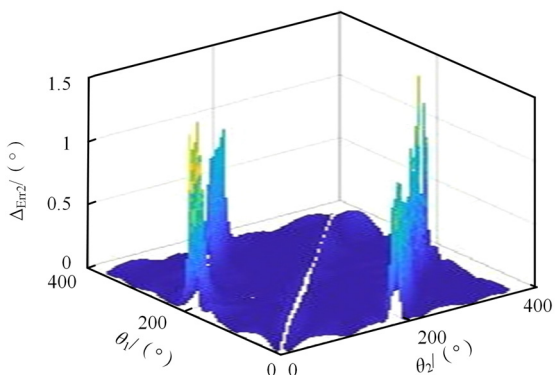
图 7 拟合后的补偿角图

将拟合后的函数代入式(1)~式(3)可修正指向光束。拟合后的 $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_2$ 如图 7 所示。

将补偿角 $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_2$ 加入指向模型中对旋转双棱镜系统进行修正, 并采用式(8)计算实际光束偏离理论光束的总误差。修正前的总误差 Δ_{Err1} 和修正后的总误差 Δ_{Err2} 如图 8 所示。本文在 99.57% 的指向区域中采用传统指向模型修正方法修正旋转双棱镜系统偏差, 修正前, 最大误差值为 1.8742° , 总误差的均方根为 0.1401° ; 修正后, 最大误差值为 1.4753° , 总误差的均方根为 0.0893° , 指向精度大幅提高, 修正效果比较明显。



(a) 修正前总误差



(b) 修正后总误差

图 8 修正前、后总误差图

4 结束语

本文根据非近轴光线追迹解法建立旋转双棱镜光束指向模型, 通过分析对比旋转双棱镜光束模型计算出的理想指向区域与实际指向区域, 得出采用补偿

棱镜转角修正光束指向偏差的方法; 为建立补偿方程, 采用求偏导分析旋转双棱镜指向误差与旋转双棱镜转角的变化关系, 建立旋转双棱镜出射光束与棱镜转角间的全微分方程组, 通过解算全微分方程组得到补偿方程, 根据实际测量的指向误差与补偿方程计算得到两棱镜的补偿角, 将两棱镜的补偿角补偿至光束指向模型得到修正方程。经实验验证: 在 99.57% 的指向区域中, 修正前的旋转双棱镜系统最大指向误差为 1.8742° , 指向误差均方根为 0.1401° ; 修正后的旋转双棱镜系统最大指向误差为 1.4753° , 指向误差均方根为 0.0893° , 旋转双棱镜系统指向精度显著提高, 转角补偿偏差修正方法可有效修正系统偏差, 提高指向精度。

参考文献:

- [1] 严希. 无线激光通信 APT 系统中的光斑跟踪系统研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [2] 王陆. 空间激光通信系统精跟踪技术研究 [J]. 光通信技术, 2014, 38(3): 53-55.
- [3] 裴兆炳, 艾勇, 单欣, 等. 激光通信 APT 远程控制系统 [J]. 光通信技术, 2018, 42(11): 41-44.
- [4] 曾智龙, 刘兴, 孙晖, 等. 空间激光通信最新进展及发展建议 [J]. 光通信技术, 2017, 41(6): 1-5.
- [5] 高铎瑞, 李天伦, 孙悦, 等. 空间激光通信最新进展与发展趋势 [J]. 中国光学, 2018, 11(6): 901-913.
- [6] 吴从均, 颜昌翔, 高志良. 空间激光通信发展概述 [J]. 中国光学, 2013, 6(5): 670-680.
- [7] 张敏, 佟首峰, 滕云杰. 空间激光通信单探测器复合跟踪控制技术研究 [J]. 激光与红外, 2019, 49(8): 983-986.
- [8] 周书芃. 消色差旋转双棱镜光束指向控制技术 [D]. 北京: 中国科学院研究生院(光电技术研究所), 2016.
- [9] 范大鹏, 周远, 鲁亚飞, 等. 旋转双棱镜光束指向控制技术综述 [J]. 中国光学, 2013, 6(2): 136-150.
- [10] 周书芃. 消色差旋转双棱镜光束指向控制技术 [D]. 北京: 中国科学院研究生院(光电技术研究所), 2016.
- [11] JING-SHYANG H, LI Yajun. Error sources and their impact on the performance of dual-wedge beam steering systems [J]. Appl. Opt., 2012, 51: 4168-4175.
- [12] ZHOU Yuan, LU Yafei, HEI Mo, et al. Pointing error analysis of Risley-prism-based beam steering system [J]. Appl. Opt., 2014, 53: 5775-5783.
- [13] 周远, 鲁亚飞, 黑沫, 等. 旋转双棱镜光束指向解析解 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1373-1379.