

库德式激光通信终端偏振态传输特性分析

江 伦^{1,2} 王 超^{1,2} 安 岩^{1,2} 刘 壮^{1,2} 李英超^{1,2} 张立中^{1,2}

¹长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室, 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 建立了库德式激光通信终端的几何模型,利用三维偏振态追迹算法对其偏振态传输特性进行分析,得出系统偏振态传输矩阵,建立库德式激光通信终端方位、俯仰角与其偏振消光比、相位延迟角的关系。对出射信号光的偏振态进行了数值仿真,结果表明,库德式激光通信终端出射信号光偏振态与终端方位、俯仰角有密切联系,为相干空间激光通信系统的偏振态实时控制提供了参考。

关键词 光通信; 激光通信; 偏振态; 传输特性

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.110603

Polarization State Transfer Characteristics Analysis of Coude Type Laser Communication Terminal

Jiang Lun^{1,2} Wang Chao^{1,2} An Yan^{1,2} Liu Zhuang^{1,2} Li Yingchao^{1,2} Zhang Lizhong^{1,2}

¹Fundamental Science on Space-Ground Laser Communication Technology Laboratory, 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

Abstract A geometric model of Coude type laser communication terminal is established. Its polarization state transfer characteristics are analyzed by using three-dimensional polarization state tracking algorithm. The system polarization state transfer matrix is obtained, and the relationship between azimuth, elevation angle and polarization extinction ratio, phase delay angle of Coude type laser communication terminal is established. Numerical simulation is carried out on polarization state of the output signal light. Results show that the output signal polarization state of Coude type laser communication terminal is closely related to the terminal azimuth and elevation angle, which provides a reference for real-time control of polarization state in coherent space laser communication system.

Key words optical communications; laser communication; polarization state; transfer characteristics

OCIS codes 060.4510; 060.2605; 260.5430

1 引 言

空间激光通信具有通信速率高、抗干扰能力强和终端轻小型化的优点,目前处于向工程化、应用化方向发展的阶段。美国、德国等世界航天大国已在此领域开展了较为深入的研究,开展了一系列地面和在轨演示验证实验^[1-7]。相干空间激光通信具有较高的探测灵敏度,是主要发展方向之一^[8-11],欧洲的“数据中继计划”采用零差相干探测于2014年10月16日建立高轨道卫星-低轨道卫星(GEO-LEO)激光通信链路,通信速率达1.8 Gb/s,通信距离为 4.2×10^4 km。经过充分的技术实验后于2016年1月30日发射了首颗商业GEO激光通信卫星,以打造高速信息传输骨干网。

收稿日期: 2016-08-05; **收到修改稿日期:** 2016-08-10; **网络出版日期:** 2016-10-21

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(91338116)、吉林省教育厅青年基金(吉教科自合[2016]366号)

作者简介: 江 伦(1984—),男,博士,讲师,主要从事光学系统设计、空间激光通信方面的研究。

E-mail: jlciomp@163.com

相干光探测系统要求信号光与本振光有相同或相近的偏振方向,才能实现信号光与本振光的高效混频,充分发挥相干光通信高灵敏度的优势^[12]。系统中本振光偏振态可保持恒定,信号光若以圆偏振态传播时不受大气湍流、散射的影响,以圆偏振态达到接收端^[13]。但常用的激光通信终端伺服结构,如单反射镜扫摆结构、潜望式周扫结构、库德式结构中均存在反射镜相对运动,系统中的反射镜相对运动会改变发射和接收信号光的偏振态,使得出射信号光不能始终以圆偏振态出射,接收信号光不能始终以 45° 线偏振光进入空间光混频器,导致系统性能下降。

目前分析光学系统中运动反射镜导致信号光偏振态改变的文献或报道较少。Yang 等^[14]分析了潜望式扫描机构对信号光偏振态的影响,通过三维偏振光线追迹算法得到信号光偏振态与扫描机构俯仰角、方位角的关系。Jofre 等^[15]通过电动偏振控制器补偿检流计扫描反射镜运动造成的偏振态变化,使出射光偏振态保持恒定。Anzolin 等^[16-17]分别研究了检流计扫描机构和方位天空扫描机构等对入射光偏振态的改变情况。目前没有关于激光通信地面站库德式扫描机构对信号光偏振态变化分析的研究报道。本文以库德式激光通信地面站为研究对象,针对库德光路中反射镜相对运动造成的信号光偏振态变化的问题,建立了其几何模型,利用三维偏振态追迹算法对其偏振态传输特性进行分析,得出系统偏振态传输矩阵,建立库德式激光通信终端方位、俯仰角与其偏振消光比、相位延迟角的关系,仿真了出射信号光的偏振态,为相干空间激光通信系统中的偏振态实时控制提供了参考。

2 库德式激光通信终端几何模型

库德式激光通信终端通常含反射式望远单元,该部分对信号光偏振态的影响是固定不变的,与激光通信终端方位、俯仰运动无关,故在此模型中不考虑望远单元。库德式激光通信终端几何模型如图 1 所示,俯仰轴系为 C1,方位轴系为 C2, M1、M2、M3 和 M4 为平面反射镜,其中方位轴系 C1 控制 M1、M2、M3 的运动,俯仰轴系 C2 控制 M4 的转动。系统中全局坐标为 $O(x, y, z)$,局部坐标有 5 个,其中 $O_1(x_1, y_1, z_1)$ 为入射光局部坐标, $O_5(x_5, y_5, z_5)$ 为出射光局部坐标,分析中认为两轴系绝对垂直,且在转动过程中无回转误差。M1 使光束在 $y_2 - z_2$ 平面内转动, M4 使光束在 $x_5 - z_5$ 平面内转动,两反射镜的旋转角均以零位为基准, M1、M4 处于零位时其反射镜面法线方向的全局坐标分别为 $\left(-\frac{\sqrt{2}}{2}, 0, \frac{\sqrt{2}}{2}\right)$ 、 $\left(-\frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2}, 0\right)$, 镜面法线方向是指垂直于镜面指向光束的传输方向。系统零位时入射光束方向为 $\mathbf{k}_{in} = [0, 0, 1]$, 出射光束方向为 $\mathbf{k}_{out} = [0, -1, 0]$ 。

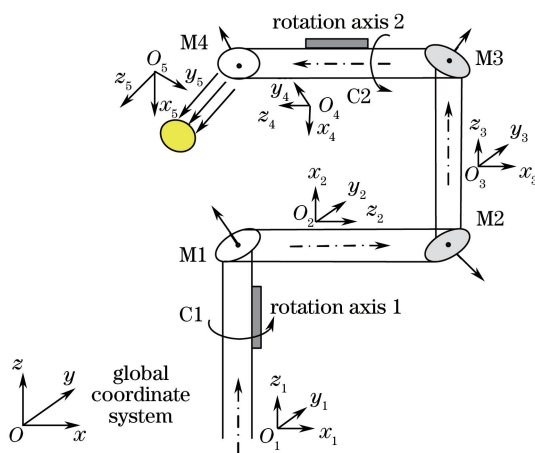


图 1 库德式激光通信终端几何模型

Fig. 1 Geometric model of Coude type laser communication terminal

定义俯仰和方位轴系均为右手坐标系,系统方位角、俯仰角分别为 α 、 β 。M1 和 M4 处于零位时 $\alpha = \beta = 0^\circ$, 出射信号光方向为 $[0, -1, 0]$; 当系统处于 $\alpha = 0^\circ$ 、 $\beta = -90^\circ$ 时, 对应出射信号光方向为 $[0, 0, 1]$ 。

系统出射信号光方向与 α 和 β 相关, M1、M2、M3、M4 的法线方向与 α 、 β 的关系分别为

$$\mathbf{n}_{M1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -\sin \alpha \\ -\cos \alpha \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{n}_{M2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \\ -1 \end{bmatrix}, \mathbf{n}_{M3} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{n}_{M4} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -\cos \alpha + \sin \alpha \cos \beta \\ \sin \alpha + \cos \alpha \cos \beta \\ \sin \beta \end{bmatrix}. \quad (1)$$

反射镜的反射矩阵与其法线方向 $\mathbf{n} = [n_x, n_y, n_z]$ 的关系为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 - 2n_x^2 & -2n_x n_y & -2n_x n_z \\ -2n_x n_y & 1 - 2n_y^2 & -2n_y n_z \\ -2n_x n_z & -2n_y n_z & 1 - 2n_z^2 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

根据(1)、(2)式,可分别得出各反射镜的反射矩阵 $\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \mathbf{H}_3, \mathbf{H}_4$, 库德光路总的传输矩阵为 $\mathbf{H} = \mathbf{H}_4 \mathbf{H}_3 \mathbf{H}_2 \mathbf{H}_1$, 出射光束传输方向 \mathbf{k}_{out} 与入射光束传输方向 \mathbf{k}_{in} 的关系为

$$\mathbf{k}_{\text{out}} = \mathbf{H} \mathbf{k}_{\text{in}}. \quad (3)$$

如图 1 所示, $\mathbf{k}_{\text{in}} = [0, 0, 1]$, 其经过 M1、M2、M3 反射后的出射光光束方向分别为

$$\mathbf{k}_1 = \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{k}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{k}_3 = \begin{bmatrix} -\cos \alpha \\ -\sin \alpha \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

经 M4 反射后系统最终出射光束方向为

$$\mathbf{k}_{\text{out}} = \begin{bmatrix} \sin \alpha \cos \beta \\ -\cos \alpha \cos \beta \\ -\sin \beta \end{bmatrix}. \quad (5)$$

3 三维偏振态追迹算法

Yun 等^[18-19]提出了三维偏振态追迹算法,可用于分析偏振光通过光学系统时偏振态的变化,包括消光比变化、相位延迟等。算法中光学系统的偏振态变化可看成是光经过多次折射、反射面的叠加,系统偏振态传输矩阵 $\mathbf{P}_{\text{total}}$ 是每个光学表面偏振态传输矩阵的乘积,该算法中偏振态矢量以全局坐标为基准,偏振态传输矩阵 \mathbf{P} 与入射光方向、光学表面材料相关。光经反射镜反射后,s 光与 p 光存在矢量差和相位差,s、p 光的电矢量方向与入射光方向、反射镜法线方向相关,可表示为

$$\mathbf{s}_q = \frac{\mathbf{k}_{q-1} \times \mathbf{k}_q}{|\mathbf{k}_{q-1} \times \mathbf{k}_q|}, \mathbf{p}_q = \mathbf{k}_{q-1} \times \mathbf{s}_q, \mathbf{s}'_q = \mathbf{s}_q, \mathbf{p}'_q = \mathbf{k}_q \times \mathbf{s}_q, \quad (6)$$

式中 q 为反射镜个数。

根据以上定义,经 M1、M2、M3、M4 反射后 s、p 光的电矢量方程分别为

$$\mathbf{s}_1 = \mathbf{s}'_1 = [-\sin \alpha \quad \cos \alpha \quad 0]^T, \mathbf{p}_1 = [-\cos \alpha \quad -\sin \alpha \quad 0]^T, \mathbf{p}'_1 = [0 \quad 0 \quad 1]^T, \quad (7)$$

$$\mathbf{s}_2 = \mathbf{s}'_2 = [\sin \alpha \quad -\cos \alpha \quad 0]^T, \mathbf{p}_2 = [0 \quad 0 \quad -1]^T, \mathbf{p}'_2 = [\cos \alpha \quad \sin \alpha \quad 0]^T, \quad (8)$$

$$\mathbf{s}_3 = \mathbf{s}'_3 = [\sin \alpha \quad -\cos \alpha \quad 0]^T, \mathbf{p}_3 = [\cos \alpha \quad \sin \alpha \quad 0]^T, \mathbf{p}'_3 = [0 \quad 0 \quad 1]^T, \quad (9)$$

$$\mathbf{s}_4 = \mathbf{s}'_4 = [\sin \alpha \sin \beta \quad -\cos \alpha \sin \beta \quad \cos \beta]^T, \mathbf{p}_4 = [-\sin \alpha \cos \beta \quad \cos \alpha \cos \beta \quad -\sin \beta]^T, \quad (10)$$

$$\mathbf{p}'_4 = [-\cos \alpha \quad -\sin \alpha \quad 0]^T.$$

根据文献[18-19],反射镜偏振态传输矩阵为

$$\mathbf{P}_q = \begin{bmatrix} s_{x,q} & p'_{x,q} & k_{x,q} \\ s_{y,q} & p'_{y,q} & k_{y,q} \\ s_{z,q} & p'_{z,q} & k_{z,q} \end{bmatrix} \mathbf{J}_q \begin{bmatrix} s_{x,q} & s_{y,q} & s_{z,q} \\ p_{x,q} & p_{y,q} & p_{z,q} \\ k_{x,q-1} & k_{y,q-1} & k_{z,q-1} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\mathbf{J}_q = \begin{bmatrix} r_{s,q} & 0 & 0 \\ 0 & r_{p,q} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中 $r_{s,q}, r_{p,q}$ 分别为第 q 块反射镜对 s、p 光的菲涅耳反射系数。根据上述定义,每块反射镜的传输矩阵依次为

$$\begin{aligned}
 \mathbf{p}_1 &= \begin{bmatrix} r_s \sin^2 \alpha & r_s \sin \alpha \cos \alpha & \cos \alpha \\ -r_s \sin \alpha \cos \alpha & r_s \cos^2 \alpha & \sin \alpha \\ -r_p \cos \alpha & -r_p \sin \alpha & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{p}_2 = \begin{bmatrix} r_s \sin^2 \alpha & -r_s \sin \alpha \cos \alpha & -r_p \cos \alpha \\ -r_s \sin \alpha \cos \alpha & r_s \cos^2 \alpha & -r_p \sin \alpha \\ \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{p}_3 &= \begin{bmatrix} r_s \sin^2 \alpha & -r_s \sin \alpha \cos \alpha & -\cos \alpha \\ -r_p \cos^2 \alpha & r_s \cos^2 \alpha & -\sin \alpha \\ r_p \cos \alpha & r_p \sin \alpha & 0 \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{p}_4 &= \begin{bmatrix} r_s \Gamma_1^2 + r_p \Gamma_2 \cos \alpha - \Gamma_2 \cos \alpha & -r_s \Gamma_1 \Gamma_3 - r_p \Gamma_4 \cos \alpha - \Gamma_2 \sin \alpha & -r_s \Gamma_2 \sin \beta - r_p \Gamma_3 \\ -r_s \Gamma_1 \Gamma_3 + r_p \Gamma_2 \sin \alpha + \Gamma_4 \cos \alpha & r_s \Gamma_3^2 - r_p \Gamma_2 \cos \alpha + \Gamma_2 \cos \alpha & -r_s \Gamma_4 \sin \beta - r_p \Gamma_1 \\ -r_s \Gamma_1 \cos \beta - \Gamma_3 & -r_s \Gamma_4 \sin \beta + \Gamma_1 & r_s \cos^2 \beta \end{bmatrix}, \quad (13)
 \end{aligned}$$

式中 $\Gamma_1 = \sin \alpha \sin \beta$, $\Gamma_2 = \sin \alpha \cos \beta$, $\Gamma_3 = \cos \alpha \sin \beta$, $\Gamma_4 = \cos \alpha \cos \beta$.

库德系统的偏振态传输矩阵 $\mathbf{P}_{\text{total}}$ 与经库德系统后的信号光偏振态分别为

$$\mathbf{P}_{\text{total}} = \mathbf{P}_4 \mathbf{P}_3 \mathbf{P}_2 \mathbf{P}_1, \quad (14)$$

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \mathbf{P}_{\text{total}} \mathbf{E}_{\text{in}}, \quad (15)$$

得出的 \mathbf{E}_{out} 是在全局坐标下的表达式,但偏振态仅在出射面的局部坐标下描述,为此需进行修正,表示为

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \mathbf{M}_{\text{total}} \mathbf{E}_{\text{in}}, \quad (16)$$

式中 $\mathbf{M}_{\text{total}} = \mathbf{Q}_{\text{total}}^{-1} \mathbf{P}_{\text{total}}$, 其中 $\mathbf{Q}_{\text{total}}^{-1}$ 是系统中坐标变换的逆,详细算法见文献[18]。(16)式使得出射光与入射光局部坐标系一致,故得到的 \mathbf{E}_{out} 可在入射光局部坐标下进行描述。

4 偏振态数值仿真

库德式激光通信终端的相位延迟、偏振消光比随终端方位角、俯仰角的不同而变化,同时会改变出射信号光的偏振态。偏振消光比是描述不同偏振方向的线偏振信号光通过光学系统的光强差异,其定义为

$$D = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}, 0 \leq D \leq 1, \quad (17)$$

式中 I_{max} , I_{min} 分别表示任意偏振方向的线偏振态信号光通过光学系统的最大、最小光强。相位延迟是指系统对 s、p 光的相位差,上述 2 个关键值均可通过 $\mathbf{P}_{\text{total}}$ 算出,详细算法见文献[18-19]。

对库德式激光通信终端偏振态传输特性进行数值仿真,反射镜镀金属银膜,信号光波长为 1550 nm, 45° 入射角下银膜对该波长 s、p 分量的反射系数分别为 $r_s = 0.9939 \exp(3.0114i)$ 、 $r_p = 0.9878 \exp(-0.2604i)$, 将反射系数代入(13)、(14)式,则 $\mathbf{P}_{\text{total}}$ 为 α 和 β 的函数,随着系统做方位、俯仰运动,系统偏振态消光比和相位延迟角随之改变,系统出射信号光的偏振态也随之改变。表 1 列出系统 6 组 (α, β) 对应的 \mathbf{k}_{out} 、 $\mathbf{P}_{\text{total}}$ 值。

表 1 不同 (α, β) 对应的 \mathbf{k}_{out} 、 $\mathbf{P}_{\text{total}}$ 值

Table 1 Values of \mathbf{k}_{out} , $\mathbf{P}_{\text{total}}$ with different (α, β)

(α, β)	\mathbf{k}_{out}	$\mathbf{P}_{\text{total}}$
$(0^\circ, 0^\circ)$	$\begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0.7715 - 0.5877i & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -0.5869 + 0.7571i & 0 & 0 \end{bmatrix}$
$(45^\circ, 0^\circ)$	$\begin{bmatrix} 0.707 \\ -0.707 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.3857 + 0.2938i & 0.3857 - 0.2938i & 0.7071 \\ -0.3857 + 0.2938i & 0.3857 - 0.2938i & -0.7071 \\ -0.415 + 0.5354i & -0.4150 + 0.5354i & 0 \end{bmatrix}$
$(45^\circ, -90^\circ)$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.6636 - 0.6537i & -0.1829 - 0.1682i & 0 \\ -0.1829 - 0.1682i & 0.6636 - 0.6537i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
$(70^\circ, -90^\circ)$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.8037 - 0.5249i & -0.1176 - 0.1081i & 0 \\ -0.1176 - 0.1081i & 0.5234 - 0.7825i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

(α, β)	k_{out}	P_{total}
$(100^\circ, -75^\circ)$	$\begin{bmatrix} 0.2549 \\ 0.0449 \\ 0.9659 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.7890-0.4569i & 0.2040-0.1299i & 0.2549 \\ -0.1424+0.2115i & 0.4650-0.7899i & 0.0449 \\ -0.2016+0.1107i & -0.0755+0.0710i & 0.9659 \end{bmatrix}$
$(145^\circ, -120^\circ)$	$\begin{bmatrix} -0.2868 \\ -0.4096 \\ 0.866 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.4263-0.6134i & -0.2397+0.4684i & -0.2868 \\ 0.4001-0.1533i & 0.6248-0.4625i & -0.4096 \\ -0.3304-0.2756i & 0.2161-0.0636i & 0.866 \end{bmatrix}$

根据文献[18-19]的详细算法,分别算出 6 组 (α, β) 下的信号光通过库德光学终端的偏振消光比 D 、相位延迟角 δ ,如表 2 所示,表中 θ_D 、 θ_δ 分别表示偏振消光比 D 、相位延迟角 δ 的长轴取向, ϵ_D 、 ϵ_δ 分别表示偏振消光比 D 、相位延迟角 δ 的椭圆率。 D 的长轴取向与系统透射率最大的偏振态取向一致,银膜对 s 光反射率比 p 光反射率高,故其长轴取向 θ_D 与 s 光取向一致; δ 长轴取向与系统相位延迟最小的偏振态取向一致,银膜对 p 光相位延迟比 s 光相位延迟高,故其长轴取向 θ_δ 与 p 光取向一致。

表 2 不同 (α, β) 对应的 D 、 δ 值Table 2 Values of D, δ with different (α, β)

(α, β)	D			δ		
	D_{total}	ϵ_D	θ_D	δ_{total}	ϵ_δ	θ_δ
$(0^\circ, 0^\circ)$	0.0123	0	0	14.9207	0	90
$(45^\circ, 0^\circ)$	0.0123	0	135	14.9207	0	45
$(45^\circ, -90^\circ)$	0.0246	0	45	29.8413	0	135
$(70^\circ, -90^\circ)$	0.0246	0	20.1	29.8413	0	110.1
$(100^\circ, -75^\circ)$	0.024	0.0252	103.7	29.0790	0.0126	13.7
$(145^\circ, -120^\circ)$	0.0222	0.0468	138.18	26.8888	0.0234	48.18

库德式激光通信地面站方位运动范围为 $[0^\circ, 360^\circ]$,俯仰方向运动范围为 $[0^\circ, -180^\circ]$,对地面站工作工程中的所有方位、俯仰角的偏振态传输特性进行了仿真分析,其仿真结果如图 2 所示。由仿真结果可知,库德式地面终端偏振消光比、相位延迟角与方位角无关,仅受俯仰运动的影响。系统俯仰角为 -90° 时,其偏振消光达到最大值 0.0246,相位延迟角达到最大值 29.8413°;系统俯仰角为 0° 和 -180° 时,其偏振消光达到最小值 0.0123,相位延迟角达到最小值 14.9207°。

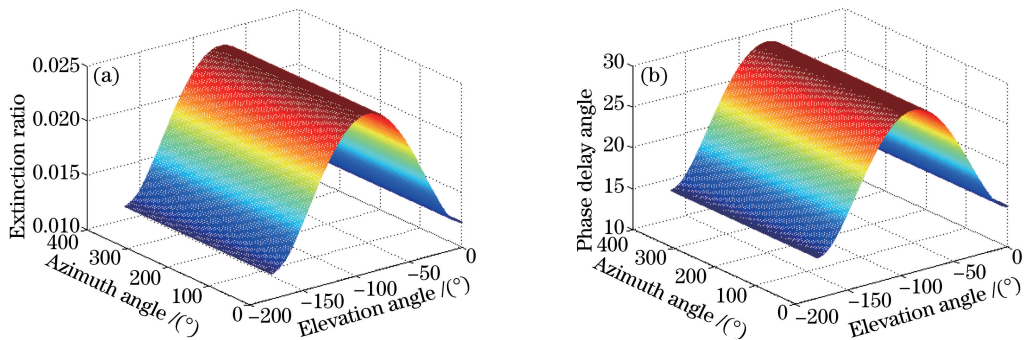


图 2 偏振态传输特性变化曲线。(a)偏振消光比;(b)相位延迟角

Fig. 2 Varying curves of polarization state transfer characteristics. (a) Polarization extinction ratio; (b) phase delay angle

对库德式激光通信终端在 6 组方位、俯仰角出射信号光的偏振态进行仿真。假设入射光为左旋圆偏振光,其三维琼斯矩阵为 $E_{in} = [0.707, 0.707i, 0]$,代入(16)式可得到出射光的三维琼斯矩阵,其最终计算结果如图 3 所示。图中每一幅子图代表一组俯仰、方位角对应的出射信号光偏振态,子图中用多个小椭圆代表子孔径光束,系统中光束为平行光束,故各子孔径光束偏振态变化情况一致。图中 ϵ 代表椭圆偏振光的椭圆率, θ 代表椭圆偏振光的长轴取向,其中 $\epsilon = 1$ 代表圆偏振光, $\epsilon = 0$ 代表线偏振光,6 组仿真结果中 ϵ 均大于 0,表明出射信号光为左旋椭圆偏振光。

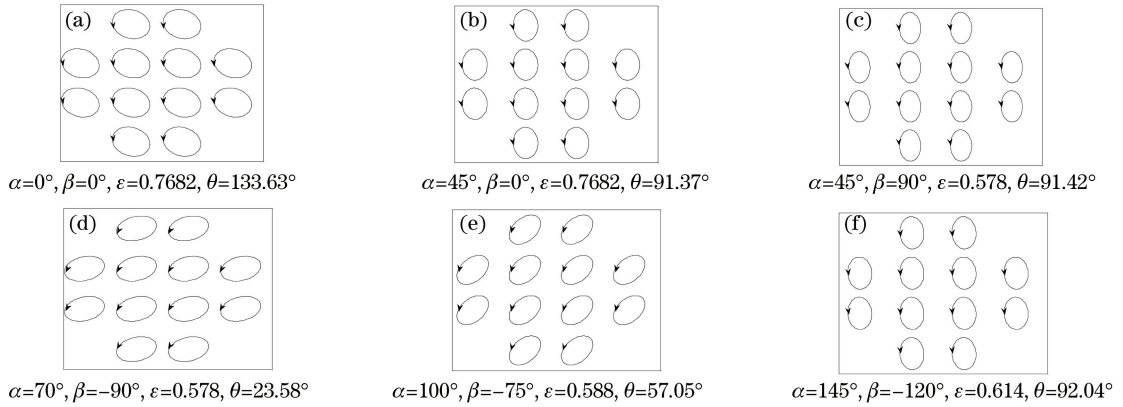


图3 6组方位、俯仰角的出射光偏振态

Fig. 3 Output light polarization states of six groups of azimuth and elevation angles

5 结 论

相干空间激光通信终端中反射镜相对运动会改变信号光偏振态,致使出射信号光不能以恒定圆偏振光出射,进而导致系统性能下降。为解决此问题,以库德式激光通信终端为研究对象,建立了其几何模型,利用三维偏振态追迹算法对其偏振态传输特性进行分析,得出了其偏振态传输矩阵,建立了库德式激光通信终端方位、俯仰角与其偏振消光比、相位延迟角的关系,并可对出射信号光的偏振态进行预判。研究表明,库德式激光通信终端出射信号光偏振态与终端方位、俯仰扫描角有密切联系。仿真结果为相干空间激光通信出射信号光偏振态实时开环控制提供了参考。

参 考 文 献

- Cornwell D M. NASA's optical communications program for 2015 and Beyond[C]. SPIE, 2015, 9354: 93540E.
- Rose T S, Janson S W, LaLumondiere S. LEO to ground optical communications from a small satellite platform[C]. SPIE, 2015, 9354: 93540I.
- Sodnik Z, Lutz H, Furch B, *et al.* Optical satellite communications in Europe[C]. SPIE, 2010, 7587: 758705.
- Smutny B, Kaempfner H, Muehlnikel G, *et al.* 5.6 Gbps optical intersatellite communication link[C]. SPIE, 2009, 7199: 719906.
- Giggenbach D, Horwath J, Knapik M. Optical data downlinks form earth observation platforms[C]. SPIE, 2009, 7199: 719903.
- Yamakaw S, Hanad T, Kohat H, *et al.* JAXA's efforts toward next generation space data-relay satellite using optical inter-orbit communication technology[C]. SPIE, 2010, 7587: 75870P.
- Alonso A, Reyes M, Sodnik Z. Performance of satellite-to-ground communications link between ARTEMIS and the optical ground station[C]. SPIE, 2004, 5572: 372-383.
- Xu Nan, Liu Liren. Technologies and recent progress of coherent optical communications in free space[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(8): 44-51.
许楠, 刘立人. 自由空间相干光通信技术及其发展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(8): 44-51.
- Liu Liren. Laser communications in space optical link and terminal technology[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(1): 3-20.
刘立人. 卫星激光通信 I 链路和终端技术[J]. 中国激光, 2007, 34(1): 3-20.
- Li Xiaoming, Zhang Lizhong, Han Cheng, *et al.* Design of optimization-baffle for GEO laser communication[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0905006.
李小明, 张立中, 韩成, 等. GEO 激光通信光端机遮光罩优化设计[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0905006.
- Jiang Huilin, Jiang Lun, Song Yansong, *et al.* Research of optical and APT technology in one-point to multi-point simultaneous space laser communication system[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0405008.
姜会林, 江伦, 宋延嵩, 等. 一点对多点同时空间激光通信光学跟瞄技术研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0405008.

- 12 Li Tie, Ke Xizheng. Polarization control in the coherent optical detection system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(11): 3069-3074.
李 铁, 柯熙政. 相干光检测中的偏振控制[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11): 3069-3074.
- 13 Toyoshima M, Takenaka H, Shoji Y, *et al.* Polarization measurements through space-to-ground atmospheric propagation paths by using a highly polarized laser source in space[J]. Optics Express, 2009, 17(50): 22333-22340.
- 14 Yang Yufei, Yan Changxiang. Polarization property analysis of a periscopic scanner with three-dimensional polarization ray-tracing calculus[J]. Applied Optics, 2016, 55(6): 1343-1350.
- 15 Jofre M, Anzolin G, Steinlechner F, *et al.* Fast beam steering with full polarization control using a galvanometric optical scanner and polarization controller[J]. Optics Express, 2012, 20(11): 12247-12260.
- 16 Anzolin G, Gardelein A, Jofre M, *et al.* Polarization change induced by a galvanometric optical scanner[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2010, 27(9): 1946-1952.
- 17 Garrison L M, Blaszczyk Z, Green A E S. Polarization characteristics of an altazimuth sky scanner[J]. Applied Optics, 1980, 19(9): 1419-1424.
- 18 Yun G, Mc Clain S C, Chipman R A, *et al.* Three-dimensional polarization ray-tracing calculus II: Retardance [J]. Applied Optics, 2011, 50(18): 2866-2874.
- 19 Yun G, Crabtree K, Chipman R A, *et al.* Three-dimensional polarization ray-tracing calculus I: Definition and diattenuation[J]. Applied Optics, 2011, 50(18): 2855-2865.