

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

Risley光栅跟瞄系统指向误差分析

董云冲, 李小明, 陈希来, 杨盛, 付越

引用本文:

董云冲, 李小明, 陈希来, 等. Risley光栅跟瞄系统指向误差分析[J]. 光电工程, 2025, 52(3): 240241.

Dong Y C, Li X M, Chen X L, et al. Analysis of pointing error of Risley grating tracking system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(3): 240241.

<https://doi.org/10.12086/oe.2025.240241>

收稿日期: 2024-10-15; 修改日期: 2025-01-09; 录用日期: 2025-01-09

相关论文

惯性稳定万向架中基于SBG惯导的捷联控制技术

王玉, 边启慧, 廖军, 徐田荣, 唐涛

光电工程 2023, 50(5): 220238 doi: [10.12086/oe.2023.220238](https://doi.org/10.12086/oe.2023.220238)

改进YOLOv8的焊缝表面缺陷检测算法

张润梅, 潘晨飞, 陈梓华, 陈中, 袁彬

光电工程 2025, 52(3): 240296 doi: [10.12086/oe.2025.240296](https://doi.org/10.12086/oe.2025.240296)

快反镜系统滑模复合分层干扰观测补偿控制

罗勇, 刘凯凯, 杨帆, 闻心怡, 黄永梅, 郭珊珊, 任戈, 李涛

光电工程 2023, 50(4): 220330 doi: [10.12086/oe.2023.220330](https://doi.org/10.12086/oe.2023.220330)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.oeejournal.org/oe>



 OE_Journal



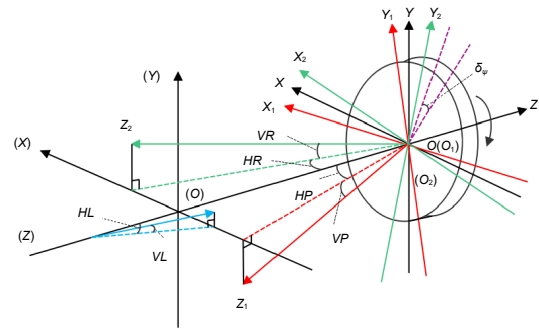
Website

Risley 光栅跟瞄系统 指向误差分析

董云冲¹, 李小明^{1,2*}, 陈希来¹,
杨 盛¹, 付 越¹

¹ 长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022;

² 长春理工大学空间光电技术国家地方联合工程研究中心,
吉林 长春 130022



摘要: Risley 光栅跟瞄系统主要由两片旋转的偏振光栅组成, 光源经过偏振光栅衍射后实现在圆锥形范围内的光束指向, 进而对目标进行捕获、跟踪。而指向精度作为 Risley 光栅跟瞄系统的重要指标, 不仅受伺服与光学系统影响, 还受 Risley 光栅跟瞄系统中双光栅转台的天线安装位置精度以及轴系装配误差等系统误差影响。为此, 本文主要对 Risley 光栅跟瞄系统中的各系统误差源及其造成的指向误差进行分析, 首先建立系统误差数理模型并利用 ZEMAX 对数理模型进行验证, 随后利用 MATLAB 分析各系统误差源对 Risley 光栅跟瞄系统指向误差的影响, 最后根据分析结果及指标要求对某双光栅跟瞄系统误差源进行误差分配, 指导双光栅转台的设计、装调。对双光栅转台指向误差进行实验测试, 经多次实验测试后得到双光栅转台实际最大指向误差 $\delta_e=7.2''$, 满足双光栅转台指向误差设计指标 $10''$ 。

关键词: Risley 光栅; 跟瞄系统; 指向误差; 误差分配

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

董云冲, 李小明, 陈希来, 等. Risley 光栅跟瞄系统指向误差分析 [J]. 光电工程, 2025, 52(3): 240241

Dong Y C, Li X M, Chen X L, et al. Analysis of pointing error of Risley grating tracking system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(3): 240241

Analysis of pointing error of Risley grating tracking system

Dong Yunchong¹, Li Xiaoming^{1,2*}, Chen Xilai¹, Yang Sheng¹, Fu Yue¹

¹ School of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

² National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract: The Risley grating tracking system is mainly composed of two rotating polarization gratings. The light source is diffracted by the polarization grating to achieve beam pointing in the conical range, and then the target is captured and tracked. As an important index of the Risley grating tracking system, pointing accuracy is not only affected by servo and optical systems but also by system errors such as antenna installation accuracy and shafting assembly error of double grating turntable in the Risley grating tracking system. Therefore, this paper mainly analyzes the systematic error sources in the Risley grating tracking system and the pointing errors caused by them.

收稿日期: 2024-10-15; 修回日期: 2025-01-09; 录用日期: 2025-01-09

*通信作者: 李小明, lxmkidd@163.com。

版权所有©2025 中国科学院光电技术研究所

First, a mathematical model of systematic error is established and verified by ZEMAX. Then, MATLAB is used to analyze the influence of each systematic error source on the pointing error of the Risley grating tracking system. Finally, according to the analysis results and index requirements, the error source of a double grating tracking system is assigned to guide the design and installation of the double grating turntable. The actual maximum pointing error of the double grating turntable $\delta_e=7.2''$ is obtained after several experimental tests, which satisfies the design index of pointing error of the double grating turntable $10''$.

Keywords: Risley grating; tracking system; pointing error; error distribution

1 引言

随着空间激光通信、光电跟瞄等激光应用技术的不断发展,人们对跟瞄系统的要求逐渐提高^[1-2]。旋转双光栅/棱镜跟瞄机构具有体积小、重量轻、运动部件少的特点,虽然其工作范围有限,但在很多特定场景下具有较大的优势,为此国内外对基于旋转双光栅/棱镜的同轴式光电跟瞄机构开展了大量的研究工作。其中,美国 OPTRA 公司针对不同应用场景研究了相应的旋转双棱镜指向机构^[3];NASA 公司将旋转双棱镜应用在卫星测距系统发射器指向机构,实现了激光束的精密指向^[4];中国科学院上海光学精密机械研究所将旋转双棱镜应用到了空间激光通信的指向装置中,在 $\pm 30^\circ$ 范围内实现了 $30 \mu\text{rad}$ 的跟踪精度^[5],中国科学院长春光学精密机械与物理研究所对旋转双棱镜系统模型分别进行了正、反向求解并对指向误差进行了分析^[6]。旋转双光栅跟瞄系统与旋转双棱镜跟瞄系统工作原理和功能类似,其采用光栅代替了棱镜,具有工作角度大、厚度小、不存在偏心问题的优点。因此,基于 Risley 光栅的跟瞄系统具有更大的优势,也是刚刚起步的新型系统,对其的相关研究报道较少,其中长春理工大学对基于 Risley 光栅跟瞄系统的目标跟踪进行了公式建立与验证^[7],但尚未见系统精度相关研

究的报道。

对于 Risley 光栅跟瞄系统,理想出射光线与实际出射光线的偏差为系统的指向误差,它直接影响系统开环指向精度和闭环解算精度。在实际工况中,跟瞄系统精度不仅由伺服系统控制保证,机械转台结构误差也会对指向精度产生影响,为此需要分析系统误差对双光栅跟瞄系统指向精度的影响与规律并依此进行误差分配,指导双光栅转台设计、加工与装调检测。为了对 Risley 光栅跟瞄系统的指向、跟踪提供理论数据,为系统中机械转台参数设计提供理论支撑,分析系统中的各种误差对指向精度的影响具有一定工程意义。因此本文建立了 Risley 光栅跟瞄系统的误差模型,分析各种误差对系统的指向精度影响,并根据分析结果对双光栅转台机构进行误差分配。

2 Risley 光栅跟瞄系统原理

2.1 Risley 光栅跟瞄系统结构原理

Risley 光栅跟瞄系统的结构原理如图 1 所示,系统由两个独立的偏振光栅组成,通过光栅旋转来实现连续的光束指向。设计时偏振光栅安装在转台轴系上,由轴系带动光栅旋转。旋转角度由轴系编码器进行测量。设光栅的法线方向为 Z 轴方向, θ 表示出射光束

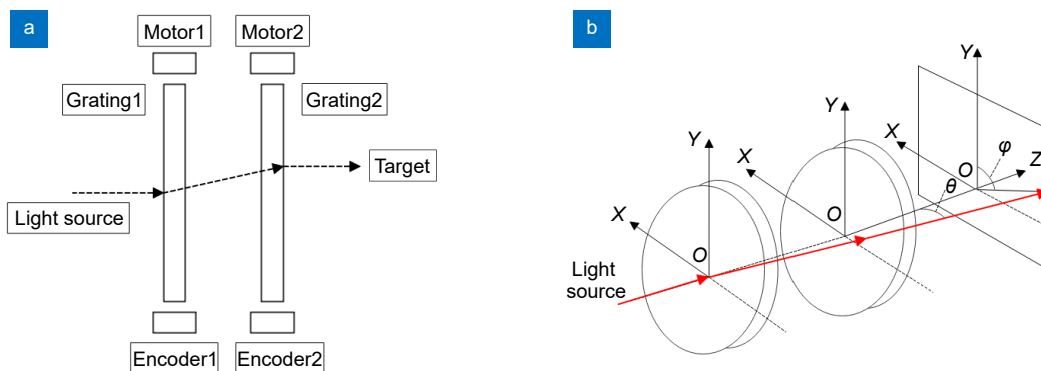


图 1 Risley 光栅跟瞄系统结构原理图。(a) 结构原理; (b) 衍射角度

Fig. 1 Schematic diagram of the Risley grating tracking system. (a) Structure principle; (b) Diffraction angle

衍射角, 定义为出射光束与 Z 轴的夹角, φ 表示出射光束方位角, 定义为出射光束在 XOY 面上的投影与 Y 轴正方向的夹角。通过旋转两片光栅, 可实现沿 Z 轴入射的光经过光栅衍射后, 在 XOY 平面一个有限角度范围内的任意指向。

2.2 光栅衍射角度解算

单个光栅在正常入射时的衍射角只由光栅周期、衍射级次和光线波长决定, 它遵循光栅方程。

$$d \sin \phi = m \lambda, \quad (1)$$

式中: d 为光栅周期; ϕ 为光栅衍射角; m 为光栅的衍射级次; λ 为入射光波长。对于具有不同相对角度的多个旋转光栅, 其衍射是非常复杂的。因为角度关系是非线性的, 将衍射光线引入方向余弦空间中计算更为方便, 其中衍射可以表示为一个简单的线性矢量。当入射光线与光栅法线矢量共面时, 出射光束矢量的方向余弦^[8]由式(2)得到。

$$\begin{cases} K = m \frac{\lambda}{d} \sin \psi \\ L = m \frac{\lambda}{d} \cos \psi \\ M = \sqrt{1 - K^2 - L^2} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: K 、 L 、 M 分别为在空间余弦中光束与 X 、 Y 、 Z 轴的方向余弦; ψ 为光栅矢量的方位角, 即光栅的旋转角。当入射光线与光栅法线矢量不共面时, 出射光束的方向余弦^[9-10]由式(3)得到:

$$\begin{cases} K = m \frac{\lambda}{d} \sin \psi + \sin \theta_{in} \sin \varphi_{in} \\ L = m \frac{\lambda}{d} \cos \psi + \sin \theta_{in} \cos \varphi_{in} \\ M = \sqrt{1 - K^2 - L^2} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: θ_{in} 为入射光束的衍射角; φ_{in} 为入射光束的方位角。进而可以推导出在空间余弦下的出射衍射角与

出射方位角。

$$\begin{cases} \theta = \arccos M \\ \varphi = \arccos \frac{K}{L} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: θ 为出射衍射角; φ 为出射方位角。

3 Risley 光栅跟瞄系统指向误差分析

3.1 误差源分析

Risley 光栅跟瞄系统误差源如图2所示, 主要分为光栅参数误差、转台机械误差这两大类。光栅参数误差包括光栅刻线精度、光栅常数、材料折射率等, 这些误差只与光栅自身有关, 因此分析时予以忽略。转台机械误差指系统中机械转台自身引起的误差, 包括光源倾斜误差、光栅轴倾斜误差、光栅倾斜误差及光栅转角误差。光源倾斜误差为入射光源偏转而引起的系统误差; 光栅轴倾斜误差为轴系在加工装配时产生的实际旋转轴与理想旋转轴的偏差, 两个光栅各自实际旋转轴不平行偏差, 以及轴系旋转时的轴系晃动; 光栅倾斜误差为光栅安装面与实际旋转轴法线不垂直而引起的系统误差; 光栅转角误差指编码器读取的光栅转动角度误差。由于上述转台机械误差中涉及到轴系晃动及编码器精度等随机误差, 该类误差无法通过标定消除。轴系平行、光栅安装精度等误差虽然原则上可以通过后期标定消除, 但由于光栅光轴偏转角度大, 高精度光学测量设备的视场一般较小因此很难标定。为此需在设计阶段对各项误差进行分析和分配, 保证系统的精度指标。

3.2 误差模型建立

上述四种转台机械误差主要是由转台轴系引起的随机误差和装配引起的系统误差组成, 建立双光栅系统误差模型如图3所示。

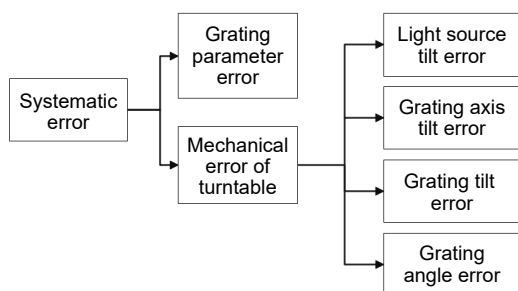


图2 系统主要误差源

Fig. 2 Main error sources of the system

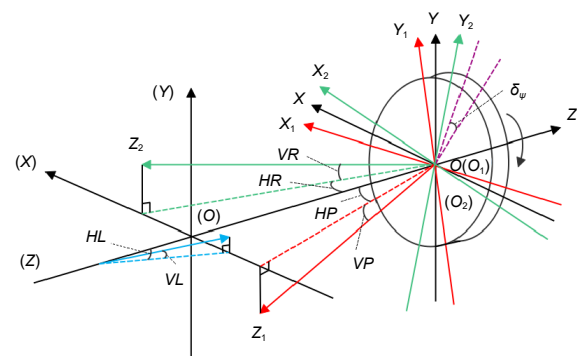


图3 Risley 光栅跟瞄系统误差模型

Fig. 3 Risley grating tracking system error model

坐标系 XYZ 为系统绝对坐标系, 其与光学天线理想光轴坐标系一致, 原点 O 为天线发射光瞳中心。 $X_1Y_1Z_1$ 为光栅坐标系, 其与光栅保持一致并随光栅共同旋转, 原点 O_1 为光栅几何中心, Z_1 为光栅平面法线。光栅处于理想状态时, X_1 、 Y_1 分别与 X 、 Y 平行, Z_1 与 Z 同轴。 $X_2Y_2Z_2$ 为机械转台旋转轴坐标系, 其与转台基座固定不动, 原点 O_2 为机械旋转轴几何中心, Z_2 为转台机械旋转轴轴线。在理想状态时, X_2 、 Y_2 分别与 X 、 Y 平行, Z_2 与 Z 同轴。

在理想状态下, 天线发射的光束沿 Z 轴正方向入射到光栅上, 同时光栅绕 Z_1 轴旋转, 天线发射光束矢量与光栅旋转轴法线矢量平行, 光线垂直照射到光栅上。但在实际系统中, 安装精度问题导致入射光线与 Z 轴不平行产生入射误差, 设其与 Z 轴水平偏角 HL 与竖直偏角 VL 。另外, 机械转台与系统对接时同样会造成转台机械旋转轴 Z_2 与 Z 轴线不平行, 设 Z_2 与 Z 轴的水平偏角和竖直偏角分别为 HR 、 VR 。再者, 光栅安装到机械旋转轴上时, 可能出现光栅端面与机械旋转轴不垂直的情况, 导致光栅平面法线 Z_1 与 Z 轴不平行, 设 Z_1 与 Z 轴的水平偏角和竖直偏角分别为 HP 、 VP 。最后, 转台旋转轴旋转时, 受到编码器安装及精度误差等影响, 光栅在旋转时产生的转角误差为 δ_ψ 。

数理模型推导时为验证模型正确性, 采用 ZEMAX 建立光学模型, 且数理模型与 ZEMAX 中的坐标系保持一致。ZEMAX 验证模型如下图 4 所示, 其中光线由左侧光阑侧入射经过光栅衍射偏转, 最后出射光束打在靶面上。光线从 Z 轴正方向入射, 从 Z 轴负方向朝正方向看去, 光栅绕 Z 轴顺时针旋转规定为正旋转

方向。

3.2.1 光源倾斜误差模型

式 (3) 建立了光源斜入射时的出射光束方向余弦公式, 由于该公式中所需入射光源角度为空间角, 根据空间几何关系, 推导出光源倾斜误差模型下的入射衍射角 θ_{in1} 与入射方位角 φ_{in1} , 如式 (5) 所示。

$$\begin{cases} \theta_{in1} = \arccos[\cos(VL) \cdot \cos(HL)] \\ \varphi_{in1} = \arccos\left\{\frac{\sin(VL)}{\sqrt{1 - [\cos(HL) \cdot \cos(VL)]^2}}\right\} \end{cases} \quad (5)$$

随后利用式 (3)、式 (4) 解出出射光束的三个方向余弦, 分别记为 K_1 、 L_1 、 M_1 , 出射衍射角为 θ_1 , 出射方位角为 φ_1 。

系统工作时光栅会在全周范围内转动, 假定光源倾斜误差模型中 HL 与 VL 均为 0.1° , 光栅旋转 $0^\circ \sim 360^\circ$, 利用 MATLAB 对出射衍射角 θ_1 与方位角 φ_1 进行仿真, 并用 ZEMAX 进行验证。

图 5(a, b) 分别是光源倾斜误差模型中 θ_1 与 φ_1 的仿真结果。仿真结果显示, θ_1 与 φ_1 的计算与验证结

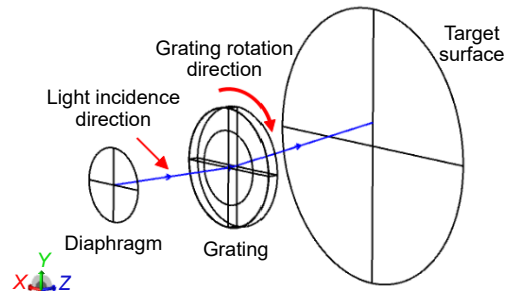


图 4 ZEMAX 误差验证模型与坐标系示意图

Fig. 4 ZEMAX error verification model and coordinate system diagram

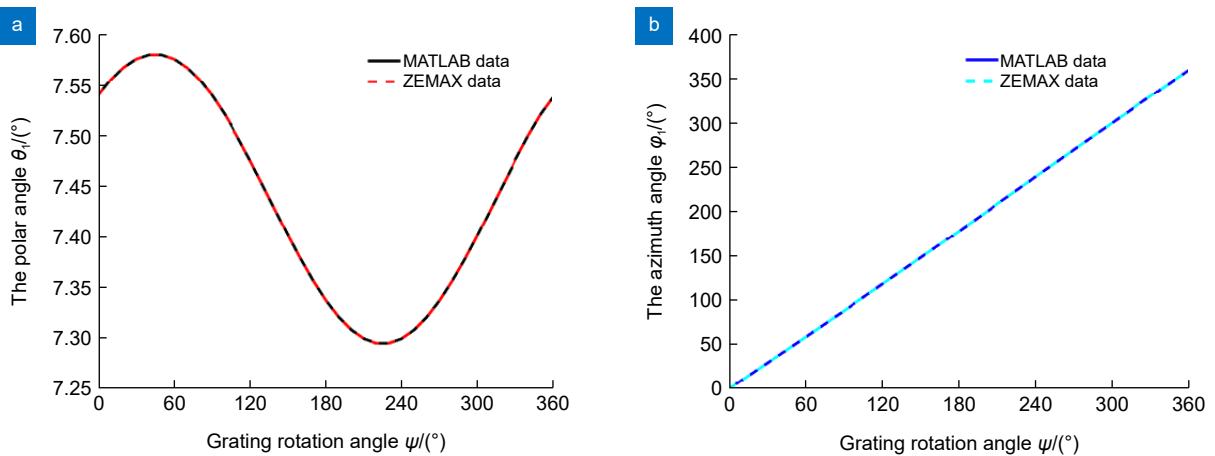


图 5 衍射角 θ_1 与方位角 φ_1 的仿真对比。(a) 衍射角 θ_1 对比; (b) 方位角 φ_1 对比

Fig. 5 Simulation comparison between polar angle θ_1 and azimuth angle φ_1 . (a) Polar angle θ_1 comparison; (b) Azimuth angle φ_1 comparison

果对比极小, 分别约为 $0.00076''$ 与 $0.0013''$, 而误差产生的原因为两软件的计算结果精确位数不一致。

3.2.2 光栅轴倾斜误差模型

光栅轴倾斜误差模型存在两个偏角, 即水平偏角 HR 与竖直偏角 VR , 而对于光栅轴倾斜误差来说, 其本质上属于光源斜入射, 推导出光栅轴倾斜误差模型下的入射衍射角 θ_{in2} 与入射方位角 φ_{in2} 如式 (6) 所示。

$$\begin{cases} \theta_{in2} = \arccos[\cos(VR) \cdot \cos(HR)] \\ \varphi_{in2} = \arccos\left\{\frac{\sin(VR)}{\sqrt{1 - [\cos(HR) \cdot \cos(VR)]^2}}\right\} \end{cases} \quad (6)$$

将其带入式 (3), 得到光栅轴偏转时出射光束的三个方向余弦, 由于光栅轴倾斜, 此时利用式 (3) 得到的方向余弦应为在光栅轴误差模型中局部坐标系 $X_2Y_2Z_2$ 下的方向余弦, 记为 K_2 、 L_2 、 M_2 , 出射衍射角为 θ_2 , 出射方位角为 φ_2 。

引入 R 表示光线长度, 其方向为斜入射时的方向, 将方向余弦 K_2 、 L_2 、 M_2 转换为直角坐标系下的坐标并将其组成坐标矩阵 M_c 。

$$\begin{cases} x = \frac{K_2}{R} \\ y = \frac{L_2}{R} \\ z = \frac{M_2}{R} \end{cases}, \quad (7)$$

$$M_c = \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: x 、 y 、 z 代表出射光线在局部坐标系 $X_2Y_2Z_2$ 下的坐标。

由于光栅轴绕 X 、 Y 轴发生了旋转倾斜, 建立坐标变换矩阵 M_x 与 M_y 。

$$\begin{cases} M_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(VR) & -\sin(VR) \\ 0 & \sin(VR) & \cos(VR) \end{bmatrix} \\ M_y = \begin{bmatrix} \cos(HR) & 0 & -\sin(HR) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(HR) & 0 & \cos(HR) \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (9)$$

式中: M_x 表示绕 X 轴旋转坐标系的旋转矩阵; M_y 表示绕 Y 轴旋转坐标系的旋转矩阵。

随后将坐标矩阵 M_c 进行两次坐标变换, 如式 (10) 所示, 再将 x 、 y 、 z 转换成在倾斜前坐标系 XYZ 下的坐标 x' 、 y' 、 z' 。

$$M_f = M_x \cdot (M_y^{-1} \cdot M_c), \quad (10)$$

式中: x' 、 y' 、 z' 分别为新坐标矩阵 M_f 的行向量对应的值。

最后将原坐标系下的坐标 x' 、 y' 、 z' 转换回方向余弦 K_2' 、 L_2' 、 M_2' , 如式 (11) 所示。

$$\begin{cases} K_2' = x'R \\ L_2' = y'R \\ M_2' = z'R \end{cases} \quad (11)$$

此时得到的方向余弦 K_2' 、 L_2' 、 M_2' 即为出射光束在坐标系 XYZ 下的方向余弦, 利用式 (4) 解出偏转后的出射衍射角 θ_2' 与出射方位角 φ_2' 。

图 6(a, b) 分别为光栅轴倾斜误差模型中 θ_2' 与 φ_2' 的仿真结果, 仿真结果显示, θ_2' 与 φ_2' 的计算与验证结果对比极小, 分别约为 $0.0003''$ 与 $0.00008''$ 。

3.2.3 光栅倾斜误差模型

光栅倾斜与光栅轴倾斜略有不同。光栅轴倾斜时, 由于光栅安装在旋转轴上, 光栅跟随轴线做旋转, 而光栅倾斜时光栅表面法线相对于光栅旋转轴做圆锥

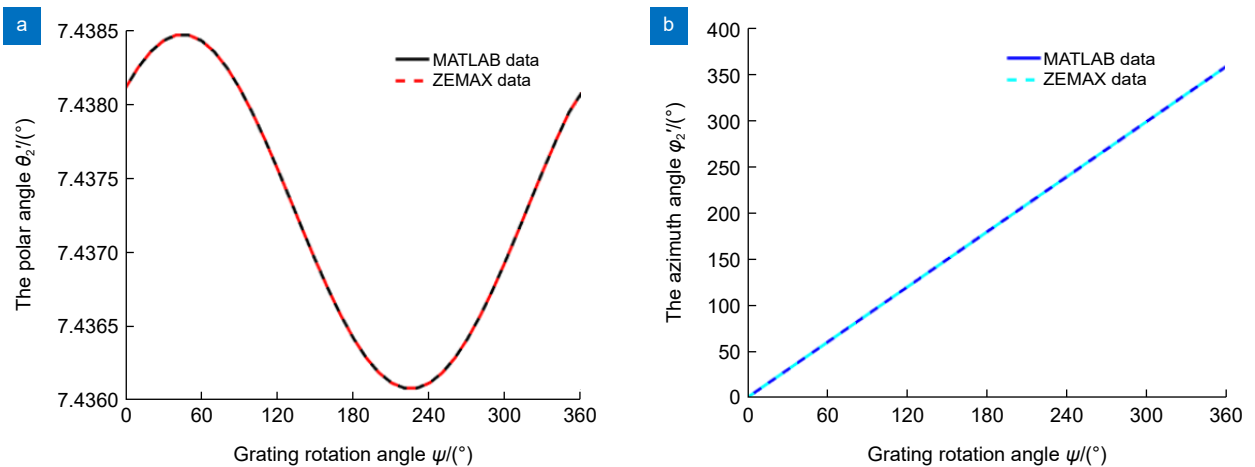


图 6 衍射角 θ_2' 与方位角 φ_2' 的仿真对比。(a) 衍射角 θ_2' 对比; (b) 方位角 φ_2' 对比

Fig. 6 Simulation comparison between polar angle θ_2' and azimuth angle φ_2' . (a) Polar angle θ_2' comparison; (b) Azimuth angle φ_2' comparison

运动。但光栅倾斜误差角度在实际工程中很小, 即这个圆锥运动的幅度很小, 所以考虑用光栅轴倾斜误差模型代替光栅倾斜误差模型。为了验证误差模型代替可信度, 对这两种误差模型在 ZEMAX 中分别进行仿真, 对比两种误差模型下出射衍射角与出射方位角差值大小。

假定光栅水平与竖直偏角均为 0.1° , 光栅轴水平与竖直偏角均为 0.1° , 光栅旋转 $0^\circ \sim 360^\circ$, 对比两种误差模型下出射衍射角 θ_3 与方位角 φ_3 的变化。分析水平与竖直偏角在 $0.01^\circ \sim 0.1^\circ$ 变化时最大指向误差差值的变化。

图 7(a, b) 分别为光栅轴与光栅倾斜时的仿真对比。对比图 7(a, b), 两种情况略有差别, 在水平与竖直倾斜角为 0.1° 时, θ_3 与 φ_3 的最大误差约为 $7.316''$ 与 $56.73''$ 。对比图 7(c, d), 水平与竖直偏角在 $0.01^\circ \sim 0.1^\circ$ 增长过程中,

θ_3 与 φ_3 的最大值差值呈线性关系增长, 而在实际工况中水平与竖直倾斜角仅 $1.8''$ 左右。因此, 在实际工况中 θ_3 与 φ_3 的最大值差值仅为 $0.0366''$ 与 $0.2837''$, 对于整个系统来说可以忽略, 故在此处不对光栅倾斜误差进行新的数理模型计算, 而采用光栅轴倾斜误差模型。

3.2.4 光栅转角误差模型

光栅转角误差为编码器对光栅转角读取的误差, 在式 (2) 中体现为光栅旋转角 ψ 值的大小, 因此无需对光栅转角误差模型进行验证, 在仿真分析中只需引入误差值 δ_ψ 即可。

4 误差对指向精度的影响

采用限定误差方法单独对每种误差进行分析, 在分析一种误差时, 默认其他误差为 0。在光栅旋转 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内, 分别计算理想模型的出射光线矢量

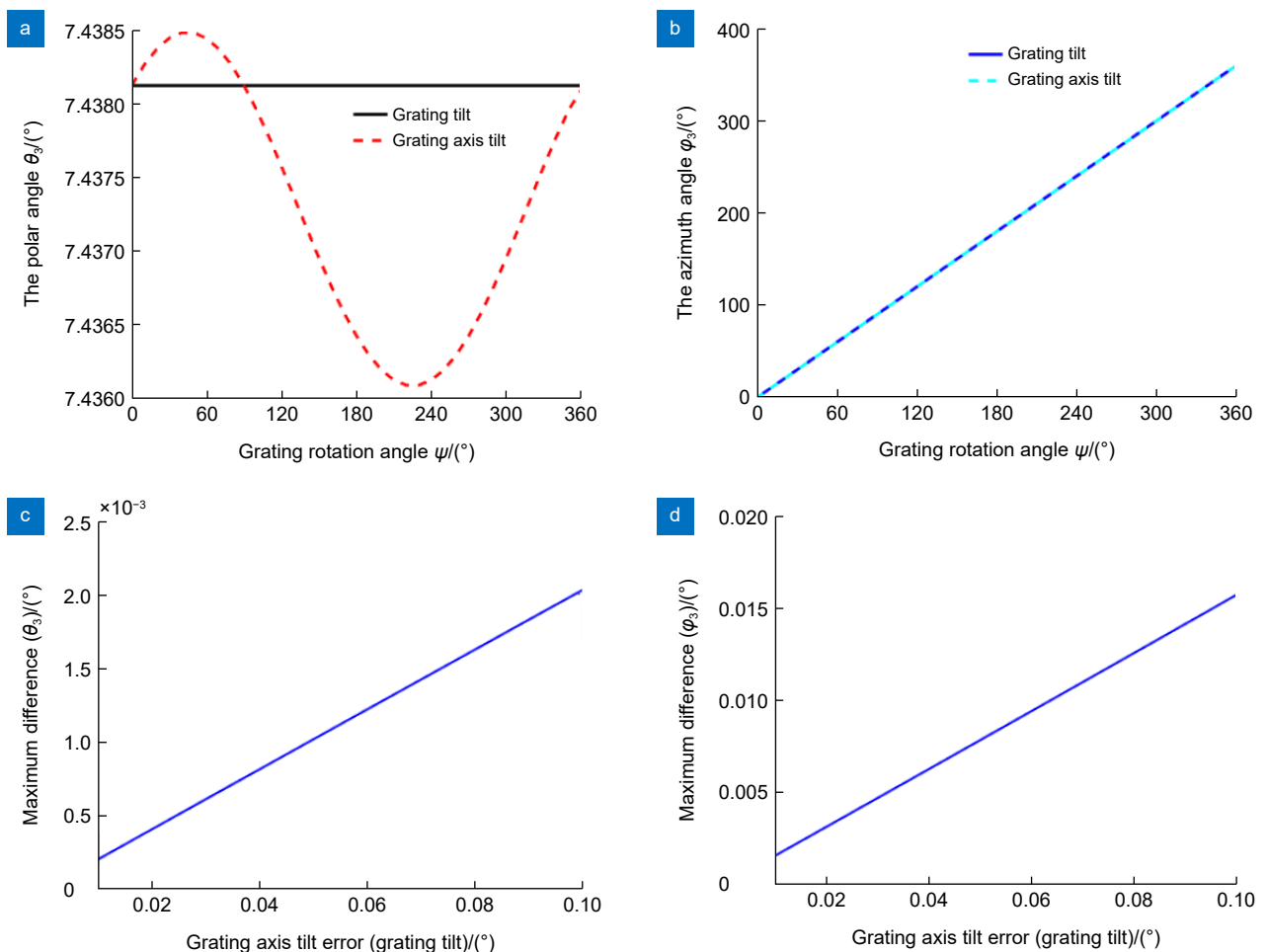


图 7 光栅轴与光栅倾斜时的仿真对比。(a) 衍射角 θ_3 对比; (b) 方位角 φ_3 对比; (c) 最大衍射角差值变化; (d) 最大方位角差值变化

Fig. 7 Simulation comparison between grating axis and grating tilt. (a) Comparison of polar angle θ_3 ; (b) Comparison of azimuth angle φ_3 ; (c) Maximum polar angle difference change; (d) Maximum azimuth angle difference change

$A_0 = (K_0, L_0, M_0)$ 与误差模型下的出射光线矢量 $A_e = (K_e, L_e, M_e)$, 由于出射光线向量均为单位向量, 指向误差通过式 (12) 计算^[6].

$$e = \arccos(A_0 \cdot A_e). \quad (12)$$

仿真使用的参数如表 1 所示。

4.1 光源倾斜误差

对于光源倾斜误差, 从以下三个方面进行分析:

表 1 仿真使用的系统参数

Table 1 System parameters used in the simulation

System parameter	Numerical value
Grating period/ μm	8.22
Incident wavelength/ μm	1.064
Diffraction order	± 1

第一, 对水平与竖直两个特定方向的光源倾斜误差, 分析两片光栅随光栅轴转动的指向误差; 第二, 分析指向误差最大值随光源倾斜误差在不同倾斜方向时的变化; 第三, 分析光源倾斜误差在倾斜方向变化时指向误差最大值的变化。光源倾斜误差的倾斜方向如图 8 所示, 其中 γ_L 代表光源倾斜时光束在 XOY 平面上的投影与 Y 轴的夹角。

图 9(a, b) 分别为光源水平倾斜角 HL 与竖直倾斜

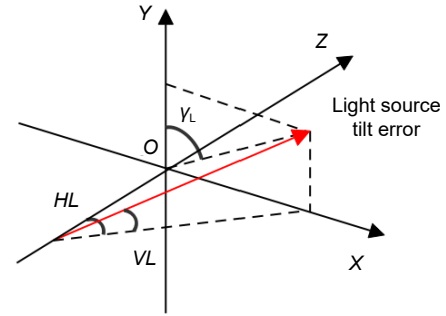


图 8 光源倾斜误差的倾斜方向

Fig. 8 Tilt direction of the light source tilt error

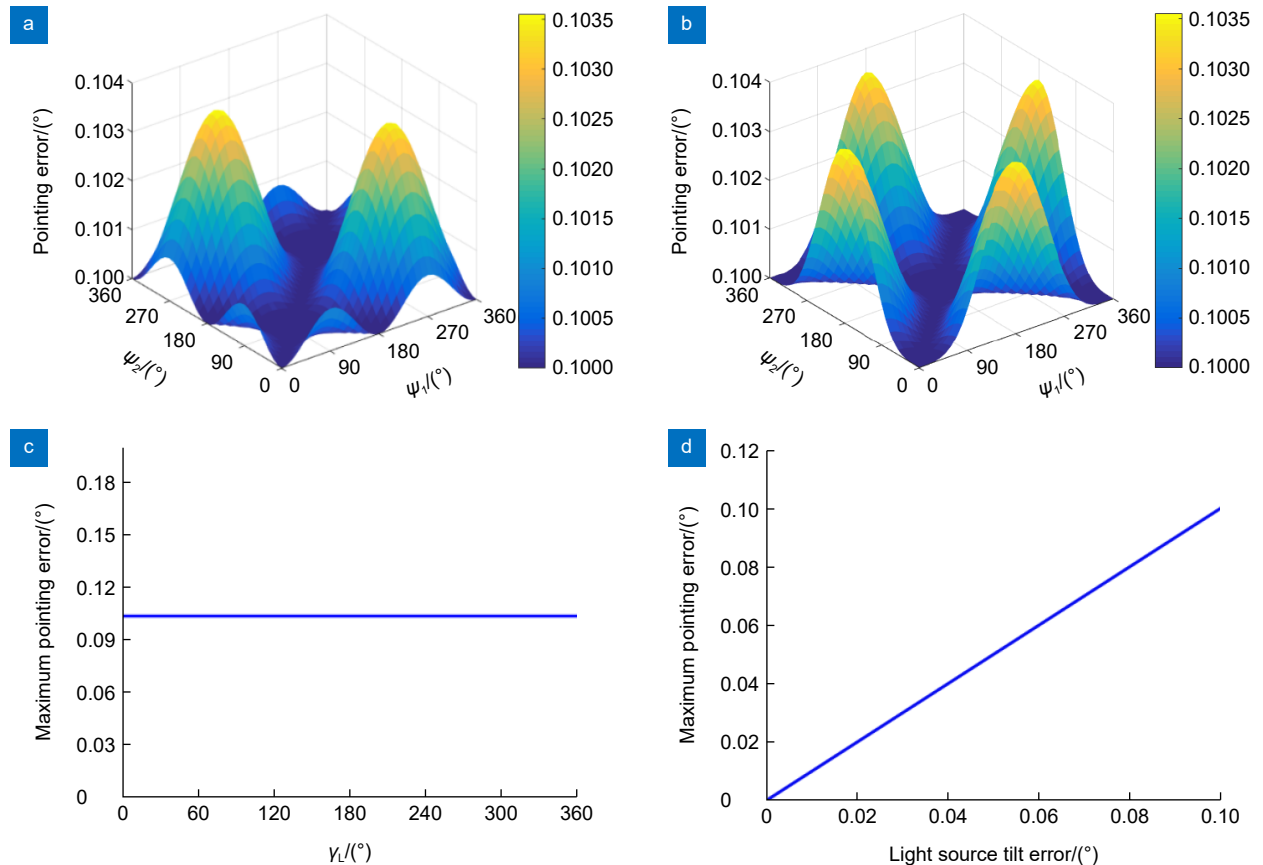


图 9 光源倾斜误差造成的指向误差。(a) $HL=0.1^\circ$ 时指向误差; (b) $VL=0.1^\circ$ 时指向误差; (c) 最大指向误差随 γ_L 的变化; (d) 最大指向误差随光源倾斜误差的变化

Fig. 9 Pointing error caused by the light source tilt error. (a) Pointing error at $HL=0.1^\circ$; (b) Pointing error at $VL=0.1^\circ$; (c) Maximum pointing error varies with γ_L ; (d) Maximum pointing error varies with the tilt error of the light source

角 γ_L 为 0.1° 时的指向误差在指向区域内的变化情况, 图 9(c) 为指向误差最大值随 γ_L 的变化, 图 9(d) 为光源倾斜误差角在 $0.01^\circ \sim 0.1^\circ$ 变化时指向误差最大值的变化, 两片光栅的转动角度依次用 ψ_1 、 ψ_2 表示。

分析结果表明, 光源倾斜误差在水平或竖直两个特定倾斜方向时, 光源倾斜误差造成的指向误差最大值相同为 0.1035° , 但在光栅旋转时指向误差会产生不同的分布情况; 最大指向误差随光源倾斜误差倾斜方向变化; 光源倾斜误差从 $0.01^\circ \sim 0.1^\circ$ 变化时最大指向误差呈线性增长, 且光源倾斜对双光栅指向系统的指向误差影响较大, 设计装调过程中应严格控制。

4.2 光栅轴偏转误差

光栅轴倾斜误差的倾斜方向定义同光源倾斜误差的倾斜方向, 用 γ_R 表示。由于双光栅转台存在两个光栅轴, 所以分别对两个光栅轴进行单独偏转误差分析。图 10(a, b) 分别为第一个光栅轴水平倾斜角 HR_1 与竖直倾斜角 VR_1 为 0.1° 时的指向误差在指向区域内的变化情况; 图 10(c, d) 分别为第二个光栅轴水平倾斜角 HR_2 与竖直倾斜角 VR_2 为 0.1° 时的指向误差在指向区域内的变化情况; 图 10(e, f) 为两光栅轴指向误差最大值随 γ_R 的变化; 图 10(g) 为光栅轴倾斜误差角在 $0.01^\circ \sim 0.1^\circ$ 变化时两光栅轴指向误差最大值的变化。

分析结果表明, 光栅轴倾斜误差在水平或竖直两个特定倾斜方向时, 两光栅轴倾斜误差造成的指向误差最大值相同, 分别为 $3.168''$ 与 $9.112''$, 但在光栅旋转时指向误差会产生不同的分布情况; 光栅轴倾斜误差随倾斜方向变化时, 最大指向误差也随之变化, 且在 45° 时达到极大值; 光栅轴倾斜误差在 $0.01^\circ \sim 0.1^\circ$ 变化时, 最大指向误差呈线性增长, 且光栅轴 2 的倾斜误差对指向精度的影响大于光栅轴 1, 二者斜率比约为 $3:1$ 。相较于光源倾斜误差, 光栅轴倾斜误差造成的指向误差较小, 在设计装调时应尽量控制。

4.3 光栅倾斜误差

由于光栅倾斜误差采用光栅轴倾斜误差模型, 故在此处不进行单独的分析, 而后续的误差分配也基于光栅轴倾斜误差模型。

4.4 光栅转角误差

对于光栅转角误差, 主要分析两个方面的影响: 编码器出现转角误差时指向误差的变化; 指向误差最大值随编码器转角误差的变化。对两片光栅进行单

独转角误差仿真, 图 11(a, b) 分别为两片光栅转角误差为 0.1° 时指向误差在指向区域内的变化; 图 11(c) 为光栅转角误差在 $0.01^\circ \sim 0.1^\circ$ 变化时指向误差最大值的变化。

分析结果表明, 两片光栅的转角误差造成的指向误差最大值相同为 0.01305° , 且在两片光栅旋转时的分布情况也基本一致; 光栅转角误差在 $0.01^\circ \sim 0.1^\circ$ 变化时, 最大指向误差呈线性增长且曲线斜率相同。光栅转角误差造成的指向误差较大, 在设计装调过程中应对编码器精度的进一步要求。

5 误差分配

某双光栅转台指向精度指标 $\delta_e = 10''$, 结合误差模型中的各项误差源对光栅指向误差的灵敏度进行误差分配, 满足指向精度指标。

由于在先前的分析中固定各误差源为 0.1° , 得到了其造成的指向误差分布, 因此可以计算各误差源与其造成的指向误差的误差比例为

$$K_i = \frac{0.1^\circ}{e_i}, \quad (13)$$

式中: e_i 为各误差源为 0.1° 时造成的指向误差; K_i 为各项误差比例。式 (13) 至式 (17) 中 i 的表达式为

$$i = L_L, R_1, R_2, P_1, P_2, Q_1, Q_2, \quad (14)$$

式中: L_L 、 R_1 、 R_2 、 P_1 、 P_2 、 Q_1 、 Q_2 分别代表误差源中光源倾斜、光栅轴 1 倾斜、光栅轴 2 倾斜、光栅 1 倾斜、光栅 2 倾斜、光栅 1 转角误差、光栅 2 转角误差。具体数值见表 2。

进而得到各项误差源误差比例的和 (K_{all}), 其表达式为

$$K_{all}^2 = \sum_i K_i^2. \quad (15)$$

随后利用式 (16) 分配各项误差源所造成的指向误差, 表达式为

$$\delta_i = \sqrt{\frac{K_i^2 \cdot \delta_e^2}{K_{all}^2}}, \quad (16)$$

式中: δ_i 表示按照总指向误差指标分配出的各项误差源所对应的指向误差。

由于各项误差源造成的指向误差均为线性变化, 则按照误差比例反推出各误差源的大小。

$$Y_i = \frac{\delta_i}{K_i}, \quad (17)$$

式中: Y_i 表示各项误差源。

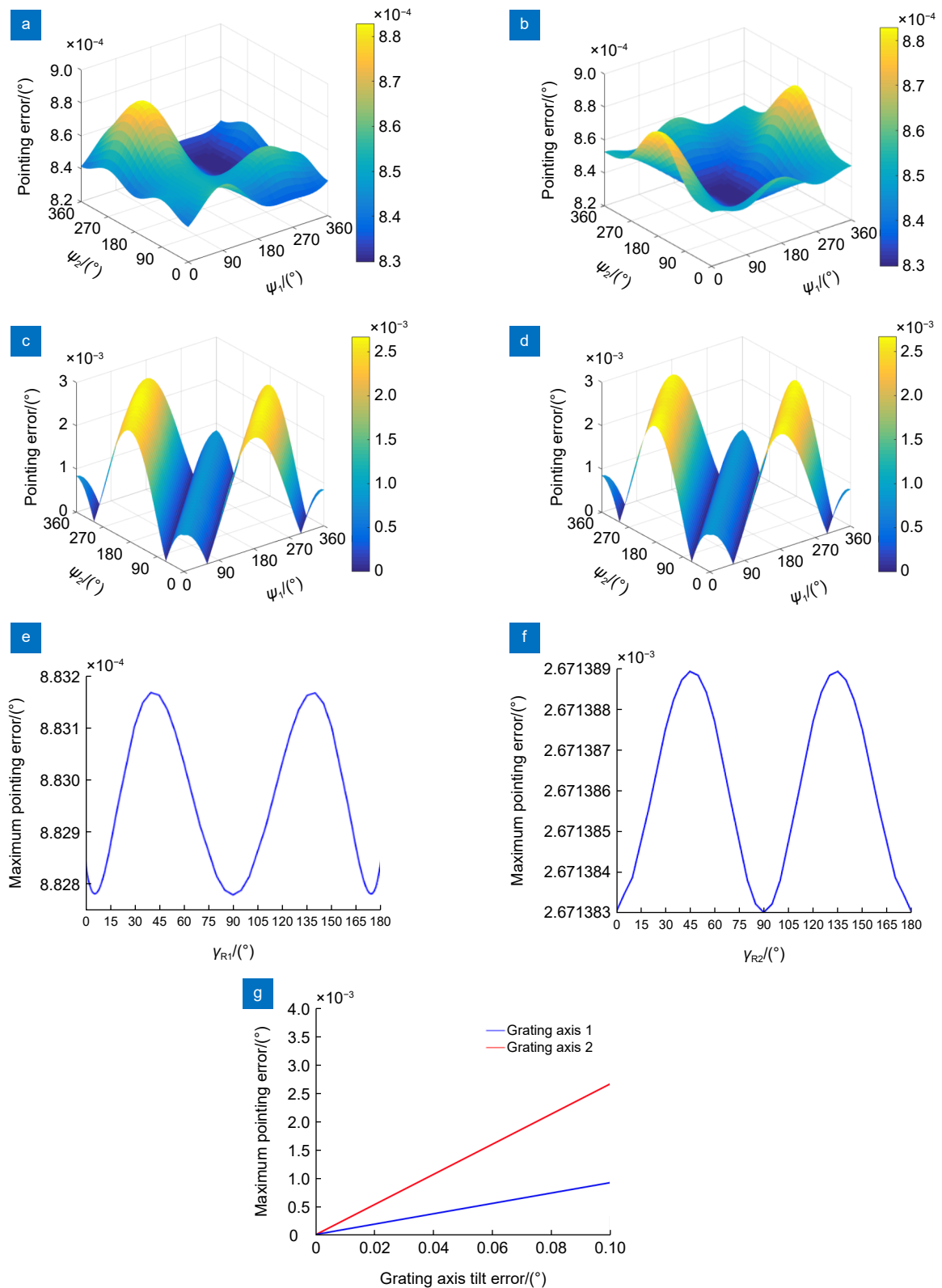


图 10 光栅轴倾斜误差造成的指向误差。(a) $HR_1=0.1^\circ$ 时指向误差; (b) $VR_1=0.1^\circ$ 时指向误差; (c) $HR_2=0.1^\circ$ 时指向误差; (d) $VR_2=0.1^\circ$ 时指向误差; (e) 最大指向误差随 γ_{R1} 的变化; (f) 最大指向误差随 γ_{R2} 的变化; (g) 最大指向误差随光栅轴倾斜误差的变化

Fig. 10 Pointing error caused by grating axis tilt error. (a) Pointing error at $HR_1=0.1^\circ$; (b) Pointing error at $VR_1=0.1^\circ$; (c) Pointing error at $HR_2=0.1^\circ$; (d) Pointing error at $VR_2=0.1^\circ$; (e) Maximum pointing error varies with γ_{R1} ; (f) Maximum pointing error varies with γ_{R2} ; (g) Change of the maximum pointing error with the tilt error of the grating axis

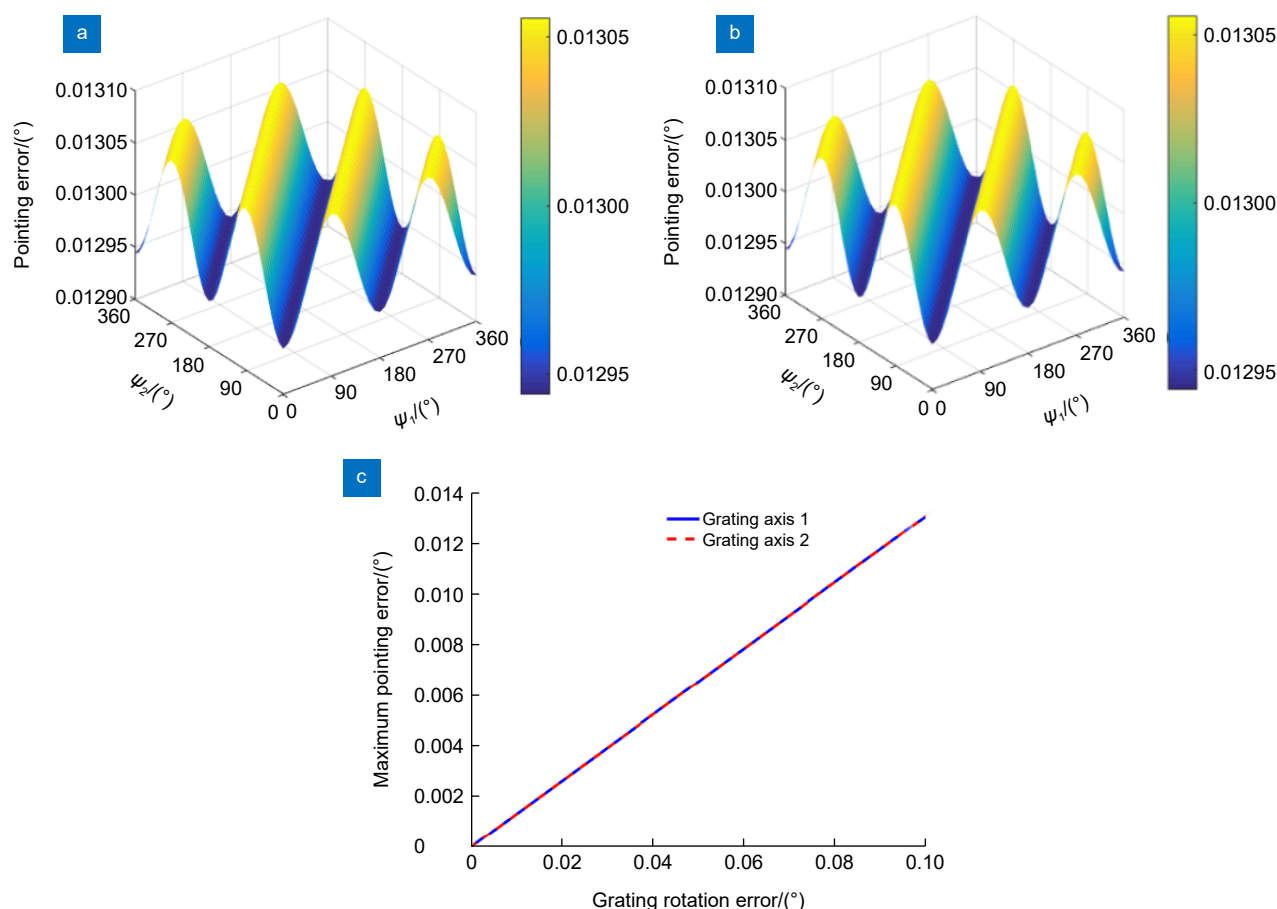


图 11 光栅转角误差造成的指向误差。(a) $\delta_{\psi_1}=0.1^\circ$ 时指向误差; (b) $\delta_{\psi_2}=0.1^\circ$ 时指向误差;
(c) 最大指向误差随光栅转角误差的变化

Fig. 11 Pointing error caused by grating angle error. (a) Pointing error at $\delta_{\psi_1}=0.1^\circ$; (b) Pointing error at $\delta_{\psi_2}=0.1^\circ$; (c) Change of the maximum pointing error with the angle error of the grating

表 2 各误差源引起指向误差大小

Table 2 Size of the pointing error under each error source

Error source (0.1°)	$e/(\circ)$
Light tilt error	0.10350
Grating axis 1 tilt error	0.00088
Grating axis 2 tilt error	0.00250
Grating 1 tilt error	0.00088
Grating 2 tilt error	0.00250
Grating 1 angle error	0.01300
Grating 2 angle error	0.01300

各误差源造成的指向误差及其对应的误差源分配结果汇总至表 3。

将分配后的误差源对应至双光栅转台中。光源倾斜误差在双光栅转台中主要取决于入射光源的精度，定义为天线同轴误差。光栅轴倾斜误差在双光栅转台中主要取决于机械轴理想旋转轴与实际旋转轴的误差，主要由轴系安装误差与轴系晃动共同构成。在设计及

检测时合并为轴系偏转误差，而在双光栅转台中存在两个同轴转轴。对于第二片光栅的旋转轴，其自身存在轴系偏转误差的同时，还存在其实际旋转轴与第一片光栅的实际旋转轴的倾斜误差，称之为两轴平行度^[11-12]。因此在整个双光栅转台中，第二片光栅轴的倾斜误差为其本身的轴系偏转误差加上两轴不平行度。光栅倾斜误差在双光栅转台中主要取决于光栅安装面与对应旋转轴的垂直度，定义为光栅安装误差。光栅转角误差主要取决于编码器精度。具体分配数据见表 4。

6 实验验证

根据以上双光栅转台误差分配参数设计了双光栅转台，光栅组件 1、2 分别由轴系 1、2 带动旋转，双光栅转台通过固定法兰安装在 Risley 光栅跟瞄系统中。双光栅转台结构及实物示意与装调检测现场如图 12(a~c) 所示，对其进行装调检测并将检测结果汇

表 3 误差源分配
Table 3 Error source allocation

Allocation of pointing errors	The size of the allocation pointing error/(")	Corresponding source of error	The corresponding error source assignment value/(")
Pointing error caused by the tilt of light δ_l	9.83841	Light tilt error Y_l	9.51
Pointing error caused by the tilt of grating axis 1 δ_{R1}	0.08365	Grating axis 1 tilt error Y_{R1}	9.55
Pointing error caused by the tilt of grating axis 2 δ_{R1}	0.23765	Grating axis 2 tilt error Y_{R2}	9.52
Pointing error caused by the tilt of grating 1 δ_{P1}	0.08365	Grating 1 tilt error Y_{P1}	9.55
Pointing error caused by the tilt of grating 2 δ_{P2}	0.23765	Grating 2 tilt error Y_{P2}	9.52
Pointing error caused by the error of grating angle δ_{Q1}	1.24050	Grating 1 angle error Y_{Q1}	9.54
Pointing error caused by the error of grating angle δ_{Q2}	1.24050	Grating 2 angle error Y_{Q2}	9.54

表 4 系统误差源对应的双光栅转台误差
Table 4 Error of double grating turntable corresponding to the system error source

Systematic error source	The corresponding double grating turntable error	The design error of the corresponding double grating turntable/(")
Light tilt error	Antenna coaxial error	8
Grating axis tilt error	Deflection error of grating axis (grating axis 1)	5
	Deflection error of grating axis+ Parallelism of the two axes (grating axis 2)	5+4
Grating tilt error	Grating 1 installation error	7
	Grating 2 installation error	7
Grating angle error	Encoder error	3

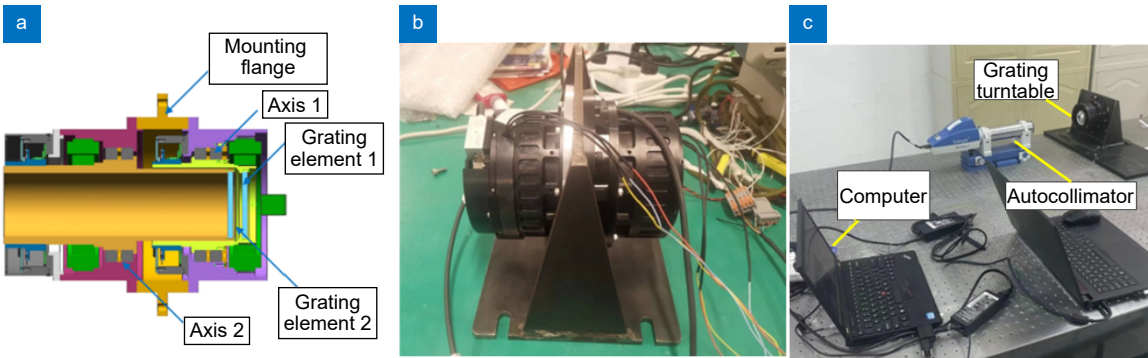


图 12 双光栅转台实物与装调测试示意图。(a) 双光栅转台结构; (b) 双光栅转台实物; (c) 装调测试现场
Fig. 12 Schematic diagram of double grating turntable and installation test. (a) Double grating turntable; (b) Double grating turntable installation; (c) Test site installation test site

总至表 5。

在完成双光栅转台装调后, 对其指向误差进行测试, 测试流程如图 13 所示^[13-14]。

测试设备由光源天线、平行光管、双光栅转台、经纬仪、测试相机和 6 自由度摇摆台组成。测试前将双光栅转台和摇摆台归零, 调整光管使测试相机接收到的光斑在视场中心。经纬仪精度为 2", 相机分辨率为 1024×1080, 像元大小 4.5 μm, 焦距 464 mm, 视场 0.71°×0.57°。测试时利用摇摆台偏转一定角度, 实际角度利用经纬仪标定, 控制光栅按标定角度进行指向, 相机接收光管脱靶量, 即为指向误差。在±5°工

作范围内对不同指向角度进行指向误差测试。图 14 为构建的测试现场。测试数据如图 15 所示, X、Y 坐标轴分别代表双光栅转台在两个方向的偏转角度, 其中 Z 轴表示在不同偏转角度下的指向误差大小, 实验共测试 50 次, 其中最大指向误差为 7.2", 多次实验数据表明指向误差满足指标要求。

7 结 论

本文对 Risley 光栅跟瞄系统中的指向误差进行了分析。首先对 Risley 光栅跟瞄系中的系统误差源进行了总结, 对四种误差进行了误差模型的推导, 并用

明, 双光栅转台实际最大指向误差 $\delta_e=7.2''$, 满足双光栅转台的指向精度指标。因此本文所建立的 Risley 光栅跟瞄系统的系统误差模型及该模型中系统误差源对指向误差影响的分析较为准确, 且对双光栅转台的设计、加工与装调具有指导意义。

利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

参考文献

- [1] Jiang H L, Tong S F. The Technologies and Systems of Space Laser Communication[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
姜会林, 佟首峰. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [2] Xie M J, Ma J G, Fu C Y, et al. Precision tracking and pointing technologies in space optical communication[J]. *Opto-Electron Eng*, 2000, 27(1): 13–16.
谢木军, 马佳光, 傅承毓, 等. 空间光通信中的精密跟踪瞄准技术[J]. *光电工程*, 2000, 27(1): 13–16.
- [3] Schwarze C R, Vaillancourt R, Carlson D, et al. Risley-prism based compact laser beam steering for IRCM, laser communications, and laser radar[J]. *Critical Technology*, 2005, 9: 1–9.
- [4] Hakun C, Budinoff J, Brown G, et al. A boresight adjustment mechanism for use on laser altimeters[EB/OL]. [2023-03-01]. <https://esmat.su/amspapers/pastpapers/pdfs/2004/hakun.pdf>.
- [5] Yu H L, Bao Z K, Wang X, et al. XY-2 satellite laser communication equipment PAT test in orbit[J]. *Infrared Laser Eng*, 2021, 50(5): 20200327.
余辉龙, 鲍智康, 王璇, 等. XY-2 号卫星激光通信载荷 PAT 在轨测试[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(5): 20200327.
- [6] Song Y N. Key technology research of coarse pointing mechanism for laser communication based on Risley prisms[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2023.
<https://doi.org/10.27522/d.cnki.gkcg.2023.000004>.
宋一诺. 基于旋转双棱镜的激光通信粗指向机构关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学 (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2023.
<https://doi.org/10.27522/d.cnki.gkcg.2023.000004>.
- [7] Wang J, Gao L, Jiang L, et al. Establishment and verification of formulas of target tracking based on dual liquid crystal polarization gratings[J]. *Opt Express*, 2022, 30(24): 43062–43077.
- [8] Oh C, Kim J, Muth J F, et al. A new beam steering concept: Risley gratings[J]. *Proc SPIE*, 2009, 7466: 74660J.
- [9] Kim J, Miskiewicz M N, Serati S, et al. Nonmechanical laser beam steering based on polymer polarization gratings: design optimization and demonstration[J]. *J Lightw Technol*, 2015, 33(10): 2068–2077.
- [10] Zhou Y, Fan D P, Fan S X, et al. Laser scanning by rotating polarization gratings[J]. *Appl Opt*, 2016, 55(19): 5149–5157.
- [11] Li X M, Zhu G S, Guo M H, et al. Coaxiality measurement and uncertainty analysis of rotating shafts based on autocollimation[J]. *Infrared Laser Eng*, 2023, 52(5): 20220794.
李小明, 朱国帅, 郭名航, 等. 基于光学自准直的旋转轴平行度测量与不确定度分析[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(5): 20220794.
- [12] Fu H, Wu Q, Lin B, et al. The measurement of parallelism based on diffraction grating[J]. *Opto-Electron Eng*, 2012, 39(7): 61–66.
符红, 吴琼, 林斌, 等. 基于双光栅的平行度检测[J]. *光电工程*, 2012, 39(7): 61–66.
- [13] Si M H, Wang W M, Zhang Y, et al. Research on dynamic angle measurement method based on electro-optical servo platform[J]. *Opto-Electron Eng*, 2019, 46(10): 180445.
倡明华, 王伟明, 张勇, 等. 基于光电伺服平台的动态角度测量方法研究[J]. *光电工程*, 2019, 46(10): 180445.
- [14] Xi Y D, Yu Y, Ding Y Y, et al. An optoelectronic system for fast search of low slow small target in the air[J]. *Opto-Electron Eng*, 2018, 45(4): 170654.
奚玉鼎, 于涌, 丁媛媛, 等. 一种快速搜索空中低慢小目标的光电系统[J]. *光电工程*, 2018, 45(4): 170654.

作者简介



董云冲 (2000-), 男, 硕士研究生, 主要从事精密光机结构等研究。

E-mail: 863286797@qq.com



【通信作者】李小明 (1984-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事精密光机结构分析与优化方面的研究。

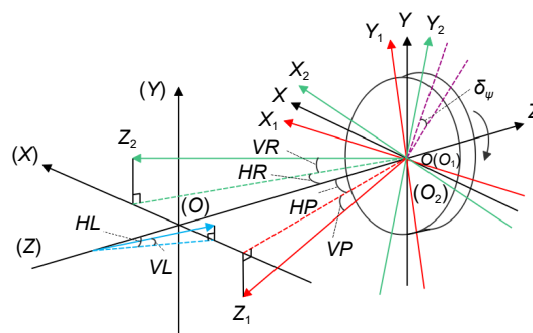
E-mail: lxm Kidd@163.com



扫描二维码, 获取PDF全文

Analysis of pointing error of Risley grating tracking system

Dong Yunchong¹, Li Xiaoming^{1,2*}, Chen Xilai¹, Yang Sheng¹, Fu Yue¹



Risley grating tracking system error model

Overview: With the continuous progress of science and technology, laser application technologies such as space laser communication and photoelectric tracking continue to develop, and the requirements for tracking systems are becoming higher and higher. The Risley grating tracking system is small in size and light in weight, which can be used in some specific environments. The system is mainly composed of two rotating polarization gratings, through the diffraction of polarization gratings to achieve the direction of the beam in the conical range, so as to achieve the acquisition and tracking of the target. As an important index of the Risley grating tracking system, pointing accuracy is not only related to the servo system and optical system but also affected by system errors in the Risley grating turntable. Therefore, in this paper, systematic error sources in the Risley grating tracking system are classified and analyzed, and a systematic error source model is established, which mainly includes light source tilt error, grating axis tilt error, grating tilt error, and grating angle error.

The polar angle and azimuth angle of the outgoing beam under the error model are obtained by introducing the error angle, and verified by ZEMAX optical software. The results show that the maximum difference between the polar angle and the azimuth angle is 0.00076° and 0.0013°, respectively. After verification, MATLAB software was used to simulate the influence of each error source on the pointing error of the Risley grating tracking system. When each system error was set to 0.1°, the influence of light source tilt error and grating angle error on pointing error was 0.1035° and 0.01305°, respectively. The grating axis tilt error and the grating tilt error are both 3.168°. Finally, according to the sensitivity of each error source to the pointing error, the four errors are assigned and corresponding to the Risley grating turntable, which guides the design, processing, and installation of the turntable. After the Risley grating turntable is finished, the pointing accuracy of the Risley grating turntable is verified by experiments. Multiple experimental results show that the actual maximum pointing error of the Risley grating turntable $\delta_e=7.2''$, which meets the design index of 10''.

Dong Y C, Li X M, Chen X L, et al. Analysis of pointing error of Risley grating tracking system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(3): 240241; DOI: [10.12086/oe.2025.240241](https://doi.org/10.12086/oe.2025.240241)

¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China; ²National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

* E-mail: lxmkidd@163.com