

相干激光通信光学系统偏振像差研究

杨宇飞^{1,2} 颜昌翔¹ 胡春晖¹ 吴从均¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间三部, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 相干激光通信系统中,光学系统的偏振像差会改变信号光的偏振态,降低信号光与本振光的混频效率。为了定量分析和研究光学系统的偏振特性,提出了三维偏振光线追迹算法。针对大口径相干激光通信检测平台系统,利用该算法对平台的通信系统进行偏振光线追迹,并根据追迹计算所得的偏振变换矩阵,分析了偏振像差对圆偏振信号光偏振态的影响。通过搭建实验平台,验证了平台通信系统的偏振特性。

关键词 光通信; 相干通信; 偏振像差; 三维偏振光线追迹; 保偏

中图分类号 TN929.13 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.1106003

Polarization Aberration Analysis of Coherent Laser Communication System

Yang Yufei^{1,2} Yan Changxiang¹ Hu Chunhui¹ Wu Congjun¹

¹Space Optics Department III, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

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

Abstract In the coherent laser communication systems, the instrumental polarization aberration of the optical system can change the polarization state of the received signals and reduce the heterodyne efficiency between the local oscillator beams and received signals. In order to quantitatively analyze the polarization properties of the optical system, the three-dimensional polarization ray-tracing algorithm is proposed. Based on a large aperture coherent laser communication testing platform system, the polarization ray tracings of the communication channel are performed by means of this algorithm, and the influences of the polarization aberration on the polarization state of the circular polarization signal are discussed according to the calculated polarization transformation matrices. The polarization characteristics of the communication system of the testing platform are verified through the experimental platform.

Key words optical communications; coherent communications; polarization aberration; three-dimensional polarization ray tracing; polarization maintaining

OCIS codes 060.4510; 060.1660; 220.1010; 260.5430; 060.2420

1 引 言

空间激光通信相对于传统的射频通信具有通信频带宽、信息容量大、传输速率高、体积小、重量轻、抗干扰性强和保密性好等特点,这些特点使其成为星间通信的重要发展方向。按照通信体制划分,空间激光通信主要包括直接探测和相干探测两种方式,直接探测的优点是调制和解调容易、设备简单、成本低,缺点是调制方式单一、信息的承载能力受限;相干探测的优点是探测灵敏度高、调制方式灵活、信道选择性好、可实现密

收稿日期: 2016-03-30; 收到修改稿日期: 2016-06-22

基金项目: 国家 863 计划(2011AA12A103)

作者简介: 杨宇飞(1991—),男,博士研究生,主要从事星间相干激光通信光学系统设计方面的研究。

E-mail: yyf2008223@163.com

导师简介: 颜昌翔(1973—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事空间光学遥感技术方面的研究。

E-mail: yancx@ciomp.ac.cn(通信联系人)

集波分复用等^[1-2]。相干探测的核心是实现信号光与本振光的高效混频,已有相关文章分析了信号光与本振光振幅分布对混频效率的影响^[3]以及光学系统波像差对相干混频效率的影响^[4]。但是,要实现信号光与本振光的相干混频,二者的偏振态必须保持一致,因此,严格控制信号光与本振光的偏振态是实现高效混频的前提条件。

在相干激光通信中,信号光是圆偏振光时通信链路能够对终端的姿态旋转产生的信号光偏振方位角的变化进行免疫^[5],但是光学系统的偏振像差会改变信号光的偏振态,使圆偏振光退偏为椭圆偏振光。几乎所有的光学系统都具有偏振像差^[6],偏振像差会影响成像系统的成像质量^[7];在激光雷达偏振成像中,偏振像差会降低目标的偏振度^[8];在激光放大系统中,偏振像差会限制系统隔离比,对系统造成危害^[9]。为了研究在相干激光通信中光学系统对信号光偏振态的影响,本文采用三维偏振光线追迹算法来分析系统的偏振像差,并对激光通信检测平台系统进行了仿真和分析,通过实验测量验证了理论分析的准确性。

2 光学系统的偏振像差

像差描述的是出瞳处的波面与理想均匀振幅、均匀偏振态球面波之间的偏离,像差的主要分类是波像差、切趾像差和偏振像差^[10]。波像差主要研究的是与光程有关的像差,切趾像差是光瞳内的振幅像差,它们都是与偏振无关的像差。这里主要研究光学系统的偏振像差,偏振像差可以分为二向衰减、相位延迟以及倾斜像差等^[6,10]。

二向衰减表征了光学系统的透射率对入射光偏振态的选择性,反映的是不同偏振态的入射光束进入光学系统后其透射率的差异性。根据定义,光学系统二向衰减的大小定义为^[6]

$$D = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad 0 \leq D \leq 1, \quad (1)$$

式中 I_{\max} 和 I_{\min} 分别为光学系统最大和最小透过光强。将最大和最小透过光强对应的入射光的偏振态定义为光学系统的本征偏振态,二向衰减的方向定义为具有最大透射率时入射光的偏振方向^[11]。

相位延迟表征了本征偏振态之间的相对相位差。光学系统自身的偏振特性使其对不同偏振态的光束产生不同的透射相位或反射相位^[10-11]。相位延迟量可定义为

$$\delta = \phi_{\max} - \phi_{\min}, \quad (2)$$

式中 ϕ_{\max} 、 ϕ_{\min} 为光学系统最大、最小本征偏振态的相位。相位延迟的计算要剔除光程差引入的公共相位和坐标变换引入的附加相位^[12-13]。相位延迟的方向定义为具有最小相位延迟时入射光偏振态的方向。

倾斜像差表征了光束在出瞳处的偏振态分布相对于入瞳处偏振态分布的非均匀旋转特性^[10]。在光线追迹时,倾斜像差是光线追迹时局部坐标系的几何变换引入的一种像差,它与入射光场的偏振态无关,且不受光学薄膜属性的影响。

3 三维偏振光线追迹

传统的偏振光线追迹是基于二维琼斯矩阵实现的^[14-15],当系统口径或者数值孔径较小时,在傍轴近似条件下,二维偏振光线追迹可以准确地描述系统的偏振像差。当系统口径或者数值孔径很大时,二维偏振光线追迹不满足近轴近似,不能准确地评价系统的偏振像差^[12-13]。针对大口径激光通信系统,采用三维偏振光线追迹的算法进行分析,在传统的二维偏振追迹基础上,将二维琼斯矩阵扩展为三维琼斯矩阵,扩展后的矩阵加入光线的传播矢量 \mathbf{k} ,在非近轴条件下可以进行偏振光线追迹。

三维偏振光线追迹与光线的传播矢量 \mathbf{k} 、界面的 \mathbf{s} 和 \mathbf{p} 分量以及薄膜属性等参数有关。在两种均匀介质界面处,入射光线的 \mathbf{s} 和 \mathbf{p} 分量在非正入射条件下会发生改变,根据菲涅耳公式,在非正入射时, \mathbf{s} 和 \mathbf{p} 分量的振幅反射率之比和相位差会受入射角度的影响,依次经过各个界面时,入射光线的 \mathbf{s} 和 \mathbf{p} 分量的振幅和相位经多次折射和反射后会发生改变,在系统出瞳处,出射光线的 \mathbf{s} 和 \mathbf{p} 分量的振幅比和相位差将决定光束的偏振态,因此光学系统的偏振像差与光学系统的结构及膜系参数密切相关。

偏振光线在光学系统中传播时,光线在界面上的折反射可以用一个偏振变换矩阵 \mathbf{P}_q 表示,矩阵 \mathbf{P}_q 表

征光学界面对入射光线偏振态的影响。当光线依次经过包含 Q 个界面的光学系统时,在每一个界面 q 处,入射光线的传播矢量 \mathbf{k}_{q-1} 与出射光线的传播矢量 \mathbf{k}_q 以及相应的 s 和 p 分量在该界面上的折反射如图 1 所示,图中传播矢量 \mathbf{k} 及界面 p 、 s 分量满足右手坐标系。

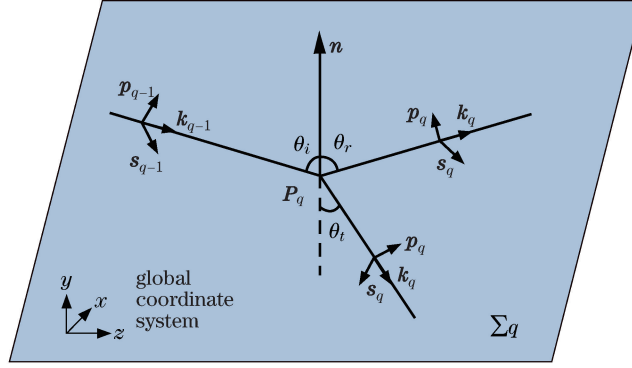


图 1 第 q 光学界面上偏振光线的折反射

Fig. 1 Reflection and refraction of the polarization ray at the q th optical surface

在全局坐标系中,从入瞳面追迹到出瞳面时,可以得到表征光学系统对入射光线的偏振变换矩阵 $\mathbf{P}_{\text{total}}$, 即

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \mathbf{P}_{\text{total}} \cdot \mathbf{E}_{\text{in}}, \quad (3)$$

$$\mathbf{P}_{\text{total}} = \prod_{q=1}^Q \mathbf{P}_q, \quad (4)$$

式中 \mathbf{E}_{in} 和 \mathbf{E}_{out} 分别为入射和出射光线的琼斯矢量, $\mathbf{P}_{\text{total}}$ 为特定入射光线的光学系统偏振变换矩阵, \mathbf{P}_q 为第 q 界面上的偏振变换矩阵,可表示为

$$\mathbf{P}_q = \begin{pmatrix} s_{x,q} & p'_{x,q} & k_{x,q} \\ s_{y,q} & p'_{y,q} & k_{y,q} \\ s_{z,q} & p'_{z,q} & k_{z,q} \end{pmatrix} \mathbf{J}_q \begin{pmatrix} s_{x,q} & s_{y,q} & s_{z,q} \\ p_{x,q} & p_{y,q} & p_{z,q} \\ k_{x,q-1} & k_{y,q-1} & k_{z,q-1} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中 $s_{m,q}$ 、 $p_{m,q}$ 、 $k_{m,q-1}$ ($m=x, y, z$) 为入射光线的 s 、 p 、 k_{q-1} 分量在全局坐标系中的坐标, $s_{n,q}$ 、 $p'_{n,q}$ 、 $k_{n,q}$ ($n=x, y, z$) 为出射光线的 s 、 p' 、 k_q 分量在全局坐标系中的坐标。光线在均匀介质、金属表面以及镀有膜系的界面上折反射时,矩阵 $\mathbf{J}_{t,q}$ 和 $\mathbf{J}_{r,q}$ 分别表示第 q 界面的透射和反射三维琼斯矩阵,可表示为

$$\mathbf{J}_{t,q} = \begin{pmatrix} a_{s,t,q} & 0 & 0 \\ 0 & a_{p,t,q} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{J}_{r,q} = \begin{pmatrix} a_{s,r,q} & 0 & 0 \\ 0 & a_{p,r,q} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

式中下标 s 表示 s 偏振分量, p 表示 p 偏振分量; $a_{s,t,q}$ 和 $a_{p,t,q}$ 为第 q 界面 s 和 p 分量的振幅透射率系数; $a_{s,r,q}$ 和 $a_{p,r,q}$ 为第 q 界面 s 和 p 分量的振幅反射率系数。矩阵中的 1 是为了引入光线的传播矢量,确保偏振变换矩阵 \mathbf{P}_q 与传播矢量 \mathbf{k} 满足

$$\mathbf{P}_q \cdot \mathbf{k}_{q-1} = \mathbf{k}_q. \quad (7)$$

(5)式中,偏振变换矩阵中的 s 和 p 分量满足

$$\mathbf{s}_q = \frac{\mathbf{k}_{q-1} \times \mathbf{k}_q}{|\mathbf{k}_{q-1} \times \mathbf{k}_q|}, \quad \mathbf{p}_q = \mathbf{k}_{q-1} \times \mathbf{s}_q, \quad \mathbf{s}'_q = \mathbf{s}_q, \quad \mathbf{p}'_q = \mathbf{k}_q \times \mathbf{s}_q. \quad (8)$$

对偏振变换矩阵 $\mathbf{P}_{\text{total}}$ 进行奇异值分解,可计算出对应特定入射偏振光线时光学系统的本征偏振态。

$$\mathbf{P}_{\text{total}} = \mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{V}^\dagger = \begin{pmatrix} \mathbf{k}_{x,Q} & \mathbf{u}_{x,1} & \mathbf{u}_{x,2} \\ \mathbf{k}_{y,Q} & \mathbf{u}_{y,1} & \mathbf{u}_{y,2} \\ \mathbf{k}_{z,Q} & \mathbf{u}_{z,1} & \mathbf{u}_{z,2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \Lambda_1 & 0 \\ 0 & 0 & \Lambda_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{k}_{x,0} & \mathbf{k}_{y,0} & \mathbf{k}_{z,0} \\ \mathbf{v}_{x,1} & \mathbf{v}_{y,1} & \mathbf{v}_{z,1} \\ \mathbf{v}_{x,2} & \mathbf{v}_{y,2} & \mathbf{v}_{z,2} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

式中偏振变换矩阵 $\mathbf{P}_{\text{total}}$ 被分解为两个酉矩阵 \mathbf{U} 、 \mathbf{V} 和一个对角阵 \mathbf{D} , 矩阵 \mathbf{V} 满足 $\mathbf{V}^\dagger = (\mathbf{V}^*)^\top$ 。对角阵 \mathbf{D} 包含的 Λ_1 、 Λ_2 ($\Lambda_1 \geq \Lambda_2$) 是偏振变换矩阵 $\mathbf{P}_{\text{total}}$ 的特征值。矩阵中 \mathbf{k}_0 、 \mathbf{k}_Q 表示入射光线的传播矢量 \mathbf{k}_{in} 和经过 Q 次折反射后出射光线的传播矢量 \mathbf{k}_{out} 。 \mathbf{v}_1 、 \mathbf{v}_2 对应入瞳面内光学系统的本征偏振态, \mathbf{u}_1 、 \mathbf{u}_2 对应出瞳面内光

学系统的本征偏振态,它们之间满足

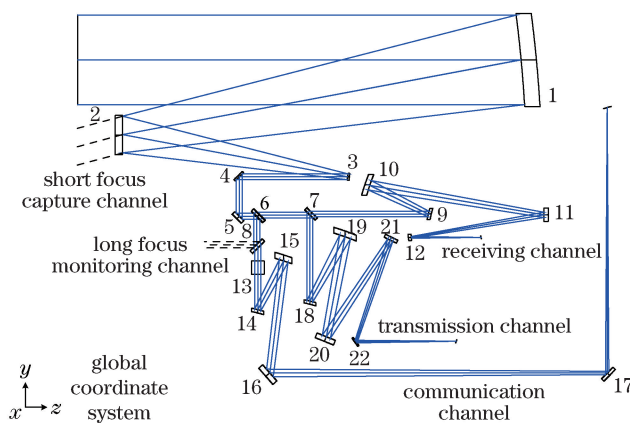
$$\mathbf{P}_{\text{total}} \cdot \mathbf{v}_1 = \Delta_1 \mathbf{u}_1, \mathbf{P}_{\text{total}} \cdot \mathbf{v}_2 = \Delta_2 \mathbf{u}_2, \mathbf{P}_{\text{total}} \cdot \mathbf{k}_0 = \mathbf{k}_Q. \quad (10)$$

利用分解得到的入瞳面或出瞳面内光学系统的本征偏振态,根据二向衰减和相位延迟的定义,可以计算出在入射光线的传播矢量为 \mathbf{k}_{in} 时光学系统的二向衰减和相位延迟量的大小和方向^[12-13]。当入射光线为平行光时,通过对入瞳面进行采样和偏振光线追迹,可以计算出入瞳面内不同光瞳坐标位置处光学系统偏振像差的大小和方向。

4 相干通信系统偏振像差分析

光学系统是相干激光通信系统的重要组成部分,光学系统一般包括望远单元与光学中继单元^[1]。构成光学系统的反射镜、透镜、分束片和滤光片等元件在光线传输时都会产生偏振像差,针对某激光通信检测平台^[16],其光学系统如图 2 所示,利用上述算法分析该光学系统的偏振像差。该平台系统用于测试星间激光通信终端的性能,系统光阑位于主镜 1 上,主镜是一块离轴抛物镜,口径为 500 mm。图中平面折叠镜用来折叠光路,保证整个光学系统布局紧凑。

检测平台包含短焦捕获、光纤接收、光纤发射、通信和长焦监测 5 个支路系统^[16],其中光纤发射和通信支路是偏振敏感系统,检测平台的通信波长是 1550 nm。在建立激光通信链路时,光学系统的视场保持在微弧度的量级,不同视场的入射光线在光学系统中传播时,系统的偏振特性差异非常小,因此只考虑 0° 中心视场。系统中所有反射镜都镀金膜,分束器镀介质分光膜。



2, 6, 7, 8: beam splitter; 13: transmission element; 9, 10, 14, 15, 18, 19: spherical reflector;
11, 12, 16, 17, 20, 21, 22: planar folded mirror

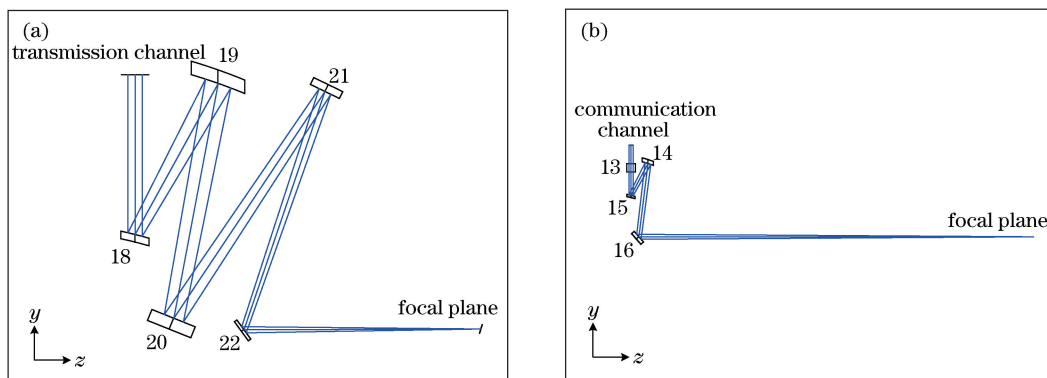
图 2 相干激光通信检测平台系统

Fig. 2 Layout of the coherent laser communication testing platform system

观察发射和通信两支路的光学结构,两支路共用一个望远系统,望远系统由两块离轴的抛物镜和一个分束器组成。通过望远系统的光束在经过折叠镜 4、5 和分束器 6 后,分成了两束光:一束光经过分束器 7 反射构成发射支路,如图 3(a) 所示;另一束光经过分束器 8 透射构成通信支路,为了兼顾后续光路,去掉了折叠镜 17,其光路图如图 3(b) 所示。图 3 中,平行光束的口径为 35 mm,偏振像差在光瞳内的分布差异很小,因此可以忽略会聚光路产生的偏振像差,此时发射支路和通信支路的偏振像差主要由望远系统和分束器中继系统产生,可以只对通信支路进行全系统的偏振像差分析,发射支路与通信支路具有类似的结果。

对通信支路的光学元件建模,各个反射镜和透镜添加膜系属性,在入瞳处对入射平行光进行采样^[17-18],对每条采样光线进行三维偏振光线追迹,计算在出瞳处各条光线的偏振变换矩阵 $\mathbf{P}_{\text{total}}$,通过对矩阵 $\mathbf{P}_{\text{total}}$ 进行分解和变换,分别计算出每条光线的二向衰减和相位延迟的大小和方向。

为了能够直观地研究系统的偏振像差,将系统出瞳处的二向衰减和相位延迟变换到入瞳处,并用不同的线段表示入瞳面内不同位置的偏振像差。在用线段表示二向衰减时,线段的长度表示二向衰减的大小,方向对应为在入瞳处具有最大振幅透射率时入射光的偏振方向。在表示相位延迟量时,线段的长度表示相位延迟量的大小,单位是角度,方向表示在入瞳处具有最小相位延迟时入射光的偏振方向^[6]。根据上述定义,图 4



13: transmission element; 14, 15, 18, 19: spherical reflector; 16, 17, 20, 21, 22: planar folded mirror

图 3 (a) 发射支路; (b) 通信支路

Fig. 3 (a) Layout of the transmission channel; (b) layout of the communication channel

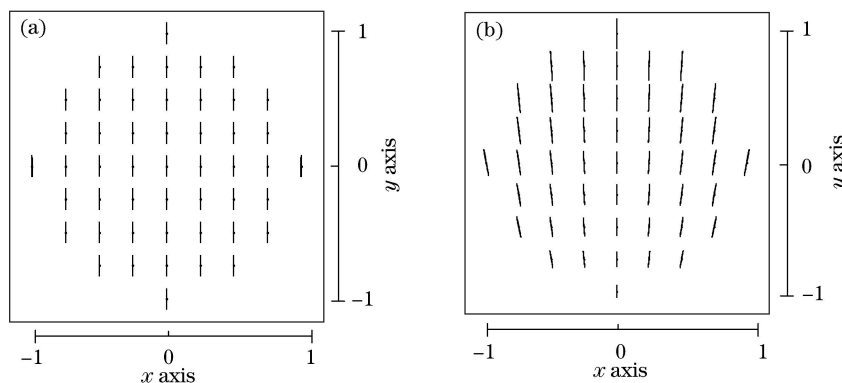


图 4 通信系统的偏振像差。(a) 二向衰减; (b) 相位延迟

Fig. 4 Polarization aberration of the communication system. (a) Diattenuation; (b) phase retardance

给出了通信支路在入瞳处的二向衰减和相位延迟的大小和方向,图中二向衰减和相位延迟的方向是迎着光线观察时,在入瞳面内入射光线的本征偏振态, x 和 y 轴是入瞳面内的坐标轴。

图 4 所示入瞳面内的位置坐标与主镜面的位置相对应。图 4(a)中,二向衰减的大小在光瞳内基本相同,方向基本平行于 y 轴;图 4(b)中,相位延迟量的大小在光瞳内从上往下依次递减,方向关于 x 轴对称;在 $x=0$ 处方向基本平行于 y 轴,越偏离 $x=0$ 时,相位延迟的方向越偏离 y 轴。

偏振像差的变化与光学系统的结构密切相关,检测平台系统是离轴系统,离轴方向在子午面内,相应的偏振像差在光瞳面内关于 y 轴对称。光学系统离轴后,越靠近光轴位置入射的平行光,在光学系统中的入射角度越小,相应的二向衰减和相位延迟量也越小,如图 4 所示,坐标 $(0, -1)$ 处的偏振像差小于 $(0, 1)$ 处的偏振像差,图 4(a)中二向衰减的差异性较小,但图 4(b)中相位延迟量差异性比较明显。表 1 给出光瞳面内 y 轴上不同位置处仿真得到的通信系统的二向衰减和相位延迟量的大小。

表 1 光瞳坐标不同时通信系统的二向衰减和相位延迟

Table 1 Diattenuations and phase retardances of the communication system for different pupil coordinates

Pupil coordinate	$(0, -1)$	$(0, -0.5)$	$(0, 0)$	$(0, 0.5)$	$(0, 1)$
D	0.2971	0.3006	0.3039	0.3069	0.3095
$\delta / (^\circ)$	2.961	4.125	5.232	6.231	7.074

通信支路去掉反射镜 17 时,光线在通信支路共经历 9 次反射,因此入射偏振光的旋向会发生改变,右旋偏振光变为左旋偏振光,左旋偏振光变为右旋偏振光。二向衰减和相位延迟会改变入射光线的偏振态,在通信系统入瞳面内不同口径位置入射圆偏振光时,根据追迹得到的偏振变换矩阵 \mathbf{P}_{total} 和(3)式可以计算出在出瞳面内的出射光线的偏振态。将出瞳处的偏振态变换到入瞳面内,如图 5 所示。图 5 所示的偏振态为迎着光矢量观察时出射光线的偏振态, x 、 y 坐标是入瞳面内的坐标。

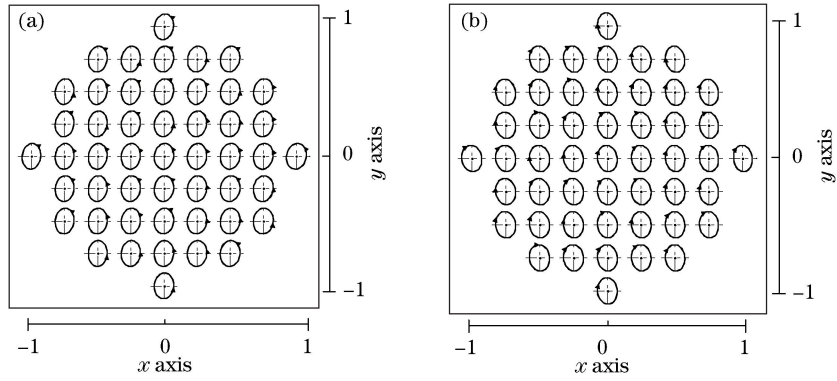


图 5 通信系统出射光偏振态。(a) 入射右旋圆偏振光；(b) 入射左旋圆偏振光

Fig. 5 Output polarization states of the communication system. (a) Right-handed circular polarization; (b) left-handed circular polarization

通常可以用椭圆率 ϵ 和方位角 θ 描述椭圆偏振光。椭圆率 ϵ 为椭圆的短半轴与长半轴的振幅之比,方位角 θ 为椭圆偏振光的长轴方位角。迎着光传播方向,在光线横截面内,以 x 轴为基准,逆时针旋转对应 θ 为正,顺时针旋转对应 θ 为负。针对图 5 所示的椭圆偏振光,表 2 给出与表 1 对应的光瞳坐标下,仿真得到的出射信号光的椭圆率和方位角。

表 2 光瞳坐标不同时的出射光偏振态仿真结果

Table 2 Simulated output polarization states for different pupil coordinates

Input polarization state	Output parameter	Pupil coordinate				
		(0, -1)	(0, -0.5)	(0, 0)	(0, 0.5)	(0, 1)
Right-handed polarization	ϵ_{out}	-0.7329	-0.7271	-0.7209	-0.7147	-0.7090
	$\theta_{out} / (^{\circ})$	85.288	83.572	82.023	80.699	79.638
Left-handed polarization	ϵ_{out}	0.7329	0.7271	0.7209	0.7147	0.7090
	$\theta_{out} / (^{\circ})$	94.712	96.428	97.977	99.301	100.362

根据图 5 和表 2 可以发现,通信支路接收入射的圆偏振光时,信号光会退偏为椭圆偏振光。当平行光入射到光瞳面内不同位置时,通信支路接收到的椭圆偏振光的椭圆率和方位角与入射光的位置有关。当光瞳位置坐标沿 y 轴从(0,1)向(0,-1)移动时,椭圆率 ϵ 的绝对值越来越大,椭圆偏振光越来越接近圆偏振光,这与图 4 和表 1 中偏振像差的分布一致,在图 4 中,光瞳坐标从(0,1)向(0,-1)移动时,二向衰减和相位延迟量的大小逐渐减小;偏振像差越小,像差对信号光偏振态的改变越小,信号光越接近圆偏振光。忽略会聚光路的偏振像差时,发射系统与通信系统具有类似的偏振像差的大小和方向。

5 实验测量

为了验证三维偏振光线追迹算法对系统偏振像差分析的准确性,针对模拟所用的激光通信支路,搭建了一个实验室测量系统,模型图如图 2 所示。该相干激光通信系统检测平台,已经通过干涉仪装调完毕,各个支路的像质满足工程要求。入射的平行光由一个 1550 nm 保偏光纤激光器和一个口径 $\varphi = 80$ mm 的透射式平行光管组成,保偏光纤探头与光管焦点对接,以保证出射光为平行光。采用 Thorlabs 公司的 PAX5710 型号的偏振仪测量入射信号光和通信系统出射光的偏振态。

测量平行光偏振态的光路时,光纤激光器出射光为线偏振光,经光管准直后通过口径 $\varphi = 25.4$ mm 的四分之一波片,调整四分之一波片的快轴角度,用椭偏仪测量光管出射信号光的偏振态,确保信号光是圆偏振光。通信支路偏振测试系统的所有光学元件都固定在气浮平台上,当表示椭圆偏振光方位角时,以气浮平台和标准镜作为全局坐标系。因为波片的口径远小于光管的出射光口径,故光管实际使用的只是中心口径位置,因此可以忽略平行光管引入的偏振像差。假设偏振光在 $\varphi = 25.4$ mm 口径内分布均匀,记录入射左旋和右旋信号光的偏振态。

光学系统固定在平台上,平台平面可认为是光学系统的子午面,入射光管在台面内的左右移动代表在光

瞳内沿 y 轴方向的运动。图 3(b)所示通信支路的后截距非常长,装调中用干涉仪找到通信支路的焦点,将椭偏仪接收器固定在焦点位置,调整入射光管的位置,对应光瞳坐标的 $(0,0)$ 、 $(0,0.5)$ 、 $(0,-0.5)$ 位置,测量出射光的偏振态。PAX5710 型号的偏振仪可以直接给出偏振光的椭圆率和方位角。表 3 给出在上述三个位置入射圆偏振光时,通信系统焦点接收到的信号光的偏振态。

表 3 不同光瞳坐标处实验测量的出射光的偏振态

Table 3 Experimental output polarization states for different pupil coordinates

Input polarization state	Output parameter	Pupil coordinate		
		$(0,-0.5)$	$(0,0)$	$(0,0.5)$
Right-handed polarization	ϵ_{out}	-0.4828	-0.4678	-0.4517
	$\theta_{out}/(^{\circ})$	53.546	51.306	51.590
Left-handed polarization	ϵ_{out}	0.5324	0.5117	0.5028
	$\theta_{out}/(^{\circ})$	-43.259	-42.723	-37.745

当望远镜前方入射光为圆偏振光时,在通信系统焦点处测量出射光为椭圆偏振光。改变入射光管的位置,椭圆偏振光的椭圆率和方位角都发生改变,从 $(0,0.5)$ 到 $(0,-0.5)$ 变化时,出射光椭圆率的绝对值逐渐增大,表明椭圆偏振光接近圆偏振。表 3 与表 2 对比可知,通信系统具有非常大的偏振像差,且像差与光学系统入瞳面内位置的不同有关。因此,检测平台在实际工作过程中,由于待检的激光通信终端口径小于检测平台直径,当待检终端在主镜的不同口径位置进行通信时,系统的相干效率会发生改变。

实际测量的椭圆偏振光的椭圆率和方位角与理论分析计算的结果有一定的差异,这种差异是多方面原因造成的。1)元件位置误差,光学元件在装调过程中以像质最好为基准,实际的位置与理论设计的位置具有一定的差异;2)元件表面的薄膜由于周围环境的影响,与仿真时的膜系有一定的差异。元件的位置误差和薄膜的特性变化都会影响实际偏振光线的传输和改变。测量得到的出射光的椭圆率虽然与理论分析有一定的差异,但是测量的数据结果分析与理论分析是一致的,表明三维偏振光线追迹算法可以较为准确地分析和评价光学系统的偏振像差。在进行光学系统设计时,可以通过分析和优化系统的偏振像差,降低光学系统的偏振特性。在实验测量系统偏振特性时,可以增加对入瞳内不同坐标位置的采样点,计算出系统在整个光瞳面内的偏振像差,完成对整个光学系统偏振像差的分析和标定。

6 结 论

在相干激光通信系统中,光学系统的偏振像差会改变入射光的偏振态。为了定量分析光学系统的偏振像差,基于三维偏振光线追迹算法,针对某相干激光通信系统检测平台,对平台子系统进行偏振像差的分析,分析结果表明,平台的通信系统和发射系统都具有二向衰减和相位延迟像差;在入瞳面内,偏振像差的大小从上至下逐渐递减,且方向关于 y 轴对称。根据追迹的偏振变换矩阵计算出:当圆偏振光进入平台光学系统时,通信系统接收到的信号光会退偏为椭圆偏振光,且椭圆的椭圆率和方位角与入射光的光瞳位置相关。为了验证光学系统的偏振像差特性,搭建了实验室测量系统,对平台通信系统进行偏振测量。实验测量结果与理论分析结果相符,表明采用三维偏振光线追迹分析光学系统的偏振像差是较为准确的。

参 考 文 献

- Jiang Huilin, Tong Shoufeng. 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.
- Wu Congjun, Yan Changxiang, Gao Zhiliang. Overview of space laser communications[J]. Chinese Optics, 2013, 6(5): 670-680.
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.
- Liu Hongzhan, Ji Yuefeng, Xu Nan, *et al.* Effect of amplitude profile difference of signal and local oscillator wave on heterodyne efficiency in the inter-satellite coherent optical communication system[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1006001.
刘宏展, 纪越峰, 许楠, 等. 信号与本振光振幅分布对星间相干光通信系统混频效率的影响[J]. 光学学报, 2011, 31

- (10): 1006001.
- 4 Xiang Jingsong, Pan Lechun. Heterodyne efficiency and the effects of aberration for space coherent optical communication [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(11): 53-57.
向劲松, 潘乐春. 空间相干光通信外差效率及天线像差的影响[J]. *光电工程*, 2009, 36(11): 53-57.
 - 5 Böhmer K, Gregory M, Heine F, *et al.* Laser communication terminals for the European data relay system[C]. SPIE, 2012, 8246: 82460D.
 - 6 Chipman R A. Polarization aberrations[D]. Arizona: University of Arizona, 1987.
 - 7 Pang Wubin, Cen Zhaofeng, Li Xiaotong, *et al.* The effect of polarization light on optical imaging system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(23): 234202.
庞武斌, 岑兆丰, 李晓彤, 等. 偏振对光学系统成像质量的影响[J]. *物理学报*, 2012, 61(23): 234202.
 - 8 Lu Xiaomei, Jiang Yuesong, Rao Wenhui. Polarization analysis of the Cassegrain telescope used for the lidar polarization active imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(10): 1771-1774.
路小梅, 江月松, 饶文辉. 激光雷达偏振成像遥感的望远镜系统偏振分析[J]. *光学学报*, 2007, 27(10): 1771-1774.
 - 9 Wen Jing, Zhang Xin, Zhou Wei, *et al.* Research on isolation ratio limit induced by depolarization in Shenguang-III laser facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(12): 3197-3200.
温 静, 张 鑫, 周 维, 等. 神光 III 中退偏现象对系统隔离比的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(12): 3197-3200.
 - 10 Yun G, Crabtree K, Chipman R A. Skew aberration: a form of polarization aberration[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(20): 4062-4064.
 - 11 Lam W S T, Chipman R. Balancing polarization aberrations in crossed fold mirrors[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(11): 3236-3245.
 - 12 Yun G, Crabtree K, Chipman R A. Three-dimensional polarization ray-tracing calculus I: definition and diattenuation[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(18): 2855-2865.
 - 13 Yun G, McClain S C, Chipman R A. Three-dimensional polarization ray-tracing calculus II: retardance[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(18): 2866-2874.
 - 14 McGuire J P, Chipman R A. Polarization aberrations. 1. Rotationally symmetric optical systems[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(22): 5080-5100.
 - 15 McGuire J P, Chipman R A. Polarization aberrations. 2. Tilted and decentered optical systems [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(22): 5101-5107.
 - 16 Wu Congjun. Study of inter-satellite laser communication terminals and its laboratory testing platform's optical system [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
吴从均. 星间激光通信终端及其实验室检测平台光学系统研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
 - 17 Waluschka E, Pedersen T R, McNamara P. Polarization considerations for the laser interferometer space antenna [C]. SPIE, 2005, 5875: 587505.
 - 18 Atwood J, Skidmore W, Anupama G C, *et al.* Polarimetric analysis of the Thirty Meter Telescope (TMT) for modeling instrumental polarization characteristics[C]. SPIE, 2014, 9150: 915013.