

光学学报

复合式激光通信系统多光轴一致性温度影响研究

李响^{1,3}, 刘赫^{2*}, 高亮^{1,3}, 安岩^{1,3}, 宋延嵩^{1,3}, 孙梓庭², 朱永奇², 席文强², 周晨²

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

²长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022;

³长春理工大学空间光电技术国家与地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022

摘要 包含章动、自适应光学以及精跟踪功能的复合激光通信系统的光路复杂, 环境温度改变时多光轴的一致性较难保证, 导致波前校正基准、跟踪零位偏移, 严重影响通信链路的建立。为解决以上问题, 对系统进行了一体化设计, 提出了针对多光轴复杂光路的光轴一致性的分析方法, 建立了多反射镜误差传递模型。经过计算可得: 在 10~30 °C 的环境温度范围内, 精跟踪支路与通信支路间、通信发射支路与通信接收支路间、精跟踪支路与自适应光学支路间同轴度误差优于 143.77 μrad 、27.38 μrad 和 131.66 μrad 。在实验室中进行 30 °C 温度拉偏实验, 实验结果表明: 光轴实际偏转角度与仿真结果之间的误差优于 13%。随后进行了楼宇间的 1 km 激光通信实验(环境温度 28 °C), 成功实现稳定通信。

关键词 光通信; 多光轴一致性; 仿真分析; 刚体位移; 误差传递模型

中图分类号 TH741

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1806002

Temperature Influence of Multi-Optical Axis Consistency in Compound Laser Communication System

Li Xiang^{1,3}, Liu He^{2*}, Gao Liang^{1,3}, An Yan^{1,3}, Song Yansong^{1,3}, Sun Ziting², Zhu Yongqi², Xi Wenqiang², Zhou Chen²

¹School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

²College of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

³National and Local Joint Engineering Research Center of Space and Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China

Abstract Due to the complex optical path, it is difficult to ensure the multi-optical axis consistency of the compound laser communication system that includes functions of nutation, adaptive optics, and fine tracking when the environment temperature changes, which leads to the drifts of wavefront correction benchmark and tracking zero position and seriously affects the establishment of communication links. In order to solve the above problems, this paper designs an integrated system, proposes a method for analyzing the multi-optical axis consistency of the complex optical path, and establishes an error propagation model of multiple reflective mirrors. After calculation, it is found that when the environment temperature ranges from 10 °C to 30 °C, the coaxial errors between the fine tracking path and the communication path, between the communication launching path and the communication receiving path, and between the fine tracking path and the adaptive optics path are less than 143.77 μrad , 27.38 μrad , and 131.66 μrad , respectively. The 30 °C temperature adjustment experiment is carried out in the laboratory, and the experimental results show that the error between the actual and simulated deflection angles of the optical axis is less than 13%. Furthermore, a laser communication experiment (at 28 °C) with a linear distance of 1 km between buildings is carried out to realize stable communication.

Key words optical communications; multi-optical axis consistency; simulation analysis; rigid body displacement; error propagation model

收稿日期: 2021-12-30; 修回日期: 2022-02-21; 录用日期: 2022-03-02

通信作者: liuhemagic@163.com

1 引言

无线激光通信技术具有高速率、高安全性的优势,近年来发展迅速,随着通信需求的持续增加,无线激光通信系统正向着高度集成化的方向发展^[1-3]。为提高系统全环境下的可通率,在系统中集成精密跟踪、自适应光学^[4-5]以及光纤章动^[6-7]功能,以提高通信系统的抗湍流、抗扰动的能力,这也导致激光通信系统的光路变得更加复杂,各光路之间的多光轴一致性是构建通信链路的基础,随着光路复杂程度的提高,实际中对系统多光轴一致性也提出了更高的要求。在针对光轴的相关研究中,徐丹慧等^[8]利用光学系统反射形成的牛顿环干涉条纹作为光轴平行的评判标准,并将其应用于光轴校准环节。张娟等^[9]利用光线追迹方法,通过用矢量表示光线轨迹,仿真出别汉棱镜安装误差造成的光轴偏差。另外,在其他光机热集成分析相关研究中,往往将面形条件作为研究对象进行仿真与优化^[10-14]。这些研究中对于温度引起的系统支路间光轴一致性偏差以及反射光路的光轴偏差的研究较少。为此,文中对复合式激光通信系统进行了一体化设计,并在光机

热集成分析的基础上,提出了针对多光轴复杂光路光轴一致性的分析方法,建立了多反射镜的误差传递模型,获得了 30 °C 温度下该系统的多光轴一致性偏差,并进行了实验验证。

2 工作原理

如图 1 所示,本激光通信系统包含自适应光学分系统、章动分系统、通信分系统、精跟踪分系统、光学天线与信标发射分系统,在实现通信链路稳定链接的同时实现抗湍流扰动功能。其中,精跟踪以及自适应光学分系统采用 800 nm 波段的激光作为信标光,通信分系统采用 1550 nm 波段作为通信接收光,1530 nm 波段作为通信发射光。采用 800 nm/1500 nm 光谱分光镜将通信光路与信标光路隔离,反射 830 nm 的信标光,透射 1550 nm 的通信接收光与 1530 nm 的通信发射光;1550 nm/1530 nm 光谱分光镜将通信发射光路与通信接收光路隔离,反射 1550 nm 的通信接收光,透射 1530 nm 的通信发射光;830 nm 能量分光镜可实现能量分光,将信标光一分为二,分别输入精跟踪探测镜头与哈特曼波前探测镜头中。

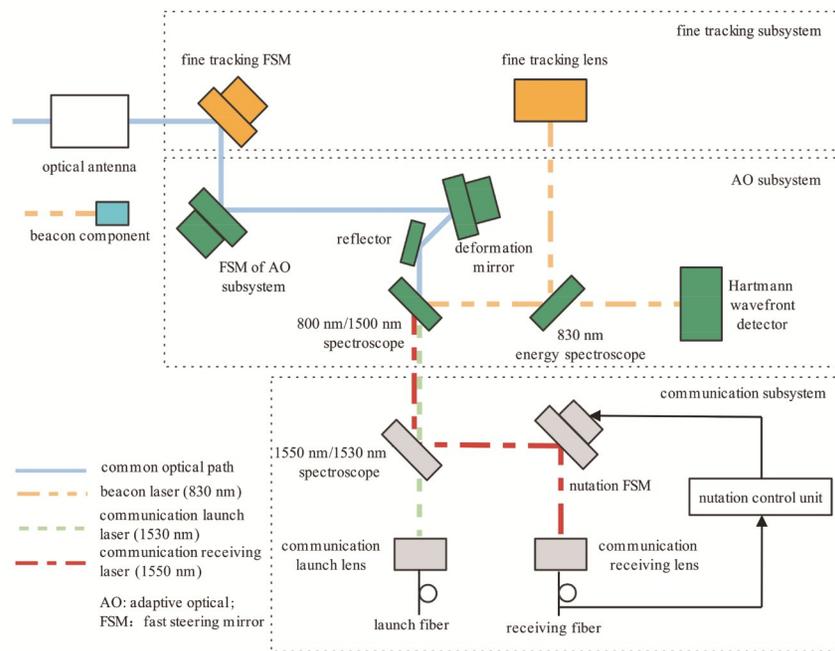


图 1 系统工作原理

Fig. 1 Working principle of system

系统工作时,需先进行初步指向,使信标光进入精跟踪视场中,精跟踪系统根据光斑位置控制精跟踪振镜偏转,将光斑跟踪在视场中心,建立稳定光链路;哈特曼波前探测器探测信标光的波前差信息,自适应分系统根据波前差信息控制自适应振镜与变形镜,对其中的一阶、高阶像差进行补偿;章动控制单元以通信接收能量为反馈信号,控制章动振镜将通信光耦合进单模光纤中,完成通信。

为减小系统体积,将系统光路进行双层布置:下层布置共光路部分,以减小装校难度;上层布置多光路分

支部分,以便于调试与安装。为提高系统整体的结构强度,将上层光路的安装板与侧支撑结构进行一体化设计,设计结果如图 2 所示。

3 多光轴一致性分析

3.1 有限元模型与多光轴坐标系的建立

在有限元分析软件 ANSYS 中建立系统的有限元模型,为准确分析多个元件的误差传递情况,基于光束传播方向,为每个光学元件建立独立坐标系。坐标系规定: z 轴垂直于反射镜面方向,指向镜面外方向为

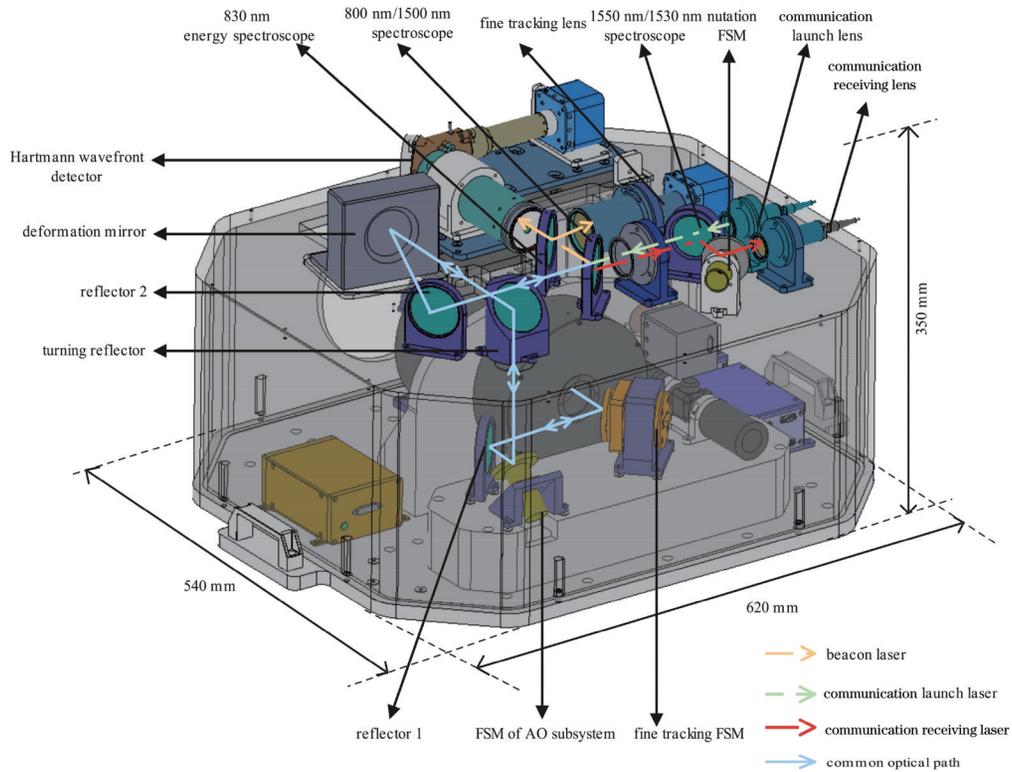


图 2 双层结构设计方案

Fig. 2 Design of double layer structure

正; x 轴平行于镜面,向下为正, y 轴方向通过右手定则 确定。建立的坐标系如图 3 所示。

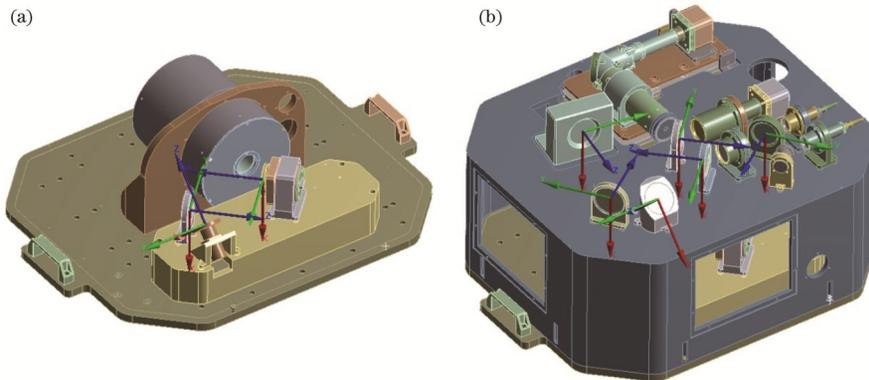


图 3 局部坐标系。(a)第一层局部坐标系;(b)第二层局部坐标系

Fig. 3 Local coordinate systems. (a) Local coordinate system of first layer; (b) local coordinate system of second layer

为降低有限元分析的难度,对模型进行简化处理,在分析单个镜片时隐藏其他镜片,镜片采用六面体网格划分,不规则结构体采用四面体网格。为保证分析精度,通过约束网格的大小,使各部分结构至少存在三层网格单元。以反射镜 2 为例,最终的有限元模型如图 4 所示。该有限元模型的节点数为 556064,单元数为 322315。

3.2 镜片变形分析

由于该激光通信系统拟搭载于飞艇平台,飞艇内部含有热控系统,可将工作环境温度控制在 $(20 \pm 10)^\circ\text{C}$ 的范围内,因此针对 30°C [由于工作温度为 $(20 \pm 10)^\circ\text{C}$, 10°C 与 30°C 关于 20°C 的基准温度对称,变形幅值相同,不再阐述]工作环境温度下的耦合重力

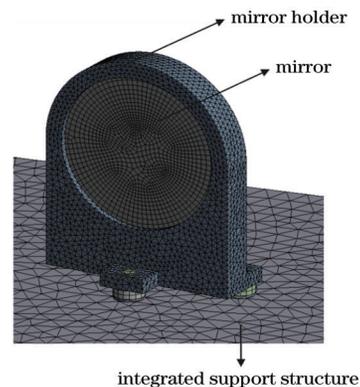


图 4 反射镜 2 的有限元模型

Fig. 4 Finite element model of reflector 2

作用,对系统进行有限元分析,底板安装孔位作为固定约束,输出对象为单个光学元件表面,各镜片的变形云图如图 5 所示。

只有旋转角度 θ_x 、 θ_y 会导致光轴偏差,需要将其分离出来。该过程可通过齐次坐标变换方法实现^[15-16]。根据齐次坐标变换矩阵:

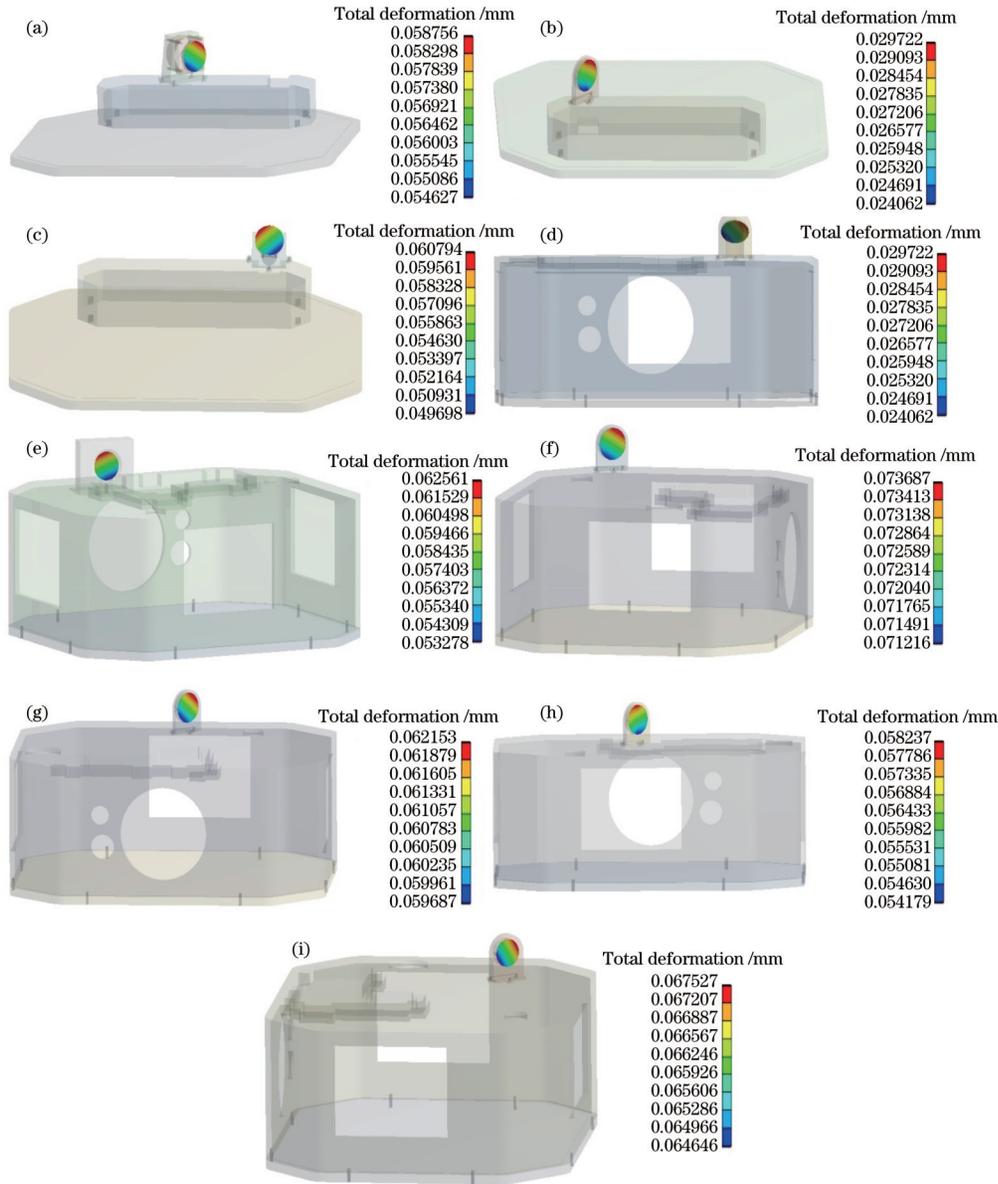


图 5 镜片温度分析结果。(a)精跟踪振镜;(b)反射镜 1;(c)自适应系统振镜;(d)折转反射镜;(e)变形镜;(f)反射镜 2;(g) 800 nm/1500 nm 分光镜;(h) 830 nm 能量分光镜;(i) 1550 nm/1530 nm 分光镜

Fig. 5 Results of temperature analysis of mirrors. (a) FSM of fine tracking system; (b) reflector 1; (c) FSM of AO system; (d) turning reflector; (e) deformation mirror; (f) reflector 2; (g) 800 nm/1500 nm spectroscopy; (h) 830 nm energy spectroscopy; (i) 1550 nm/1530 nm spectroscopy

每片反射镜的最大变形量如表 1 所示,可以发现每片反射镜的最大变形量远大于其面形误差要求,其原因是该变形量包含了温度引起的镜面变形与镜面整体的三维平移、三维角度变化,即刚体位移。因此,需要进一步对 ANSYS 计算的变形节点数据进行处理,将整体变形量中的刚体位移数据分离出来,并提取其中影响光轴方向的角度变量。

3.3 刚体位移数据的分离

镜片的刚体位移为六维运动,即平移动移 D_x 、 D_y 、 D_z ,以及旋转角度 θ_x 、 θ_y 、 θ_z ,由于 Z 方向为镜片法向,

$$T = \begin{bmatrix} 1 & -\theta_z & \theta_y & D_x \\ \theta_z & 1 & -\theta_x & D_y \\ -\theta_y & \theta_x & 1 & D_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

利用镜片变形前后的节点坐标 (x_j, y_j, z_j) 、 (x'_j, y'_j, z'_j) 与各方向变形 d_{x_j} 、 d_{y_j} 、 d_{z_j} ,可以建立以下的方程:

$$\begin{bmatrix} x'_j \\ y'_j \\ z'_j \\ 1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{x_j} \\ d_{y_j} \\ d_{z_j} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

表 1 镜片变形最大值

Table 1 Maximum value of mirror deformation
unit: mm

Mirror	Maximum value
FSM of fine tracking subsystem	0.059
Reflector 1	0.029
FSM of AO subsystem	0.061
Turning reflector	0.071
Deformation mirror	0.063
Reflector 2	0.074
800 nm/1500 nm spectroscop	0.062
830 nm energy spectroscop	0.058
1550 nm/1530 nm spectroscop	0.068

式中: j 为节点序号。

$$L = \sum_j \left[(x'_j - x_j + \theta_z y_j - \theta_y z_j - d_{xj})^2 + (y'_j - y_j - \theta_z x_j + \theta_x z_j - d_{yj})^2 + (z'_j - z_j + \theta_y x_j - \theta_x y_j - d_{zj})^2 \right] \quad (3)$$

利用最小二乘法对以上方程进行求解,建立函数:

对 L 中的每一项刚体位移求偏导,且令其为 0,即

$$\frac{\partial L}{\partial d_x} = \frac{\partial L}{\partial d_y} = \frac{\partial L}{\partial d_z} = \frac{\partial L}{\partial \theta_x} = \frac{\partial L}{\partial \theta_y} = \frac{\partial L}{\partial \theta_z} = 0. \quad (4)$$

联立式(1)~(4),并将仿真结果导出的节点坐标代入其中,即可得出 θ_x 、 θ_y 的大小,如表 2 所示。表 2 中的偏转角度为每片反射镜的单维偏转角度,如图 2 所示,光束从光学天线到接收镜头需要经过多次折转,且变形镜与反射镜 2 的布置角度为 20° 与 70° ,因此不能将表 2 中数据直接累加,需要通过建立多反射镜误差传递模型来计算光轴的总偏转角。

表 2 各镜面偏转角度

Table 2 Deflection angle of each mirror surface
unit: μrad

Mirror	θ_{Xi}	θ_{Yi}
FSM of fine tracking system (θ_{x1}/θ_{y1})	-32.36	26.19
Reflector 1 (θ_{x2}/θ_{y2})	1.39	-30.82
FSM of AO system (θ_{x3}/θ_{y3})	-186.49	22.29
Turning reflector (θ_{x4}/θ_{y4})	-1.25	-8.12
Deformation mirror (θ_{x5}/θ_{y5})	-1.58	-17.35
Reflector 2 (θ_{x6}/θ_{y6})	-1.97	26.93
800 nm/1500 nm spectroscop (θ_{x7}/θ_{y7})	-1.28	-52.43
830 nm energy spectroscop (θ_{x8}/θ_{y8})	-65.64	7.07
1550 nm/1530 nm spectroscop (θ_{x9}/θ_{y9})	-2.75	-18.97

3.4 多反射镜误差传递模型

在计算由温度引起的镜片刚体位移对光轴的影响时,可以将其等效为反射镜安装误差进行处理,借鉴矩阵光学中棱镜安装误差传递矩阵的理论^[14],建立新的

矩阵计算坐标系,如图 6 所示,规定以反射后的光束方向为基准, a 轴与反射光束的方向相同, c 轴垂直于光轴平面向上, b 轴方向根据右手坐标系确定。

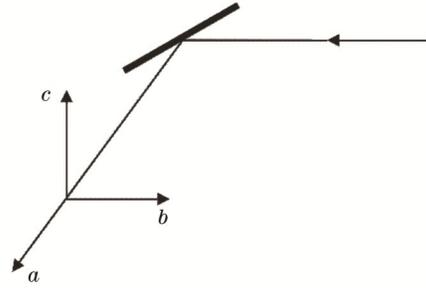


图 6 矩阵计算坐标系

Fig. 6 Coordinate system of matrix calculation

光轴转角 θ' 与棱镜安装误差转角 θ 之间的关系^[17]为

$$\theta' = G \cdot P \cdot \theta \quad (5)$$

式中: P 为安装误差转角的转轴方向向量; G 为误差传递矩阵,其具体组成为

$$G = \begin{bmatrix} 1 - (-1)^t \cos \lambda & (-1)^t \sin \lambda & 0 \\ (-1)^{t+1} \cos \psi \sin \lambda & 1 - \cos \lambda & -\sin \psi \\ (-1)^t \sin \psi \sin \lambda & 0 & 1 - (-1)^t \cos \psi \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: t 为反射次数; λ 为入射光轴与出射光轴的夹角; ψ 为镜片的空间角。

基于本系统中的反射镜误差角度传递特点,令式(6)中 $t=1$ 、 $\psi=0$,可得单片反射镜的误差传递矩阵为

$$G_i = \begin{bmatrix} 1 + \cos \lambda_i & -\sin \lambda_i & 0 \\ \sin \lambda_i & 1 - \cos \lambda_i & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

在计算单片反射镜的光轴偏差时,无需考虑反射镜的镜像原理,但当计算系统光路的整体偏转角时,需要考虑反射次数带来的镜像原理,即:反射次数为偶数时,所成像为相似像;当反射次数为奇数时,所成像为镜像。以式(5)为基础,建立反射光路的误差传递模型:

$$\theta'_{Xi} = (-1)^{i+k} G_i \cdot P_{Xi} \cdot \theta_{Xi}, \quad (8)$$

$$\theta'_{Yi} = (-1)^{k+1} G_i \cdot P_{Yi} \cdot \theta_{Yi}, \quad (9)$$

式中: θ'_{Xi} 、 θ'_{Yi} 为光轴的方位、俯仰偏转角; P_{Xi} 、 P_{Yi} 为对应转角的转轴在矩阵计算坐标系下的方向向量,如表 3 所示; k 为空间等效屋脊棱镜的数量。如图 7 所示,本系统中自适应振镜与折转反射镜两者的光路结构类似于棱镜中的屋脊面,由于屋脊面不改变成像方向,因此需要额外考虑屋脊面带来的影响。根据图 2:在计算下层镜片时, $k=1$;在计算上层镜片时, $k=0$ 。

将表 2 与表 3 中的数据代入式(7)~(9),即可计算出各镜片造成的光轴偏转角 θ'_X/θ'_Y ,其结果如表 4 所示。

精跟踪支路光轴的方位、俯仰偏转角度可分别表示为

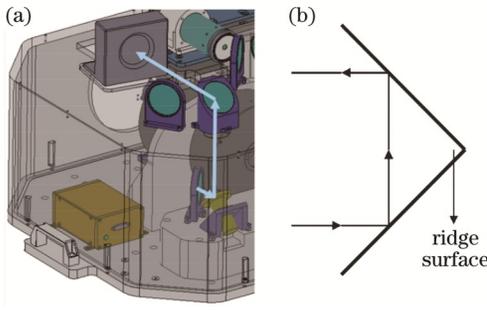


图 7 屋脊面说明。(a)本系统局部光路结构;(b)屋脊面简图
Fig. 7 Description of ridge surface. (a) Local optical path of system; (b) sketch of ridge surface

$$\theta_{1,X} = \sum_{i=1}^8 \theta'_{Xi} = -462.55 \mu\text{rad},$$

$$\theta_{1,Y} = \sum_{i=1}^8 \theta'_{Yi} = 116.59 \mu\text{rad}. \quad (10)$$

自适应光学支路光轴的方位、俯仰偏转角度可分别表示为

$$\theta_{z,x} = \sum_{i=1}^7 \theta'_{Xi} = -336.25 \mu\text{rad},$$

$$\theta_{z,y} = \sum_{i=1}^7 \theta'_{Yi} = 126.63 \mu\text{rad}. \quad (11)$$

通信接收支路光轴的方位、俯仰偏转角度可分别表示为

$$\theta_{s,x} = \theta'_{X9} + \sum_{i=1}^6 \theta'_{Xi} = -339.33 \mu\text{rad},$$

$$\theta_{s,y} = \theta'_{Y9} + \sum_{i=1}^6 \theta'_{Yi} = 79.36 \mu\text{rad}. \quad (12)$$

通信发射支路光轴的方位、俯仰偏转角度可分别表示为

$$\theta_{f,x} = \sum_{i=1}^6 \theta'_{Xi} = -333.83 \mu\text{rad},$$

$$\theta_{f,y} = \sum_{i=1}^6 \theta'_{Yi} = 49.54 \mu\text{rad}. \quad (13)$$

根据以上结果,精跟踪振镜、自适应振镜与 830 nm 能量分光镜引入较大的方位偏转,但精跟踪振镜、自适应振镜位于共光路中,不影响系统支路间的光轴一致性,而 830 nm 能量分光镜主要影响精跟踪支路与自适应支路间、精跟踪支路与通信支路间的光轴一致性。

表 3 各 λ_{i0} 、 P_{Xi} 与 P_{Yi} 的值
Table 3 Values of λ_{i0} , P_{Xi} , and P_{Yi}

Mirror	$\lambda_{i0} / (^\circ)$	P_{Xi}	P_{Yi}
FSM of fine tracking system ($i = 1$)	-90	(0, 0, 1)	(0.707, 0.707, 0)
Reflector 1 ($i = 2$)	90	(0, 0, 1)	(-0.707, 0.707, 0)
FSM of AO system ($i = 3$)	-90	(0.707, 0.707, 0)	(0, 0, 1)
Turning reflector ($i = 4$)	-90	(0.707, 0.707, 0)	(0, 0, 1)
Deformation mirror ($i = 5$)	160	(0, 0, 1)	(0.174, -0.985, 0)
Reflector 2 ($i = 6$)	110	(0, 0, 1)	(0.574, -0.819, 0)
800 nm/1500 nm spectroscopy ($i = 7$)	90	(0, 0, 1)	(0.707, -0.707, 0)
830 nm energy spectroscopy ($i = 8$)	-90	(0, 0, 1)	(0.707, 0.707, 0)
1550 nm/1530 nm spectroscopy ($i = 9$)	-90	(0, 0, 1)	(-0.707, -0.707, 0)

表 4 各反射光轴的偏转角
Table 4 Deflection angle of each reflected optical axis

Mirror	θ'_{Xi}	θ'_{Yi}
FSM of fine tracking system ($\theta'_{X1}/\theta'_{Y1}$)	-64.72	37.05
Reflector 1 ($\theta'_{X2}/\theta'_{Y2}$)	-2.78	-43.55
FSM of AO system ($\theta'_{X3}/\theta'_{Y3}$)	-263.71	44.58
Turning reflector ($\theta'_{X4}/\theta'_{Y4}$)	-1.84	16.24
Deformation mirror ($\theta'_{X5}/\theta'_{Y5}$)	3.16	32.59
Reflector 2 ($\theta'_{X6}/\theta'_{Y6}$)	-3.94	-34.37
800 nm/1500 nm spectroscopy ($\theta'_{X7}/\theta'_{Y7}$)	2.56	74.09
830 nm energy spectroscopy ($\theta'_{X8}/\theta'_{Y8}$)	-131.28	-10.04
1550 nm/1530 nm spectroscopy ($\theta'_{X9}/\theta'_{Y9}$)	-5.50	26.82

3.5 光轴一致性偏差分析

如图 1 与图 2 所示,精跟踪支路与通信支路的光轴一致性偏差 Δ_{JT} 由 800 nm/1500 nm 分光镜、830 nm 能量分光镜引起,故有

$$\Delta_{JT} = \sqrt{(\theta'_{X7} + \theta'_{X8})^2 + (\theta'_{Y7} + \theta'_{Y8})^2} = 143.77 \mu\text{rad}. \quad (14)$$

发射光与接收光的光轴一致性偏差 Δ_{SF} 由 1550 nm/1530 nm 分光镜引起,故有

$$\Delta_{SF} = \sqrt{(\theta'_{X9})^2 + (\theta'_{Y9})^2} = 27.38 \mu\text{rad}. \quad (15)$$

自适应系统支路与精跟踪支路的光轴一致性偏差 Δ_{JZ} 由 830 nm 能量分光镜引起,故有

$$\Delta_{JZ} = \sqrt{(\theta'_{X8})^2 + (\theta'_{Y8})^2} = 131.66 \mu\text{rad}. \quad (16)$$

根据以上仿真计算结果,环境温度为 30 °C 时,各支路光轴偏转较大,但主要出现在共光路部分,支路间

的光轴一致性并未受到较大影响,能够满足系统的指标要求。

4 实验验证

4.1 温度拉偏实验

为了验证仿真结果,在实验室中进行温度拉偏实验,光路搭建如图 8 所示,以平行光管作为光源,模拟无穷远目标,利用方位俯仰调整台调整系统角度,引导信标光进入精跟踪分系统视场。开启精跟踪,使用空调控制实验室温度,环境温度稳定后,记录温度与精跟踪光斑的坐标 (X, Y) ,每个温度下采集三次坐标数据,取三次数据的平均值作为该温度下的坐标,具体结果如表 5 所示。

以 20 °C 时光斑的坐标为基准,计算每个温度下光斑方位偏移量 M_x 与俯仰偏移量 M_y ,计算所得偏移量如表 6 所示。

计算出精跟踪支路光轴的实际方位偏转角 $\theta'_{i,x}$ 与俯仰偏转角 $\theta'_{i,y}$:

$$\theta'_{i,x} = \frac{\sigma \cdot M_x}{f}, \theta'_{i,y} = \frac{\sigma \cdot M_y}{f}, \quad (17)$$

式中: σ 为精跟踪相机的像元尺寸, $\sigma = 6.5 \mu\text{m}$; f 为精跟踪支路的焦距, $f = 1.3 \text{ m}$ 。

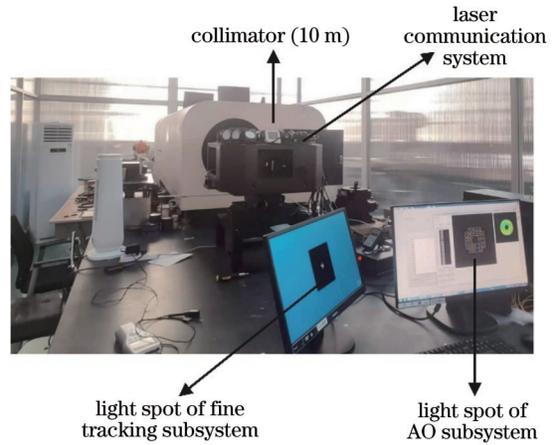


图 8 温度拉偏实验环境

Fig. 8 Thermal drift experimental situation

30 °C (与仿真条件一致) 条件下的实际光轴偏转角度为

$$\theta'_{i,x} = -423.30 \mu\text{rad}, \theta'_{i,y} = 103.30 \mu\text{rad}. \quad (18)$$

实验与仿真的结果对比如表 7 所示,精跟踪支路的实际偏转角度与仿真结果基本相符,仿真误差优于 13%。

表 5 温度与坐标记录

Table 5 Record of temperature and coordinate

Temperature /°C	Coordinate 1	Coordinate 2	Coordinate 3	Average of coordinates 1-3
20	(432, -261)	(426, -265)	(421, -264)	(426.33, -263.33)
24	(390, -239)	(387, -255)	(387, -245)	(388.00, -246.33)
28	(369, -239)	(364, -250)	(366, -248)	(366.33, -245.67)
30	(345, -240)	(341, -243)	(339, -245)	(341.67, -242.67)

表 6 光斑偏移量

Table 6 Offset of light spot

Temperature /°C	M_x	M_y
20	0	0
24	-38.33	17.00
28	-60.00	17.66
30	-84.66	20.66

4.2 通信实验

为进一步测试系统的整机性能,选取 1 km 直线距离的两处建筑进行通信实验。实验现场搭建如图 9 所

示,实验环境温度约为 28 °C。

开启双端信标光后调整两端姿态,使信标光进入精跟踪视场,开启精跟踪,令双端光轴对准。随后开启双端的自适应分系统进行波前的校正,最后开启双端通信光与章动功能,实现稳定的激光通信。实验中通信接收能量、精跟踪状态及自适应分系统校正效果如图 10 所示。

实验过程中,各系统工作正常,通信接收功率、精跟踪状态,以及自适应分系统波前校正情况均满足系统指标要求。

表 7 实验结果与仿真分析结果对比

Table 7 Comparison of experiment results and simulation results

Direction	Simulation deflection angle / μrad	Experimental deflection angle / μrad	Error /%
X	-462.55	-423.30	9.27
Y	116.59	103.30	12.87

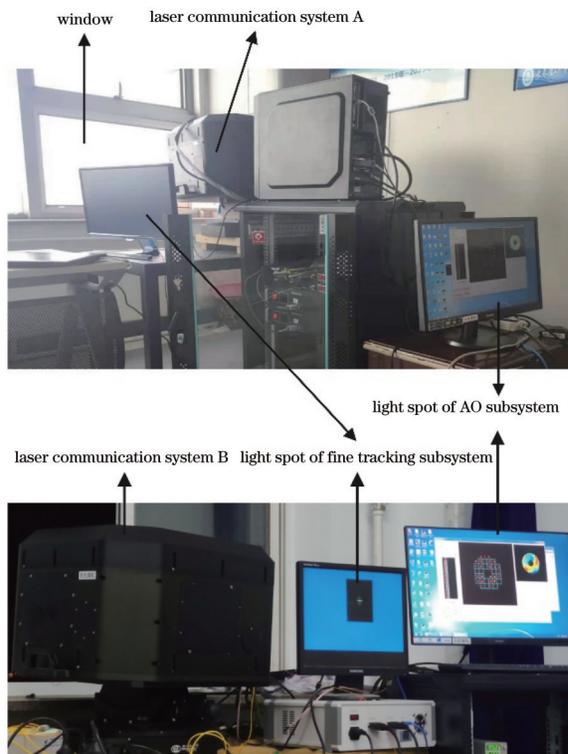


图 9 外场实验环境

Fig. 9 External experiment condition

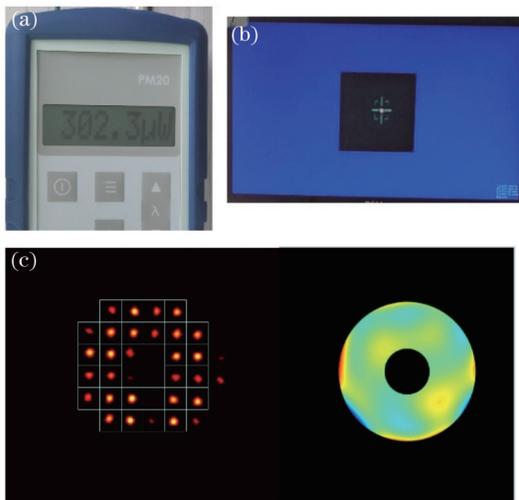


图 10 外场实验结果。(a)通信接收能量;(b)精跟踪分系统光斑;(c)自适应分系统校正结果

Fig. 10 Results of external experiment. (a) Energy of communication receiving; (b) light spot of fine tracking system; (c) light spot of AO system

5 结 论

相比于其他光学系统,激光通信系统需要在两终端或多终端间长时间构建稳定的通信链路,系统内部的多光轴一致性是构建链路、实现稳定通信的重要保障。为此,设计了一体化双层光路结构,并以光机热集成分析为基础,提出了针对复杂光学系统光轴一致性的分析方法,建立了多反射镜误差传递模型,对系统的

光轴一致性进行了分析。结果表明:在 $10\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境温度范围内,精跟踪支路与通信支路间光轴一致性偏差优于 $143.77\text{ }\mu\text{rad}$,通信发射支路与通信接收支路间光轴一致性偏差优于 $27.38\text{ }\mu\text{rad}$,精跟踪支路与自适应光学支路间光轴一致性偏差优于 $131.66\text{ }\mu\text{rad}$ 。

为了验证仿真结果,对系统进行温度拉偏实验。实验结果表明环境温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,实际偏转角与仿真偏转角的误差优于 $39.25\text{ }\mu\text{rad}$ 。最后进行了 1 km 楼宇间通信实验(环境温度为 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$),系统各功能正常,所有指标满足系统要求。

参 考 文 献

- [1] 姜会林,付强,赵义武,等.空间信息网络与激光通信发展现状及趋势[J].物联网学报,2019,3(2):1-8.
Jiang H L, Fu Q, Zhao Y W, et al. Development status and trend of space information network and laser communication[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2019, 3(2): 1-8.
- [2] 王天枢,林鹏,董芳,等.空间激光通信技术发展现状及展望[J].中国工程科学,2020,22(3):92-99.
Wang T S, Lin P, Dong F, et al. Progress and prospect of space laser communication technology[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 92-99.
- [3] 姜会林,安岩,张雅琳,等.空间激光通信现状、发展趋势及关键技术分析[J].飞行器测控学报,2015,34(3):207-217.
Jiang H L, An Y, Zhang Y L, et al. Analysis of the status quo, development trend and key technologies of space laser communication[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2015, 34(3): 207-217.
- [4] 王玉坤.空间激光通信自适应光学系统的控制研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2019:20-28.
Wang Y K. Research on the control of adaptive optical system for space laser communication[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019: 20-28.
- [5] 张艳艳,孙原良,龚信,等.强光背景下基于超完备字典的自适应光学天体目标的检测方法[J].光学学报,2017,37(1):0101006.
Zhang Y Y, Sun Y L, Gong X, et al. Detection of adaptive optics celestial targets under strong skylight background based on over-complete dictionary[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0101006.
- [6] 高建秋,孙建锋,李佳蔚,等.基于激光章动的空间光到单模光纤的耦合方法[J].中国激光,2016,43(8):0801001.
Gao J Q, Sun J F, Li J W, et al. Coupling method for making space light into single-mode fiber based on laser nutation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0801001.
- [7] 何爽,张鹏,魏佳,等.面向大气激光通信的空间光到少模光纤耦合特性研究[J].中国激光,2021,48(23):2306001.
He S, Zhang P, Wei J, et al. Analyses of coupling characteristics of space light to few-mode fiber for

- atmospheric laser communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(23): 2306001.
- [8] 徐丹慧, 唐霞辉, 方国明, 等. 基于干涉条纹的光轴平行性校准方法[J]. 光学学报, 2020, 40(17): 1712005.
Xu D H, Tang X H, Fang G M, et al. Method for calibration of optical axis parallelism based on interference fringes[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(17): 1712005.
- [9] 张娟, 杨加强, 彭晴晴, 等. 别汉棱镜角度误差对光轴一致性影响的研究[J]. 激光与红外, 2021, 51(8): 1031-1037.
Zhang J, Yang J Q, Peng Q Q, et al. Research on the influence of the angle error of Pechan prism on optical axis consistency[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(8): 1031-1037.
- [10] 李小明, 王隆铭, 李响, 等. 激光通信天线一体化的摆镜面形优化[J]. 中国激光, 2021, 48(1): 0106006.
Li X M, Wang L M, Li X, et al. Optimization of integrated tilt-mirror for laser communication antenna[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0106006.
- [11] 潘越, 徐熙平, 乔杨. 变焦红外双波段投影镜头的光机热分析[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0522001.
Pan Y, Xu X P, Qiao Y. Optical-structural-thermal analysis of zoom infrared dual-band projection lens[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0522001.
- [12] 肖阳, 徐文东, 赵成强. 光机系统的一体化仿真分析[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0722002.
Xiao Y, Xu W D, Zhao C Q. Integrated simulation of opto-mechanical system[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0722002.
- [13] 史建亮, 任戈. 光机系统集成分析仿真研究[J]. 光学学报, 2009, 29(10): 2866-2870.
Shi J L, Ren G. Integrated analysis and simulation of opto-mechanical system[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(10): 2866-2870.
- [14] 贾勇, 高云国, 邵帅. 热载荷下激光扩束系统的光机优化设计[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0116003.
Jia Y, Gao Y G, Shao S. Opto-mechanical optimization for laser expander system under thermal loads[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(1): 0116003.
- [15] 李路. 星载高重频激光雷达光机结构设计及其稳定性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021: 25-28.
Li L. Design and stability study of optical and mechanical structure of space-borne lidar with high-repetition frequency[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021: 25-28.
- [16] 张颖, 丁振敏, 赵慧洁, 等. 光机热集成分析中镜面刚体位移分离[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2763-2767.
Zhang Y, Ding Z M, Zhao H J, et al. Rigid-body displacement separation of optics in optical-structural-thermal integrated analysis[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(10): 2763-2767.
- [17] 阎吉祥, 魏光辉, 哈流柱, 等. 矩阵光学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995: 245-295.
Yan J X, Wei G H, Ha L Z, et al. Matrix optics[M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 1995: 245-295.