

# 潜望式激光通信终端信号光偏振态实时补偿方法

江 伦<sup>1,2</sup> 王 超<sup>1,2</sup> 安 岩<sup>1,2</sup> 刘 壮<sup>1,2</sup> 李英超<sup>1,2</sup> 张立中<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>长春理工大学空间光电技术国家与地方联合工程中心, 吉林 长春 130022

**摘要** 针对潜望式激光通信终端中的运动反射镜会改变接收信号光偏振态从而导致系统混频效率下降的问题, 提出一种基于旋转组合波片的偏振态实时补偿方法, 使接收信号光偏振态恒定为 45° 线偏振, 以实现与本振光的高效混频。在建立潜望式扫描机构几何模型的基础上, 利用三维偏振态追迹算法对其偏振态传输特性进行分析, 得到系统偏振态传输矩阵, 给出不同方位角、俯仰角下出射信号光的偏振态, 建立了偏振态补偿元件 1/4 波片、1/2 波片各自旋转角度与潜望式扫描机构方位角、俯仰角的联系, 分析了波片旋转角度误差对出射信号光偏振态的影响。

**关键词** 光通信; 偏振态; 激光通信终端; 实时补偿

**中图分类号** TN929.1 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.120601

## Real-Time Signal Polarization Compensation Method for Periscopic Laser Communication Terminal

Jiang Lun<sup>1,2</sup> Wang Chao<sup>1,2</sup> An Yan<sup>1,2</sup> Liu Zhuang<sup>1,2</sup> Li Yingchao<sup>1,2</sup> Zhang Lizhong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Aero and Ground Laser Communication Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

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

**Abstract** Aiming at the problem of low mixing efficiency caused by unstable signal polarization states because of moving reflector in the periscopic laser communication terminal, a real-time polarization compensation method based on rotating waveplates is presented, by which 45° linear-polarized receiving signal light is kept so as to improve the system mixing efficiency. The geometric model of periscopic scanner is established, and based on it, the polarization transmission characteristics are analyzed by three-dimensional polarization tracks method, and the system polarization transmission matrix is obtained as well. The polarization states of output beams under different azimuths and pitch angles are given and the connection between rotation angles of polarization compensation elements (1/4 waveplate and 1/2 waveplate) and azimuths and pitch angles of periscopic scanner is established. The effect of the waveplates rotating angle errors on the polarization state of output light is analyzed.

**Key words** optical communications; polarization state; laser communication terminal; real-time compensation

**OCIS codes** 060.4510; 060.2605; 260.5430

## 1 引 言

近年来,空间激光通信通信体制逐渐由强度调制-直接探测(IM/DD)向相位调制-相干探测(如二进制相移键控/四相相移键控,BPSK/QPSK)转变,以实现远距离、高速率的空间激光通信。德国已于2008年成功进行了世界上首次低轨卫星间相干激光通信实验,通信速率高达5.625 Gb/s,标志着相干激光通信在空间应用的开始<sup>[1-5]</sup>。在此技术基础上,欧洲的“数据中继计划”采用零差相干探测体制,于2016年1月30日发射

**收稿日期:** 2016-08-09; **收到修改稿日期:** 2016-08-15; **网络出版日期:** 2016-12-06

**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[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

了首颗商业静止地球轨道(GEO)激光通信卫星,以打造高速率信息传输骨干网。

相干空间激光通信系统要求本振光偏振方向与信号光偏振方向一致,才能实现较高的混频效率<sup>[6]</sup>。本振光偏振方向可以保持恒定,但信号光偏振态受大气湍流、粒子散射和终端中扫描反射镜相对运动的影响很难保持恒定。实验表明,系统信号光以圆偏振态传输时,其偏振态几乎不受大气信道的影响<sup>[7]</sup>,但系统扫描反射镜的相对运动仍会造成接收信号光偏振态的改变,使其不能始终以 $45^\circ$ 线偏振光进入空间光混频器,从而导致系统性能下降。

因此,Jofre等<sup>[8]</sup>提出通过电动偏振控制器补偿检流计扫描反射镜运动造成的信号光偏振态变化来保持出射信号光偏振态的恒定;Yang等<sup>[9]</sup>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;Anzolin等<sup>[10-11]</sup>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。

以上研究主要是针对反射镜扫描机构运动所造成的信号光偏振态变化,没有涉及对接收信号光的实时补偿问题。本文以潜望式相干激光通信终端为研究对象,针对扫描机构反射镜相对运动造成接收信号光的偏振态变化,提出一种基于旋转波片组合的偏振态实时补偿方法,建立扫描反射镜方位、俯仰角与波片旋转角度的联系,以实现接收信号光以恒定 $45^\circ$ 线偏振入射至空间光混频器,达到信号光与空间光高效混频的目的。

## 2 潜望式激光通信终端偏振态补偿方法

潜望式激光通信终端包括潜望式扫描机构、望远单元、后续子光路等,文献[12]分析了终端中望远单元、后续子光路等对信号光偏振态的影响,但这些元件对信号光偏振态的改变是恒定不变的,可当作系统偏振态误差,通过调整波片旋转角度进行静态补偿。但扫描机构对信号光的偏振态变化随其扫描方位、俯仰角的不同而变化,需对信号光的偏振态进行实时动态补偿,故本文分析时仅考虑潜望式扫描机构对信号光偏振态的影响,忽略激光通信终端中其他光学元件对信号光偏振态的影响。

信号光偏振控制方式主要有旋转组合波片法<sup>[13-14]</sup>和光纤偏振控制器法<sup>[15-17]</sup>。因为系统接收信号光需以平行光束直接进入空间光混频器,其偏振态只能通过旋转组合波片法实现,采用 $1/4$ 波片将潜望式扫描机构造成的椭圆偏振光变为线偏振光, $1/2$ 波片将线偏振光变为 $45^\circ$ 线偏振光,其实时补偿方法如图1所示。

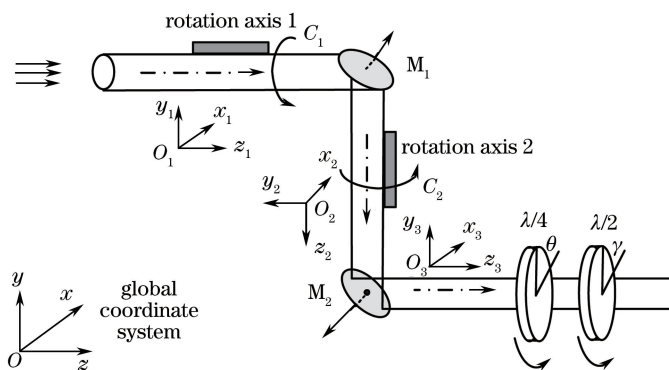


图1 潜望式激光通信终端偏振态实时补偿示意图

Fig. 1 Schematic for real-time polarization compensation of periscopic scanning system

潜望式激光通信终端在通信光接收支路放置 $1/4$ 波片、 $1/2$ 波片对扫描机构反射镜相对运动造成的信号光偏振态变化进行实时补偿,图中不考虑终端中其他光学元件的偏振态影响。入射信号光为指定旋向的圆偏振光,经过潜望式扫描反射镜后,其出射信号光偏振态与扫描机构方位、俯仰角相关,根据系统转台编码器可得到其方位、俯仰角度,并通过反射镜膜系材料算出对应的出射信号光偏振态,波片驱动机构使 $1/4$ 波片旋转特定角度 $\theta$ ,使接收信号光为线偏振光; $1/2$ 波片旋转特定角度 $\gamma$ ,使信号光为线偏振光,且偏振角度与水平方向成 $45^\circ$ ,保持恒定。据此可对信号光偏振态进行开环实时补偿。

### 3 潜望式扫描机构偏振态传输特性

利用三维偏振态追迹算法分析潜望式扫描机构偏振态传输特性<sup>[18-19]</sup>。先建立潜望式扫描机构的几何模型,然后利用三维偏振传输态追迹算法分析其偏振传输特性。

#### 3.1 潜望式扫描机构几何模型

潜望式扫描机构几何模型如图 1 所示,俯仰轴系为  $C_1$ ,方位轴系为  $C_2$ , $M_1$  和  $M_2$  为平面反射镜,其中俯仰轴系  $C_1$  控制反射镜  $M_1$  和  $M_2$  的运动,方位轴系  $C_2$  控制反射镜  $M_2$  的转动。系统中全局坐标为  $O(x, y, z)$ ,局部坐标有 3 个,其中  $O_1(x_1, y_1, z_1)$  为入射光局部坐标, $O_3(x_3, y_3, z_3)$  为出射光局部坐标,两轴系绝对垂直,且在转动过程中无回转误差。反射镜  $M_1$  使光束在  $x_1$ - $y_1$  平面内转动,反射镜  $M_2$  使光束在  $x_3$ - $z_3$  平面内转动,两反射镜的旋转角均以零位为基准, $M_1$  处于零位时其反射镜面法线方向为  $(0, \sqrt{2}/2, \sqrt{2}/2)$ , $M_2$  处于零位时其反射镜面法线方向为  $(0, -\sqrt{2}/2, -\sqrt{2}/2)$ ,镜面法线方向是指垂直于镜面指向光束传输方向。

系统中定义俯仰和方位轴系均为右手坐标系,反射镜  $M_1$  和  $M_2$  处于零位时,对应的  $\alpha = \beta = 0^\circ$ ,出射信号光方向为  $[0, 0, 1]$ ;当系统处于  $\alpha = 0^\circ, \beta = 90^\circ$  时,对应出射信号光方向为  $[1, 0, 0]$ 。

系统出射信号光方向与系统方位角  $\alpha$ 、俯仰角  $\beta$  相关,反射镜  $M_1$ 、 $M_2$  的法线方向与俯仰角、方位角的关系分别为

$$\mathbf{n}_{M_1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \sin \alpha \\ \cos \alpha \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{n}_{M_2} = -\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -\sin \alpha + \cos \alpha \sin \beta \\ \cos \alpha + \sin \alpha \sin \beta \\ \cos \beta \end{bmatrix}. \quad (1)$$

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)和(2)式,可分别得出各反射镜的反射矩阵  $\mathbf{H}_1$  和  $\mathbf{H}_2$ ,潜望式扫描机构总的反射矩阵为  $\mathbf{H} = \mathbf{H}_2 \mathbf{H}_1$ ,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

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

如图 1 所示,系统入射光束方向  $\mathbf{k}_{in} = [0, 0, 1]$ ,其经过反射镜  $M_1$ 、 $M_2$  反射后的出射光光束方向为分别为  $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_{out}$ :

$$\mathbf{k}_1 = \begin{bmatrix} \sin \alpha \\ -\cos \alpha \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{k}_{out} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \sin \beta \\ \sin \alpha \sin \beta \\ \cos \beta \end{bmatrix}. \quad (4)$$

#### 3.2 三维偏振态追迹算法

美国 Yun 等<sup>[18-19]</sup>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。

算法中光学系统偏振态的变化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  $\mathbf{P}_{total}$  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。Yang 等<sup>[9]</sup>利用该算法分析了潜望式扫描机构对信号光偏振态的影响,得到信号光偏振态与扫描机构俯仰角、方位角的关系。根据该文献<sup>[9]</sup>,每块潜望式反射镜的偏振态传输矩阵分别为

$$\mathbf{P}_1 = \begin{bmatrix} r_s \cos^2 \alpha & r_s \sin \alpha \cos \alpha & \sin \alpha \\ r_s \sin \alpha \cos \alpha & r_s \sin^2 \alpha & -\cos \alpha \\ -r_p \sin \alpha & r_p \cos \alpha & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{P}_2 = \begin{bmatrix} r_s \Gamma_4^2 - r_p \Gamma_1 \cos \alpha + \Gamma_1 \cos \alpha & r_s \Gamma_2 \Gamma_4 - r_p \Gamma_1 \sin \alpha - \Gamma_3 \cos \alpha & -r_s \Gamma_4 \sin^2 \beta - r_p \Gamma_2 \\ r_s \Gamma_2 \Gamma_4 + r_p \Gamma_3 \cos \alpha + \Gamma_1 \sin \alpha & r_s \Gamma_2^2 + r_p \Gamma_1 \cos \alpha - \Gamma_1 \cos \alpha & -r_s \Gamma_2 \sin \beta + r_p \Gamma_4 \\ -r_s \Gamma_3 \cos \beta + \Gamma_1 & -r_s \Gamma_2 \sin \beta - \Gamma_4 & r_s \sin^2 \beta \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中  $\Gamma_1 = \sin \alpha \sin \beta, \Gamma_2 = \sin \alpha \cos \beta, \Gamma_3 = \cos \alpha \sin \beta, \Gamma_4 = \cos \alpha \cos \beta, r_s, r_p$  分别为反射镜对 s、p 光的菲涅耳

反射系数,  $\alpha, \beta$  分别为潜望式扫描机构的方位角和俯仰角。潜望式扫描机构的偏振态传输矩阵  $\mathbf{P}_{\text{total}}$  是每次反射矩阵的乘积:

$$\mathbf{P}_{\text{total}} = \mathbf{P}_2 \mathbf{P}_1 \quad (6)$$

偏振态补偿元件 1/4 波片的快轴方向与全局坐标  $x$  轴方向一致, 绕  $z$  轴方向右手旋转角度为  $\theta$  时, 其偏振态传输矩阵为

$$\mathbf{P}_{\lambda/4} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(-i\pi/4) & 0 & 0 \\ 0 & \exp(i\pi/4) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

偏振态补偿元件 1/2 波片的快轴方向与全局坐标  $x$  轴方向一致, 绕  $z$  轴方向右手旋转角度为  $\gamma$  时, 其偏振态传输矩阵为

$$\mathbf{P}_{\lambda/2} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(-i\pi/4) & 0 & 0 \\ 0 & \exp(i\pi/4) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

经过扫描机构双反射镜和偏振态补偿波片组的接收信号光偏振态为  $\mathbf{E}_{\text{out}}$ , 是系统中所有光学元件偏振态传输矩阵与入射光偏振态的乘积:

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \mathbf{P}_{\lambda/2} \mathbf{P}_{\lambda/4} \mathbf{P}_{\text{total}} \mathbf{E}_{\text{in}} \quad (9)$$

入射信号光为左旋圆偏振光, 出射信号光偏振态为  $45^\circ$  线偏振光。根据(9)式和扫描机构方位角  $\alpha$ 、俯仰角  $\beta$  的变化得到出射信号光的偏振态。偏振态补偿 1/4 波片快轴与信号光椭圆偏振光长轴取向一致, 1/2 波片旋转角度  $\gamma$  将线偏振光角度转变为  $45^\circ$ 。

(9)式得出的  $\mathbf{E}_{\text{out}}$  是在全局坐标下的表达式, 但偏振态仅在上出射面上的二维局部坐标下描述, 为此需将(9)式进行修正:

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \mathbf{P}_{\lambda/2} \mathbf{P}_{\lambda/4} \mathbf{M}_{\text{total}} \mathbf{E}_{\text{in}} \quad (10)$$

式中  $\mathbf{M}_{\text{total}} = \mathbf{Q}_{\text{total}}^{-1} \mathbf{P}_{\text{total}}$ , 其中  $\mathbf{Q}_{\text{total}}^{-1}$  是系统中坐标变换矩阵的逆, 详细算法见文献[15]。这样, 出射光局部坐标系与入射光局部坐标系一致, 得出的  $\mathbf{E}_{\text{out}}$  便可在入射光局部坐标下进行描述。

## 4 系统偏振态补偿数值仿真分析

对潜望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,  $45^\circ$  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(5)~(10)式, 则系统偏振态传输矩阵  $\mathbf{M}_{\text{total}}$  为方位角  $\alpha$  和俯仰角  $\beta$  的函数, 随着系统作方位、俯仰运动, 系统出射信号光的偏振态也会随之改变。对潜望式激光通信终端 5 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  $\mathbf{E}_{\text{in}} = [0.707, 0.707i, 0]$ , 代入(10)式中可得经过潜望式扫描机构后出射光的偏振态, 结果如表 1 所示。表 1 中  $\epsilon$  和  $\varphi$  分别表示经过潜望式扫描机构反射后的信号光的椭圆率和长轴取向。从表 1 可以看出, 对不同的方位、俯仰角, 出射信号光椭圆率和长轴取向不同, 但旋向均一致, 为左旋椭圆偏振光。偏振态补偿 1/4 波片快轴与椭圆长轴取向保持一致, 将经过潜望式扫描机构的信号光变为线偏振光, 补偿后线偏振光取向为  $\varphi$ , 偏振态补偿 1/2 波片快轴与水平方向夹角为  $\gamma$ , 使得最终出射信号光为  $45^\circ$  线偏振光。

将上述过程进行数值仿真, 如图 2 所示。图 2 中子图(1a)~(5a)代表 5 组方位、俯仰角下经潜望式扫描机构出射的信号光偏振态, 子图(1b)~(5b)代表 5 组方位、俯仰角下经 1/4 波片出射的信号光偏振态, 子图(1c)~(5c)代表 5 组方位、俯仰角下经 1/2 波片出射的信号光偏振态。子图中用多个小椭圆代表光束中的子孔径光束。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。 $\epsilon$  代表椭圆偏振光的椭圆率,  $\varphi$  代表偏振光的长轴取向, 其中  $\epsilon = 1$  代表圆偏振光,  $\epsilon = 0$  代表线偏振光,  $\epsilon \geq 0$  表明信号光为左旋椭圆偏振光。从图 2 可以得到, 5 组方位、俯仰角下经过潜望式扫描机构的信号光偏振态不同, 但均为左旋椭圆偏振光, 对应的偏振态补偿 1/4 波片旋转角度  $\theta$  分别为  $43.94^\circ, 103.81^\circ, 74.02^\circ, 114.09^\circ, 154.04^\circ$ , 偏振态补偿 1/2 波片旋转角度  $\gamma$  分别为  $62.62^\circ, 94.74^\circ, 81.26^\circ, 99.85^\circ, 27.94^\circ$ 。仿真结果表明, 偏振态补偿 1/4 波片快轴与椭

圆长轴取向保持一致,可将经过潜望式扫描机构的信号光变为线偏振光;偏振态补偿 1/2 波片旋转对应角度可使最终出射信号光以恒定 45°线偏振光进入空间光混频器。

表 1 方位角、俯仰角与信号光偏振态和偏振传输矩阵  $\mathbf{M}_{\text{total}}$  的对应关系

Table 1 Relationship between azimuth, pitch angle, the polarization state of signal light and polarization transfer matrix  $\mathbf{M}_{\text{total}}$

Angle ( $\alpha, \beta$ )	$\mathbf{M}_{\text{total}}$	$\mathbf{M}_{\text{total}} \mathbf{E}_{\text{in}}$	( $\epsilon, \varphi$ )
(0°, 0°)	$\begin{bmatrix} 0.9439-0.2959i & 0 & 0 \\ 0 & 0.8033-0.5584i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.6674-0.2092i \\ 0.3948+0.568i \\ 0 \end{bmatrix}$	(0.7345, 43.94°)
(30°, 60°)	$\begin{bmatrix} 0.8634-0.4642i & 0.0347+0.0543i & 0 \\ 0.0262+0.0593i & 0.8985-0.3986i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.572-0.3037i \\ 0.3003+0.6772i \\ 0 \end{bmatrix}$	(0.859, 103.81°)
(70°, 100°)	$\begin{bmatrix} 0.8892-0.4213i & 0.0089+0.0207i & 0 \\ 0.0122+0.0188i & 0.877-0.4441i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.614-0.2916i \\ 0.3226+0.6333i \\ 0 \end{bmatrix}$	(0.95, 74.02°)
(100°, 120°)	$\begin{bmatrix} 0.854-0.4817i & 0.0184+0.0446i & 0 \\ 0.0268+0.0397i & 0.9079-0.3812i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.5722-0.3276i \\ 0.2884+0.6700i \\ 0 \end{bmatrix}$	(0.86, 114.09°)
(120°, 160°)	$\begin{bmatrix} 0.8242-0.5223i & -0.0456-0.0774i & 0 \\ -0.0393-0.0811i & 0.9254-0.333i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.6374-0.4015i \\ 0.202+0.5969i \\ 0 \end{bmatrix}$	(0.749, 154.04°)

在波片组进行旋转调整以实现输出偏振态控制的过程中,波片旋转角控制误差对输出 45°线偏振光有直接影响。假定偏振补偿元件 1/4 波片旋转角控制误差为  $\Delta\theta$ , 则其偏振态传输矩阵为

$$\mathbf{P}_{\lambda/4} = \begin{bmatrix} \cos(\theta + \Delta\theta) & -\sin(\theta + \Delta\theta) & 0 \\ \sin(\theta + \Delta\theta) & \cos(\theta + \Delta\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \exp(-i\pi/4) & 0 & 0 \\ 0 & \exp(i\pi/4) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta + \Delta\theta) & \sin(\theta + \Delta\theta) & 0 \\ -\sin(\theta + \Delta\theta) & \cos(\theta + \Delta\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

假定 1/2 波片旋转角控制误差为  $\Delta\gamma$ , 其偏振态传输矩阵为

$$\mathbf{P}_{\lambda/2} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma + \Delta\gamma) & -\sin(\gamma + \Delta\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma + \Delta\gamma) & \cos(\gamma + \Delta\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \exp(-i\pi/4) & 0 & 0 \\ 0 & \exp(i\pi/4) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\gamma + \Delta\gamma) & \sin(\gamma + \Delta\gamma) & 0 \\ -\sin(\gamma + \Delta\gamma) & \cos(\gamma + \Delta\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

在分析波片旋转角控制误差  $\Delta\theta$  对 45°线偏振光的影响时,采用上述偏振态传输矩阵进行计算。为简便起见,在分析 1/4 波片旋转角控制误差对 45°线偏振光的影响时,假定 1/2 波片旋转角控制误差为零。仍在上述 5 组方位、俯仰角下进行分析,结果如表 2 所示。

表 2 1/4 波片旋转角控制误差对 45°线偏振光的影响

Table 2 Effect of 1/4 waveplate rotating angle error on the output 45° linear polarized light

Angle ( $\alpha, \beta$ )	$\Delta\theta=0^\circ$	$\Delta\theta=0.1^\circ$	$\Delta\theta=-0.1^\circ$
(0°, 0°)	( $\epsilon=0, \varphi=45^\circ$ )	( $\epsilon=-0.00051, \varphi=44.904^\circ$ )	( $\epsilon=0.00054, \varphi=45.104^\circ$ )
(30°, 60°)	( $\epsilon=0, \varphi=45^\circ$ )	( $\epsilon=-0.000229, \varphi=44.902^\circ$ )	( $\epsilon=0.000298, \varphi=45.102^\circ$ )
(70°, 100°)	( $\epsilon=0, \varphi=45^\circ$ )	( $\epsilon=-0.000055, \varphi=44.9^\circ$ )	( $\epsilon=0.000128, \varphi=45.1^\circ$ )
(100°, 120°)	( $\epsilon=0, \varphi=45^\circ$ )	( $\epsilon=-0.00024, \varphi=44.903^\circ$ )	( $\epsilon=0.00029, \varphi=45.103^\circ$ )
(120°, 160°)	( $\epsilon=0, \varphi=45^\circ$ )	( $\epsilon=-0.000496, \varphi=44.904^\circ$ )	( $\epsilon=0.000486, \varphi=45.104^\circ$ )



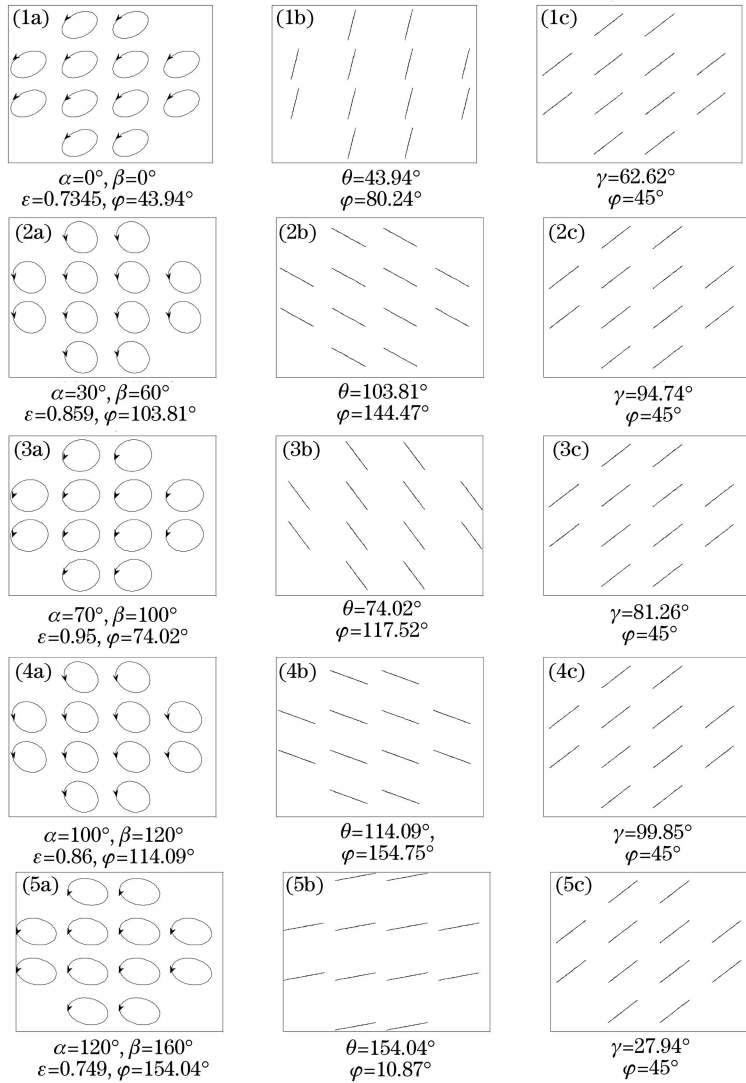


图 2 5 组方位、俯仰角下信号光经(1a)~(5a)潜望式扫描机构、(1b)~(5b) 1/4 波片、(1c)~(5c) 1/2 波片后的偏振态

Fig. 2 Polarization states of output signals with five groups of azimuths and pitch angles through (1a)-(5a) periscopic scanner, (1b)-(5b) 1/4 waveplate, (1c)-(5c) 1/2 waveplate

在分析 1/2 波片旋转角控制误差对 45° 线偏振光的影响时,假定 1/4 波片旋转角控制误差为零。仍在上述 5 组方位、俯仰角下进行分析,结果如表 3 所示。

表 3 1/2 波片旋转角控制误差对 45° 线偏振光的影响

Table 3 Effect of 1/2 waveplate rotating angle error on the output 45° linear polarized light

Angle ( $\alpha, \beta$ )	$\Delta\gamma=0^\circ$	$\Delta\gamma=0.1^\circ$	$\Delta\gamma=-0.1^\circ$
(0°, 0°)	( $\epsilon=0, \varphi=45^\circ$ )	( $\epsilon=0, \varphi=45.2^\circ$ )	( $\epsilon=0, \varphi=44.8^\circ$ )
(30°, 60°)	( $\epsilon=0, \varphi=45^\circ$ )	( $\epsilon=0, \varphi=45.2^\circ$ )	( $\epsilon=0, \varphi=44.8^\circ$ )
(70°, 100°)	( $\epsilon=0, \varphi=45^\circ$ )	( $\epsilon=0, \varphi=45.2^\circ$ )	( $\epsilon=0, \varphi=44.8^\circ$ )
(100°, 120°)	( $\epsilon=0, \varphi=45^\circ$ )	( $\epsilon=0, \varphi=45.2^\circ$ )	( $\epsilon=0, \varphi=44.8^\circ$ )
(120°, 160°)	( $\epsilon=0, \varphi=45^\circ$ )	( $\epsilon=0, \varphi=45.2^\circ$ )	( $\epsilon=0, \varphi=44.8^\circ$ )

表 2、表 3 分析结果表明:

- 1) 1/4 波片旋转角控制误差  $\Delta\theta$  既影响出射信号光的椭圆率  $\epsilon$ , 也影响其长轴取向  $\varphi$ , 即在 1/4 波片存在旋转角度误差的情况下, 最终出射的信号光不是线偏振光, 而是椭圆偏振光, 且其长轴取向不为 45°;
- 2) 在不同的方位、俯仰角下, 1/4 波片旋转角控制误差  $\Delta\theta$  对出射信号光偏振态的影响不同;
- 3) 1/2 波片旋转角控制误差  $\Delta\gamma$  不影响出射信号光的椭圆率, 仅影响其线偏振光的偏振方向, 即在 1/2

波片存在旋转角度误差的情况下,最终出射的信号仍为线偏振光,仅其偏振方向会受影响;

4) 在不同的方位、俯仰角下,1/2 波片旋转角控制误差  $\Delta\gamma$  对出射信号光偏振态的影响相同,且出射信号光长轴取向与  $45^\circ$  角偏差绝对值(即  $|\varphi - 45^\circ|$ ) 是 1/2 波片旋转角误差  $\Delta\gamma$  的 2 倍。

## 5 结 论

针对潜望式激光通信终端中的运动反射镜会改变接收信号光偏振态,从而导致系统混频效率下降的问题,提出一种基于旋转组合波片的偏振态实时补偿方法,使接收信号光偏振态恒定为  $45^\circ$  线偏振光,以实现与本振光的高效混频。建立了潜望式扫描机构几何模型,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。对 5 组方位角、俯仰角情况下的出射信号光的偏振态进行仿真计算,得到对应的补偿元件 1/4 波片、1/2 波片各自旋转角度;分析了波片旋转角控制误差对输出  $45^\circ$  线偏振光的影响。该方案适用于所有波段的含运动扫描机构的相干空间激光通信系统,只是偏振态补偿元件 1/2 和 1/4 波片需根据具体波长进行相应的设计。该结果为相干空间激光通信系统中的信号光偏振态实时控制奠定了技术基础。

## 参 考 文 献

- 1 Smutny B, Kaempfer H, Muehlnikel G, *et al.* 5.6 Gbps optical intersatellite communication link[C]. SPIE, 2009, 7199: 719906.
- 2 Fields R, Lunde C, Wong R, *et al.* NFIRE-to-terra SAR-X laser communication results: satellite pointing, disturbances and other attributes consistent with successful performance[C]. SPIE, 2009, 7300: 7300Q.
- 3 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.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 Toyoshima M, Takenaka H, Shoji Y. 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.
- 8 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.
- 9 Yang Y, Yan C X. Polarization property analysis of a periscopic scanner with three-dimensional polarization ray-tracing calculus[J]. Applied Optics, 2016, 55(6): 1343-1350.
- 10 Anzolin G, Gardelein A, Jofre M. Polarization change induced by a galvanometric optical scanner[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2010, 27(9): 1946-1952.
- 11 Garrison L M, Blaszcak Z, Green A E S. Polarization characteristics of an altazimuth sky scanner[J]. Applied Optics, 1980, 19(9): 1419-1424.
- 12 Wang Chao, Jiang Lun, Dong Keyan. Analysis of the polarization characteristic of a satellite-to-ground laser communication optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(12): 120607.  
王超, 江伦, 董科研. 星地激光通信系统偏振特性分析[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(12): 120607.
- 13 Hirabayashi K, Amano C. Free-forward continuous and complete polarization control with a PLZT rotatable-variable waveplate and inline polarimeter[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(9): 1920-1932.
- 14 Oh Y H, Kwon M S, Shin S Y. In-line polarization controller that uses a hollow optical fiber filled with a liquid crystal[J]. Optics Letters, 2004, 29(22): 2605-2607.

- 15 Yu J, Lee J, Han M, *et al.* Ultra-fast acoustically tunable all-fiber polarization controller based on a hollow optical fiber [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2003, ThU: ThU5.
- 16 Lyons E R, Lee H P. An electrically tunable all-fiber polarization controller based on deposited thin-film microheaters[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(9): 1318-1320.
- 17 Noe R, Heidrich H. Endless polarization control systems for coherent optics[J]. Journal of Lightwave Technology, 1998, 6(7): 1199-1207.
- 18 Yun G, McClain S C, Chipman R A. Three-dimensional polarization ray-tracing calculus II: retardance [J]. Applied Optics, 2011, 50(18): 2866-2874.
- 19 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.