

激光与光电子学进展

基于双光楔棱镜的激光通信光端机设计

邢振冲^{1,2}, 王伟^{1,2*}¹中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050011;²河北省光子信息技术与应用重点实验室, 河北 石家庄 050011

摘要 随着激光通信向负载能力有限应用平台的推广,激光通信系统逐渐向着轻量化和小型化的方向发展。作为激光通信系统的重要一环,扫描捕获单元的轻小型化设计成为亟待解决的问题。首先,基于旋转双光楔棱镜的扫描捕获单元摒弃常规的机械伺服转台,通过棱镜绕公共旋转轴的独立旋转实现大视场光束偏转。然后,基于非近轴光线追迹建立双光楔棱镜光束偏转模型并分析了双光楔棱镜的扫描模式,为轻小型激光通信光端机的研制提供了一定的参考。最后,基于旋转双光楔棱镜和四象限探测器复用技术提出并分析了一种轻小型激光通信光端机的设计和应用。

关键词 光学器件; 激光通信; 双光楔; 光束偏转; 光束扫描

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1123001

Design of Laser Communication Optical Transceiver Based on Double Wedge Prisms

Xing Zhenchong^{1,2}, Wang Wei^{1,2*}

¹The 54th Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation,
Shijiazhuang 050011, Hebei, China;

²Hebei Key Laboratory of Photonic Information Technology and Application,
Shijiazhuang 050011, Hebei, China

Abstract With the popularization of laser communication to the platforms with limited load capacity, laser communication system is developing towards lightweight and miniaturization. As a key role of laser communication, the design of scanning and acquisition unit is also need to be lightweight and miniaturized. In this paper, first, the double wedge prisms based scanning and acquisition unit abandons the conventional mechanical servo structure, which realizes beam deflection in large field of view by independently rotating the prisms around the common rotation axis. Then, the beam deflection model and the scanning pattern model of double wedge prisms are established by using non-paraxial ray tracing method, and the scanning mode of the double wedge prisms is analyzed, which provides a certain reference for the development of light and miniaturized laser communication optical transceivers. Finally, the design and application of a kind of light-weighted and miniaturized laser communication optical terminal is proposed and analyzed based on rotating double wedge prisms and quadrant detector multiplexing technology.

Key words optical devices; laser communications; double wedge prisms; beam deflection; beam scanning

1 引言

随着激光在自由空间光通信中的应用,得益于

窄波束激光良好的相干性和方向性,激光通信表现出了安全保密性强、抗截获能力强、抗干扰能力强的特点。激光通信向带载能力有限的轻小型应用

收稿日期: 2021-09-22; 修回日期: 2021-10-19; 录用日期: 2021-10-25

通信作者: *ciomp2015@163.com

平台的推广,使激光通信系统面临着轻量化和小型化设计的挑战。扫描捕获单元通过控制光束偏转对目标可能出现的不确定区域进行扫描,是建立通信链路的基础和前提,激光通信系统的轻量化必然要求扫描捕获单元的轻量化。

常规扫描捕获单元主要采用两轴框架式结构和反射镜式结构,两种结构均需要机械伺服转台的协助实现光束偏转和扫描,系统的体积、质量、功耗较大,无法满足轻量化设计的要求^[1]。近年来,不依赖于机械伺服转台的双光楔棱镜和光学相控阵得到了迅速发展。其中,双光楔棱镜通过绕公共中心轴线的独立旋转实现视轴的偏转和扫描,光学相控阵通过光束相位的电控变化实现视轴的偏转和扫描。相比之下,双光楔棱镜的相关技术和工艺更成熟,是设计轻量化扫描捕获单元的理想选择之一。

国内外关于双光楔棱镜的理论研究集中在光束偏转和光束指向两方面,主要解决双光楔棱镜正向求解和逆向求解问题。关于双光楔棱镜的应用着重光束指向和偏转的物理实现,多用于激光雷

达、装调检测等领域^[2-3]。目前,将旋转双光楔棱镜应用于激光通信的研究以及基于双光楔棱镜扫描捕获系统的讨论相对较少。本文在现有理论研究的基础上,主要讨论了旋转双光楔棱镜在激光通信中的应用,基于非近轴光线追迹理论分析了双光楔棱镜能实现的扫描模式,并设计了一种基于旋转双光楔棱镜的轻量化激光通信光端机。

2 旋转双光楔棱镜扫描系统

2.1 旋转双光楔棱镜物理模型

旋转双光楔棱镜又被称为 Risley 棱镜,自提出以来在理论研究和实际应用中得到了快速发展。双光楔棱镜由两个相距很近的光楔构成,每个棱镜绕公共轴线独立旋转,通过合理设置两个棱镜的角速度和初始相位就能实现特定方向的光束指向和偏转^[4]。根据几何位置关系可将双光楔棱镜大致分为四种组合方式,如图 1 所示。不同组合在光束偏转角度、伺服控制算法、光机结构上的差异较大^[5-8],实验中主要讨论主截面相邻放置的棱镜组合方式。

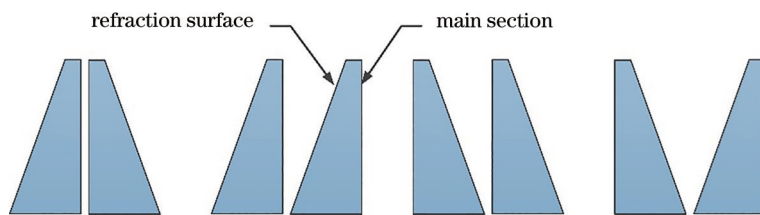


图 1 双光楔棱镜的基本组合方式

Fig. 1 Combination modes of double wedge prisms

双光楔棱镜的楔角和材料折射率固定,因此棱镜对光束的偏转作用也相对固定。假定双光楔棱镜采用完全相同的设计规格,无穷远处光线平行于棱镜的主光轴入射到楔角和折射率分别为 α 和 n 的双光楔棱镜上。由薄棱镜的几何光学理论可知,单光楔的最大偏转角 $\delta = (n - 1)\alpha$,双光楔棱镜的最大偏转角度为 2δ 。平行于光轴入射的光束,旋转双

光楔棱镜可以实现光束在 $0 \sim 2\delta$ 范围内的偏转。由光路可逆原理可知, $0 \sim 2\delta$ 范围内以特定偏转角度入射的光束,会近似平行于光轴的方向出射。

图 2 为计算机辅助光学设计软件模拟的双光楔棱镜光斑分布。采用居中处理消除光线沿主截面的平移,假设靶面尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,双光楔棱镜由两块直径为 30 mm 、楔角为 15° 的棱镜组成,

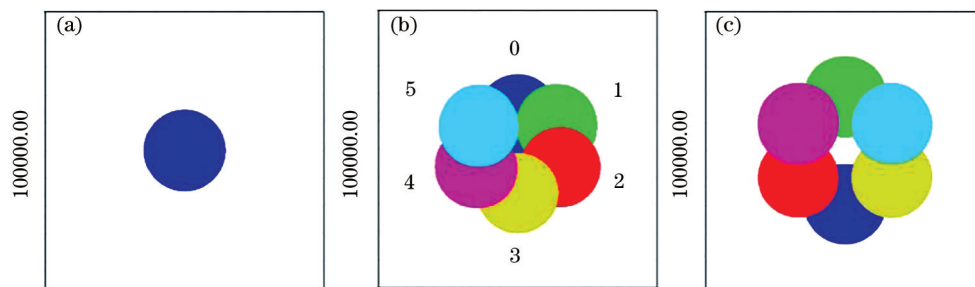


图 2 双光楔棱镜的成像示意图。(a)无旋转;(b)单光楔旋转;(c)双光楔旋转

Fig. 2 Imaging schematic diagram of double wedge prisms. (a) No rotation; (b) single prism rotation; (c) double prisms rotation

玻璃材料的折射率为 1.62, 理论最大光束偏转角为 18.6°, 测试靶面与双光楔棱镜的距离为 50 mm。假定光线平行于光轴以 0° 视场入射, 当双光楔棱镜保持相位差 π 放置时, 成像光斑如图 2(a) 所示, 此时光斑分布在靶面中心附近, 光束不发生偏转; 固定前光楔不变, 后光楔绕着光轴顺时针旋转一周, 每隔 60° 采集的光斑如图 2(b) 所示, 此时, 光束以光轴为起点在 0~2 δ 范围内发生偏转并在编号为 3 的位置达到最大偏转角; 同时旋转前后两个棱镜, 确保两个棱镜保持 2 δ 光束偏转角, 每隔 60° 采集的光斑如图 2(c) 所示, 此时, 光束以最大偏转角围绕光轴对称分布, 光斑覆盖范围优于单光楔旋转。

2.2 旋转双光楔棱镜的光束指向模型

旋转双光楔棱镜的初始相位、旋转速度、相对旋转方向都是可控变量, 建立上述物理参量与光束指向之间的对应关系是双光楔棱镜的重要研究内容。由双光楔棱镜位置参数确定出射光束的偏转方向被称为正向解问题, 由已知光束偏转方向确定双光楔棱镜的旋转角度被称为逆向解问题^[9]。对于逆向解问题, 每个已知偏转角对应的旋转角度组合不唯一^[10-11]。旋转双光楔棱镜的逆向求解比正向求解更复杂, 相应的伺服控制也更复杂, 在实际中用旋转双光楔棱镜对目标进行跟踪更困难。

图 3 为简化的右手坐标系模型。其中, 双光楔棱镜在 xoy 平面, 双光楔主截面绕 z 轴旋转。假定光线平行于 z 轴入射, 经折射后的偏转光束以俯仰角 Φ 出射, 其在观察靶面上的投影与 xoy 平面的夹角 Θ 为方位角。基于光线偏角矢量化, 通常采用一级近轴近似的方法处理正向解问题^[12], 假设 θ_1 和 θ_2 为前后光楔的偏转角度, 一阶近轴近似模式下光束偏转角在 x 轴和 y 轴上的投影可表示为

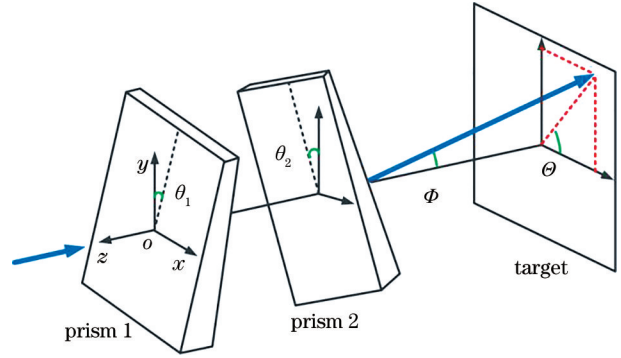


图 3 旋转双光楔棱镜的光线追迹模型

Fig. 3 Ray tracing model of the rotating double wedge prisms

$$\begin{cases} \Phi_x = \tan \delta \cdot \cos \theta_1 + \tan \delta \cdot \cos \theta_2 \\ \Phi_y = \tan \delta \cdot \sin \theta_1 + \tan \delta \cdot \sin \theta_2 \end{cases} \quad (1)$$

尽管一阶近轴近似方法的求解过程较为简单, 但解算出的光束方向和偏转角并不准确, 适用于对解算速度要求较高、解算精度要求较低场合。而基于非近轴光线追迹的分析方法遵从折射定律, 依据光线在各个折射面上的折射和传播建立解算模型, 在大角度偏转下具有较高的解算精度^[13-16]。

假设矢量为 $s_1 = (0, 0, -1)$ 的光线沿右手坐标系的一 z 轴方向入射到前光楔的折射面中心, 前光楔的楔角、旋转角度和折射率分别为 α_1, θ_1, n_1 ; 入射光线在前光楔的折射面发生折射, 并根据折射定律以光线矢量 s_2 出射; 旋转双光楔棱镜的两个主截面相当于平行平板, 光线经平行平板折射后的传播方向不会发生变化, 仅沿主截面方向发生平移; 光线在后光楔的折射面发生折射, 根据折射定律以光线矢量 s_3 出射, 后光楔的楔角、旋转角度和折射率分别为 α_2, θ_2, n_2 。旋转双光楔棱镜的出射光线可以用方向余弦 (α, β, γ) 表示, 即

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

2.3 旋转双光楔棱镜的扫描轨迹模型

激光通信系统按照一定的扫描策略完成对不

确定区域的扫描, 以实现通信目标的捕获。双光楔的扫描速度需要根据驱动机构性能、伺服控制手

段、应用需求协同确定,扫描精度与光束指向模型、系统加工精度、系统装调精度密切相关。依据非近轴近似模型,假设双光楔棱镜采用相同的材料,且初始相位差为 0,角速度旋转均匀,旋转双光楔棱镜可以实现线性扫描、玫瑰线扫描、圆形扫描、螺旋往返式扫描等扫描轨迹和图案^[17-19]。双光楔棱镜采用同向等速旋转可实现圆形扫描轨迹,尽管圆形扫描能够实现不同的轨迹半径,但严重依赖于初始相位差,无法对全视场进行连续扫描。双光楔棱镜采用同向非等速旋转可实现螺旋式扫描轨迹,螺旋扫描不依赖初始相位,能实现全视场的周期性重复扫描,但扫描模式复杂,实用性较差。而双光楔棱镜采用反向等速旋转可实现准线性扫描轨迹(相对于一阶近轴近似的线性扫描而言)。

图 4 为 2π 周期内,相同初始条件下一阶近轴近似法和非近轴光线追迹法出射光束中心光线在 50 mm 外靶标上的轨迹分布。其中,一阶近轴近似采用极简模型,其扫描轨迹为一条直线;非近轴光线追迹模型的最大偏转角优于一阶模型,在 50 mm 距离上轨迹曲线的最高点为 0.2 mm,在 1000 mm 距离上轨迹曲线的最高点仅为 4.0 mm,基本可以忽略不计。

花瓣形扫描模式是目前旋转双光楔棱镜应用中最具实用性和可行性的模式,可通过双光楔棱镜

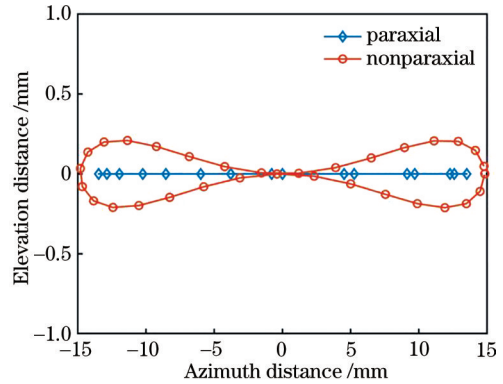


图 4 不同初始相位差下准线性扫描图案

Fig. 4 Linear scanning patterns under different initial phase

的反向非等速旋转实现玫瑰线扫描^[17-19],图 5 为 2π 周期内不同角速度比值 k 对应的出射光束中心光线在 50 mm 外靶标上的轨迹分布。玫瑰线扫描顺序按照图 5(a)中所示顺序生成闭环花瓣,这种生成方式和规律适用于任意数量和密度的花瓣图案。随着角速度比值 k 的变化,玫瑰线的花瓣数量、大小、疏密、周期、重复扫描概率会发生可控变化,玫瑰线扫描的中心轨迹比较密集,边缘轨迹相对稀疏,扫描轨迹在各个方向的分布相对均匀。由于玫瑰线的发散特性,理论上某些角速度比值下的边缘存在严重的漏扫风险,通过合理设置花瓣的数量和疏密可以利用边缘光斑的重叠减小漏扫风险。

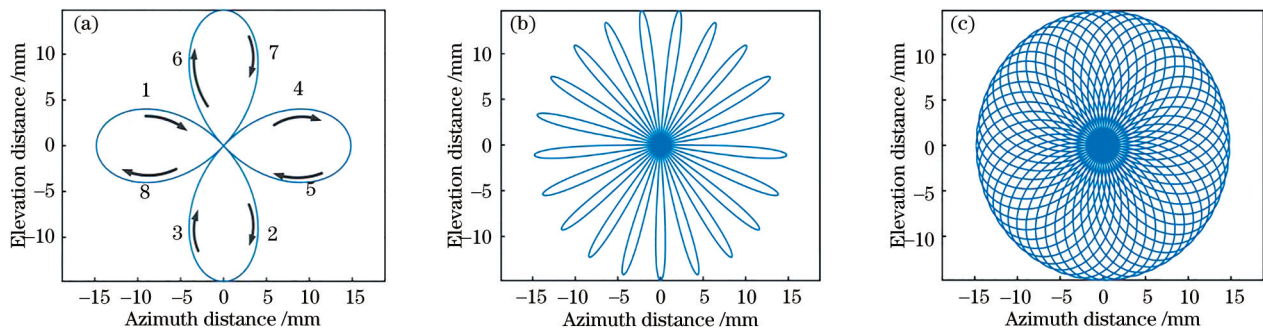


图 5 玫瑰线扫描图案。(a) $k = -3.0$; (b) $k = -3.5$; (c) $k = -4.1$

Fig. 5 Rose line scanning patterns. (a) $k = -3.0$; (b) $k = -3.5$; (c) $k = -4.1$

3 旋转双光楔棱镜在通信中的应用

近年来,旋转双光楔棱镜逐渐应用到无人机和卫星等自由空间无线光通信中,针对轻小型平台中近程激光通信的需求,结合基于四象限探测器的跟踪和通信复用技术,提出了一种利用旋转双光楔棱镜的轻小型激光通信系统。

3.1 系统构成及其工作模式

轻小型激光通信终端如图 6 所示,该系统为双

工系统,同时具备接收和发射功能,由激光发射单元、扫描捕获单元、跟踪接收单元、微控制器四部分组成。其中,发射单元和跟踪接收单元共用光学天线。双光楔棱镜的使用摒弃了常规的机械伺服转台,极大减轻了系统的体积、质量及功耗,同时满足大视场光束偏转和扫描的要求。基于四象限探测器的一体化复用技术将精跟踪功能和通信功能合二为一,削减了不必要的光学支路,有利于系统轻量化设计。

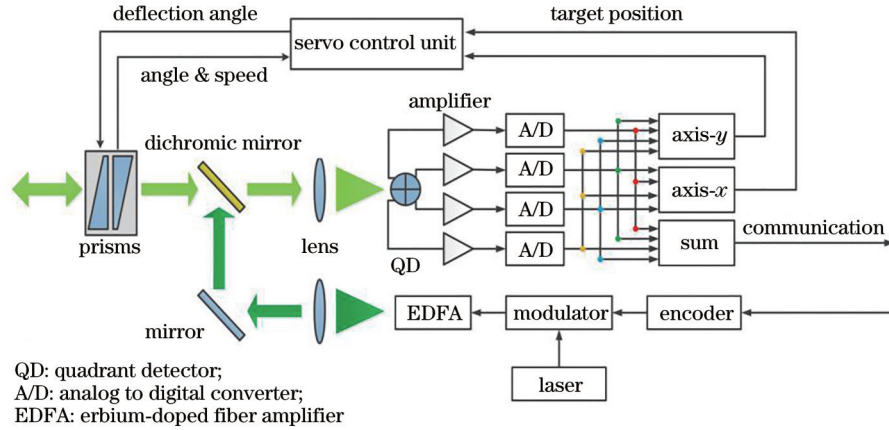


图 6 轻小型激光通信终端示意图

Fig. 6 Schematic diagram of lightweight and miniaturized laser communication terminal

扫描捕获单元依据设定的扫描策略对目标可能出现的区域进行扫描,并将捕获到的目标光信号传递给探测器,同时依据控制单元给定的执行量完成特定角度的光束偏转。跟踪接收单元采用基于四象限探测器的跟踪和通信复用技术,各象限的响应经放大后以模拟信号的形式输出,经过四路模数采样模块转换为数字信号,用于通信的部分进入以加法电路为主的通信解调单元,最终由时钟数据恢复电路获取所传递的信息;用于跟踪定位的部分进入以减法电路为主的跟踪控制单元,分别计算目标在水平和俯仰方向的位置信息并传递给伺服控制单元。伺服控制单元利用非近轴光线追迹模型由目标位置信息解算光束指向角度,结合双光楔实时反馈的角度信息解算双光楔的偏转量并驱动伺服电机运动。

3.2 系统参数分析及链路功率预算

四象限探测器复用技术将捕获跟踪光路和激光通信光路合二为一,链路传输功率可表示为

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot \eta_o \cdot \eta_a \cdot L \cdot L_p \cdot G_r \cdot \eta_o, \quad (3)$$

式中, P_t 和 P_r 分别为发射和接收功率, G_t 和 G_r 分别为光学天线的发射和接收增益, η_o 和 η_a 分别为光学系统和大气介质损耗, L 和 L_p 分别为空间传输损耗和对准失配损耗。

相较于其他波长色光, $1.55 \mu\text{m}$ 波段的色光受大气吸收和散射的影响相对较小,激光器和接收器件的工艺相对成熟、性能相对稳定。为了满足收发光学隔离的要求,通信双方分别采用 $1.54 \mu\text{m}$ 和 $1.56 \mu\text{m}$ 波长激光作为通信光。基于四象限探测器的跟踪和通信复用技术最早由美国海军实验室提出,四象限探测器的通信速率受到通信带宽和靶面尺寸的限制,靶面尺寸越大,通信带宽越窄,通信速

率越低。基于 InGaAs 材料的四象限探测器能响应 $1.55 \mu\text{m}$ 波段,常见的 APD (Avalanche Photodiode) 型 InGaAs 四象限探测器最高可以实现 10 Mbit/s 以上的通信速率,探测灵敏度为 -35 dBm 。

表 1 为 $1.54 \mu\text{m}$ 和 $1.56 \mu\text{m}$ 增益形式激光通信链路的功率预算。可以发现,对于入瞳直径为 20 mm 的激光通信系统,平均功率为 10 mW 的激光以 0.5 mrad 束散角发射,经过 1.0 km 自由空间传输后,APD 型 InGaAs 探测器仍然具有 9 dBm 左右的功率裕量,满足跟踪和通信的要求。

3.3 系统光路分析与设计

四象限探测器由性能相同、互不相关的光电二极管构成,依据光生电流的大小解算光斑质心位置信息。光斑在四象限探测器上通常呈圆形分布,各象限上的输出光功率或光生电流与其接收的光斑面积成正比,光斑在四象限探测器上的质心坐标可表示为

$$\begin{cases} \Delta x = K_x \cdot \frac{(I_A + I_D) - (I_B + I_C)}{I_A + I_B + I_C + I_D} \\ \Delta y = K_y \cdot \frac{(I_A + I_B) - (I_C + I_D)}{I_A + I_B + I_C + I_D} \end{cases}, \quad (4)$$

式中, I_A, I_B, I_C, I_D 分别为四象限探测器四个象限光敏面上产生的光生电流, K_x 和 K_y 分别为 x 轴和 y 轴的检测灵敏度。假设目标光信号沿光轴以角度 $\Delta\theta$ 入射,经焦距为 f' 的光学系统会聚到光敏面上,则目标光信号的偏转角度可表示为

$$\Delta\theta = \arctan \left(\frac{\Delta x^2 + \Delta y^2}{f'^2} \right). \quad (5)$$

现有四象限探测器目标解算方法大多是针对能量均匀分布的光斑设计,通常采用像方远心设计以

表 1 激光通信链路功率预算

Table 1 Power budget of the laser communication link

Parameter	Gain		Note
	1.54 μm	1.56 μm	
Laser emission power		10 dBm	10 mW semiconductor laser
Antenna transmission gain	78.06 dB	78.06 dB	beam divergence angle 0.5 mrad
Antenna efficiency	-3.2 dB	-3.2 dB	optical transmittance 0.7 wavefront aberration $\lambda/10$
Atmospheric loss	-0.11 dB	-0.11 dB	atmosphere transmittance 0.97
Spatial transmission loss	-198.23 dB	-198.12 dB	transmission distance 1.0 km
Alignment mismatch loss	-1.39 dB	-1.39 dB	best match
Antenna receiving gain	92.21 dB	92.10 dB	pupil diameter 20 mm
Antenna efficiency	-3.2 dB	-3.2 dB	optical transmittance 0.7 wavefront aberration $\lambda/10$
Received power	-25.97 dBm	-25.99 dBm	$\sim 1.42 \mu\text{W}$
Detection sensitivity		-35 dBm	bit error rate less than or equal to 10^{-6}
Power margin	9.03 dB	9.01 dB	sufficient power margin

均匀化光照度;为保证四象限探测器的目标定位精度,要求各视场光斑大小保持相对一致,探测器通常使用离焦检测且光斑大小约为靶面的一半。为提高目标捕获效率,降低激光链路的建立时间,设计系统的捕获视场角为 $\pm 0.5^\circ$,实际应用中可适当减小捕获视场角,等效通光孔径为 22 mm;为了兼顾不同靶面的四象限探测器,以靶面直径为 2 mm 的四象限探测器为设计参考。以库克三片镜为初始结构,在光线相对平缓的位置设置滤光片以抑制额外像差的影响;二

向色镜和滤光片采用色散性能优良的 H-FK61 玻璃。优化后的接收光路如图 7(a) 所示:系统光路由四片透镜组成,第一片透镜为窄带滤光片,后三片透镜构成库克光路;最大视场角对应的主光线与像面法线的夹角为 0.53° ,构成准像方远心光路。以靶面直径为 4 mm 的四象限探测器为例,探测器向物方离焦 7 mm,不同视场光束在探测器上的光斑如图 7(b) 所示。可以发现,各视场光斑基本保持一致,弥散斑的直径约为 3 mm,满足系统设计和使用要求。

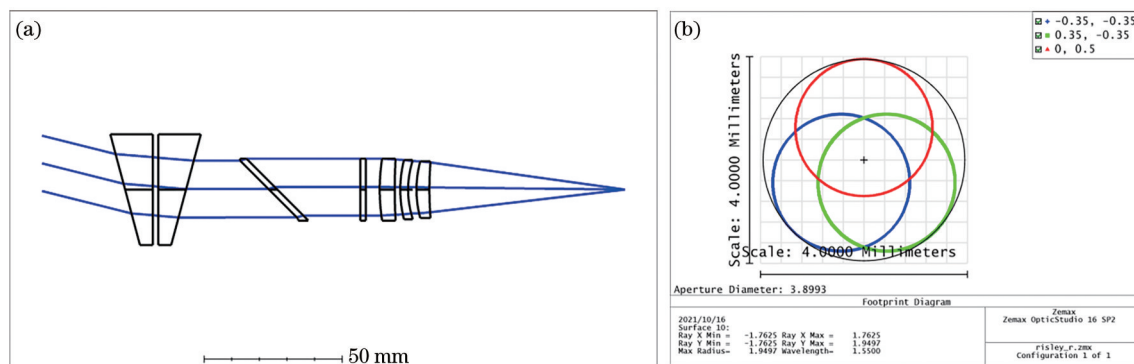


图 7 通信接收光路示意图。(a) 光学系统示意图;(b) 光斑分布图

Fig. 7 Schematic diagram of receiving optical path. (a) Optical system schematic diagram; (b) spots distribution schematic diagram

发射光路如图 8 所示,系统整体由四片透镜组成。其中,第一片为 H-FK61 玻璃材质的窄带滤光片,后三片透镜采用胶合结构,反射镜用于光路转折以减小系统体积。激光发射光源采用半导体激光器,采用单模光纤耦合,数值孔径为 0.14、纤芯直径为 $8 \mu\text{m}$,以近衍射极限角发射。发射光路的波像

差为 $\lambda/10$,基本满足激光通信系统的要求。

在实际工程应用中,光学元件和机械元件加工、集成、装配、调试过程引入的误差会对旋转双光楔棱镜的光束偏转造成影响,最终影响光轴的指向精度^[20]。其中,双光楔棱镜的误差主要来自棱镜的加工误差、折射率误差、主截面装配误差,机械元件

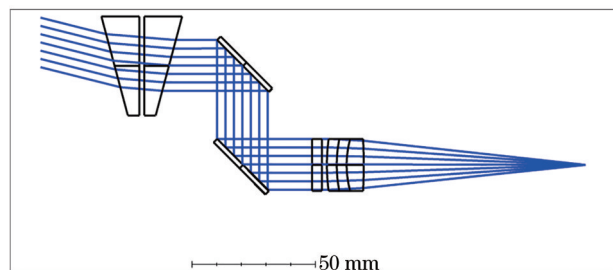


图 8 激光发射光路示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the laser emission optical path

的误差主要来源于轴承、镜座、镜筒等机械元件的加工误差以及装配误差。

4 结 论

针对双光楔棱镜在轻小型激光通信光端机中的应用,依据矢量叠加原理建立了基于一阶近轴近似和非近轴光线追迹的光束偏转指向模型,通过模拟双光楔棱镜的光束偏转效果和光斑分布,分析了不同扫描策略的差异性和适用性。基于非近轴光线追迹模型的扫描方式相对真实地反映了双光楔棱镜的工作状态,通过独立控制旋转角速度和初始相位,采用玫瑰线扫描可以对全视场进行周期性覆盖扫描。最后,结合旋转双光楔棱镜扫描捕获技术和四象限探测器复用技术提出并设计了一种适用于中近程激光通信的轻小型激光通信光端机,并对其工作原理、链路可通性、光学系统进行了详细分析、设计与仿真。系统相关研制工作正在进行中,未来还需要对该设计的实现以及非等速旋转下双光楔棱镜的扫描模式进行深入研究。

参 考 文 献

- [1] 李福巍,张运强,潘国庆. 基于双光楔的双模光学系统设计分析[J]. 航空兵器, 2018, 25(1): 43-46.
Li F W, Zhang Y Q, Pan G Q. Design and analysis of dual-mode optical system based on dual-wedge[J]. Aero Weaponry, 2018, 25(1): 43-46.
- [2] 马杰,余巍,周志伟,等. 双光楔扫描激光成像系统三维动态仿真[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(5): 1218-1224.
Ma J, Yu W, Zhou Z W, et al. 3D dynamic simulation of dual wedge scanning imaging system [J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(5): 1218-1224.
- [3] 洪华杰,周远,陶忠,等. Risley棱镜在光学侦察中的应用[J]. 应用光学, 2014, 35(2): 179-187.
Hong H J, Zhou Y, Tao Z, et al. Application of Risley prism on optical reconnaissance[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(2): 179-187.
- [4] Li A H, Jiang X C, Sun J F, et al. Laser coarse-fine coupling scanning method by steering double prisms [J]. Applied Optics, 2012, 51(3): 356-364.
- [5] Schitea A, Tuef M, Duma V F, et al. Modeling of Risley prisms devices for exact scan patterns[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8789: 878912.
- [6] 李硕丰,徐文东,赵成强. 激光三维成像中双光楔扫描参数的确定及优化[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(8): 20190508.
Li S F, Xu W D, Zhao C Q. Determination and optimization of Risley prisms scanning parameters in laser 3D imaging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(8): 20190508.
- [7] 高飞,王苗. 双光楔光轴指向调整技术[J]. 光电工程, 2018, 45(11): 180218.
Gao F, Wang M. Double optical wedge optical axis pointing adjustment technology[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(11): 180218.
- [8] Yang Y G. Analytic solution of free space optical beam steering using Risley prisms[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(21): 3576-3583.
- [9] 陈丰. 基于Risley棱镜的阵列光束偏转技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2018.
Chen F. Research on beam array deflection technology based on Risley-prisms-array steering system[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [10] Li Y J. Closed form analytical inverse solutions for Risley-prism-based beam steering systems in different configurations[J]. Applied Optics, 2011, 50(22): 4302-4309.
- [11] Li Y J. Third-order theory of the Risley-prism-based beam steering system[J]. Applied Optics, 2011, 50(5): 679-686.
- [12] 张鲁薇,王卫兵,王锐,等. 基于正解过程的Risley棱镜光束指向控制精度分析[J]. 中国光学, 2017, 10(4): 507-513.
Zhang L W, Wang W B, Wang R, et al. Analysis of beam steering control precision for Risley prisms based on forward solution[J]. Chinese Optics, 2017, 10(4): 507-513.
- [13] Zhao Y Y, Yuan Y. First-order approximation error analysis of Risley-prism-based beam directing system [J]. Applied Optics, 2014, 53(34): 8020-8031.
- [14] Lu Y F, Zhou Y, Hei M, et al. Theoretical and experimental determination of steering mechanism

- for Risley prism systems[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(7): 1389-1398.
- [15] 毕雷. 双光楔式 GEO 对地激光通信捕获系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014: 11-13.
- Bi L. The research on double-wedge acquisition system for geo-ground laser communication terminal [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014: 11-13.
- [16] 邱赛. 空间激光通信旋转双棱镜光束指向系统偏差修正方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2020.
- Qiu S. Research on the deviation correction method of beam pointing system of Risley prism in space laser communication[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [17] 曾昊旻, 李松, 张智宇, 等. 车载激光雷达 Risley 棱镜光束扫描系统[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(7): 1444-1450.
- Zeng H M, Li S, Zhang Z Y, et al. Risley-prism-based beam scanning system for mobile lidar[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(7): 1444-1450.
- [18] 秦聪明. 旋转双棱镜快速扫描技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2021: 10-21.
- Qin C M. Research on fast scanning technology of rotating double prism[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2021: 10-21.
- [19] Li A H, Sun W S, Yi W L, et al. Investigation of beam steering performances in rotation Risley-prism scanner[J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 12840-12850.
- [20] 杨克君, 杨振, 张勇, 等. 基于旋转双光楔的像方扫描大视场成像光学系统设计[J]. *飞控与探测*, 2020, 3(6): 43-56.
- Yang K J, Yang Z, Zhang Y, et al. Design of optical system for wide field-of-view imaging with image side scanning technology based on rotary dual-wedge [J]. *Flight Control & Detection*, 2020, 3(6): 43-56.