

信号光偏振特性对空间相干探测混频效率的影响

马婷婷^{1,2,3}, 佟首峰^{1,2}, 南航^{1,2,3}, 贾晓阳^{1,2,3}

¹ 长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022;

² 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;

³ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 90°混频器对空间相干激光通信中实现高灵敏度探测起着重要作用。研究了信号光偏振态与空间相干探测混频效率的关系。圆偏振光比传统方案所用的线偏振光具有更好的稳定性,且有利于实现高效率混频,因此提出了在信号入射端引入1/4波片的方法来改变信号光的偏振态,以模拟信号光受到外界因素影响时的偏振态变化情况。将计算得到的信号功率作为参量,研究信号光偏振态对混频效率的影响。假定入射本振光相同且忽略其他限定条件,可以得到:混频器在接收圆偏振态信号光时,可获得最大的相对信号功率,即混频效率最高。

关键词 光通信; 空间相干探测; 混频效率; 偏振态

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.020604

Effect of Polarization Property of Signal Light on Mixing Efficiency of Space Coherent Detection

Ma Tingting^{1,2,3}, Tong Shoufeng^{1,2}, Nan Hang^{1,2,3}, Jia Xiaoyang^{1,2,3}

¹ *Institute of Space Optoelectronic Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;*

² *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;*

³ *School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract A 90° mixer plays an important role in achieving a high sensitivity detection in space coherent laser communication. The relationship between signal light polarization state and mixing efficiency of space coherent detection is studied. The circularly polarized light is more stable than the linearly polarized light used in traditional programs, and it is beneficial to achieving a high efficient mixing. A method that a 1/4 wave plate is introduced at the signal input end is proposed to change the polarization state of the signal light, and the simulation for the change of signal light polarization state is carried out when the signal light is influenced by external factors. The calculated signal power is used as a parameter, and the influence of the signal light polarization state on the mixing efficiency is studied. When incident local oscillator lights are same and other limited conditions are ignored, we come to a conclusion that the maximum relative signal power can be obtained by the mixer when the mixer receives circularly polarized signal light, and its mixing efficiency is the highest.

Key words optical communications; space coherent detection; mixing efficiency; polarization state

OCIS codes 060.4510; 060.1660; 060.2920

收稿日期: 2016-08-23; **收到修改稿日期:** 2016-10-07

基金项目: 国家自然科学基金(91438204)

作者简介: 马婷婷(1991—),女,硕士研究生,主要从事空间相干激光通信及空间光高效率混频技术方面的研究。

E-mail: mtt0828@sina.com

导师简介: 佟首峰(1972—),男,博士,教授,主要从事航天遥感及卫星激光通信方面的研究。E-mail: tsf1998@sina.com

1 引言

空间激光通信因其具有宽带、高速、高保密及强抗压制能力等显著优势,得到了国内外研究者的广泛关注。高灵敏度相干探测技术被认为是未来实现星际高速、远距离、大容量信息传输的有力保障,但是该技术的实现尚存在诸多难点。

目前,在相干探测技术中,信号光与本振(LO)光的相干形式主要有光纤相干和空间激光相干两种。空间激光相干的相干效率高,不需要空间光到光纤的耦合,降低了信号功率的损耗,具有一定的优越性。空间光混频器作为能够改善探测灵敏度的核心部件,主要作用是将相位差恒定、偏振匹配且频率接近的两束光的波前在探测器表面干涉混频,信号光通过与本振光的干涉得到增益,进而提高相干探测的灵敏度。因此,空间光混频器功能的实现直接影响了整个空间光通信系统的性能。近年来,国内外众多研究者针对影响高效率相干混频的因素进行了大量研究^[1-2]。

刘宏展等^[3]研究了信号光和本振光在不同振幅匹配下对星间相干混频效率的影响;李向阳等^[4]针对高斯光束的混频,研究了场分布对混频效率的影响。这些研究都是基于接收线偏振信号光的情况,而有关信号光偏振特性的变化对相干混频的影响机理鲜有报道,因此,本文分析了信号光偏振态发生变化时光束相干混频后输出的中频信号功率,并研究了信号光偏振特性对空间相干光通信混频效率的影响。

2 原理

20世纪90年代, Garreis等^[5]设计了具有块体结构的 90° 空间光混频器,此方案多次应用于美国宇航局及欧洲太空局等研发的激光通信终端中,其具体结构原理如图1所示^[6],图中PBS为偏振分束器。

由图1可见, 45° 线偏振本振光入射前需先经过一个 $1/4$ 波片,该 $1/4$ 波片将线偏振光转变为圆偏振光。PBS分别将两路光的偏振态(p偏振、s偏振)分开,p偏振光可以完全透射,s偏振光被反射且反射角度为 45° 。信号光与本振光的垂直、平行分量分别进入两个支路,产生两路偏振方向互相垂直的混合光束。该混

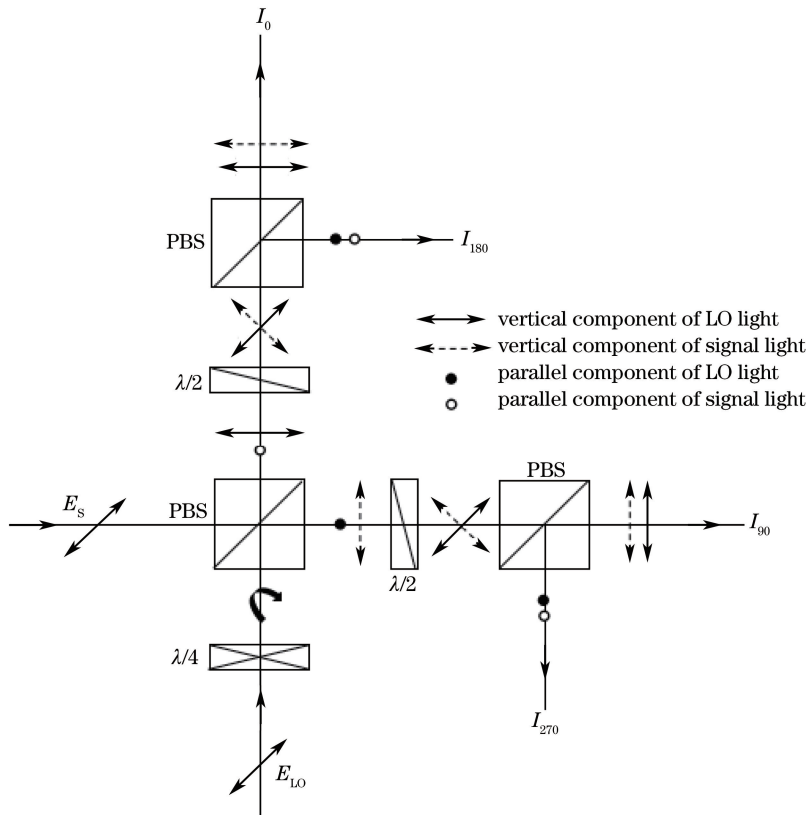


图1 90° 空间光混频器结构原理示意图

Fig. 1 Diagram of structure principle of 90° spatial light mixer

合光束经 $1/2$ 波片后产生 180° 的相位差,接着通过 PBS 二次分光得到相互具有 90° 相位差的 4 路输出光,再经正交、直流两信道实现 90° 的相位延迟功能。数学计算过程如下。

将信号光与本振光表示为 E_S, E_{LO} , 其中 k_1, k_2 为信号光的偏振分量, k_3, k_4 为本振光的偏振分量, 在理想情况(波片快轴夹角 θ 为 45° 时)下 k_1, k_2, k_3, k_4 均为 $\frac{\sqrt{2}}{2}$ 。 $\varphi(t)$ 为信号光的相位, ψ 为本振光的相位, $\rho_\perp, \tau_\parallel$ 为信号光经 PBS 后产生的相位因子。经计算得到 4 路输出结果 $I_0, I_{90}, I_{180}, I_{270}$ 分别为

$$I_0 = \frac{1}{2} \left\{ k_2^2 |E_S|^2 + k_3^2 |E_{LO}|^2 + 2k_2k_3 |E_S E_{LO}| \exp \left\{ i \left[\psi + \tau_\parallel + \frac{\pi}{4} - \varphi(t) - \rho_\perp \right] \right\} \right\}, \quad (1)$$

$$I_{90} = \frac{1}{2} \left\{ k_1^2 |E_S|^2 + k_4^2 |E_{LO}|^2 + 2k_1k_4 |E_S E_{LO}| \exp \left\{ i \left[\varphi(t) + \tau_\parallel - \psi - \rho_\perp - \frac{\pi}{4} \right] \right\} \right\}, \quad (2)$$

$$I_{180} = \frac{1}{2} \left\{ k_2^2 |E_S|^2 + k_3^2 |E_{LO}|^2 - 2k_2k_3 |E_S E_{LO}| \exp \left\{ i \left[\varphi(t) + \rho_\perp - \psi - \tau_\parallel - \frac{\pi}{4} \right] \right\} \right\}, \quad (3)$$

$$I_{270} = \frac{1}{2} \left\{ k_1^2 |E_S|^2 + k_4^2 |E_{LO}|^2 - 2k_1k_4 |E_S E_{LO}| \exp \left\{ i \left[\psi + \rho_\perp + \frac{\pi}{4} - \varphi(t) - \tau_\parallel \right] \right\} \right\}. \quad (4)$$

根据上述所得的 4 路输出光电流, 计算得到分别用于后续信息还原及锁相的直流信号 I_1 和交流信号 I_Q , 可以清楚地看到, 经过 PBS 后, 当 $\rho_\perp, \tau_\parallel$ 满足 $\tau_\parallel - \rho_\perp = \pm \frac{\pi}{4}$ 时, 可实现 90° 的相位延迟, 经过 PBS 后的 I_1, I_Q 可表示为

$$I_1 = k_2k_3 |E_S E_{LO}| \{ \exp[-i\varphi(t)] + \exp[i\varphi(t)] \} = 2k_2k_3 |E_S E_{LO}| \cos \varphi(t) = \sqrt{2}k_2 |E_S E_{LO}| \cos \varphi(t), \quad (5)$$

$$I_Q = k_1k_4 |E_S E_{LO}| \{ \exp\{i[\varphi(t) - 2(\rho_\perp - \tau_\parallel)]\} + \exp\{i[2(\rho_\perp - \tau_\parallel) - \varphi(t)]\} \} = 2k_1k_4 |E_S E_{LO}| \cos[\varphi(t) + 2(\tau_\parallel - \rho_\perp)] = \sqrt{2}k_1 |E_S E_{LO}| \cos[\varphi(t) + 2(\tau_\parallel - \rho_\perp)]. \quad (6)$$

以上计算是以入射线偏振光为前提进行的, 极限混频效率约为 0.707。由于空间相干光通信是搭载于运动平台并以大气为传输介质进行信息传输的, 激光器性能的稳定性、信道条件、编码方式、大气传输的随机性、平台振动等对信号光的偏振态都会造成影响。空间光混频器内部多为对偏振敏感的光学元件。信号光与本振光偏振态失配、变化等会严重影响输出混频光的强度及相位关系, 进而限制了空间光混频器的混频效率, 甚至影响整个相干光通信系统对信号的探测效率。相比于线偏振光, 圆偏振光及椭圆偏振光对大气具有更强的适应能力, 有利于提高通信光偏振态的确定性^[7]。因 $1/4$ 波片具有可以改变光的偏振态却不影响光强(信号光功率)的特点, 故可在入射端加入 $1/4$ 波片, 通过改变波片快轴夹角 θ 来模拟信号光的不同偏振态, 并对光混频器输出信号的强度进行分析及验证。

3 数学验证

在原有的结构上, 选择在信号光入射到 PBS 前的光路中加入 $1/4$ 波片, 如图 2 所示, 下面根据此结构进行计算。

为进行后续计算, 将加入的 $1/4$ 波片表示为^[8]

$$\Lambda_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 - i\cos 2\theta & -i\sin 2\theta \\ -i\sin 2\theta & 1 + i\cos 2\theta \end{bmatrix}. \quad (7)$$

将两路相位信息部分分别用参量 x, y 代替, 即

$$x = \varphi(t) - \psi + \rho - \tau - \frac{\pi}{4}, \quad y = \varphi(t) - \psi - \rho + \tau + \frac{\pi}{4}. \quad (8)$$

入射光分别经过 $1/2$ 波片、PBS 等光学元件后, 4 个支路的输出光电流经简化后分别得到如下形式:

$$I_0 = \frac{1}{4} \{ [(k_1 \sin 2\theta - k_2 \cos 2\theta)^2 + k_2^2] |E_S|^2 + 2k_3 |E_{LO}|^2 + 2\sqrt{2} [k_1k_3 \sin 2\theta \sin x + k_2k_3 \cos x + k_2k_3 \cos 2\theta \sin(-x)] |E_S E_{LO}| \}, \quad (9)$$

$$I_{90} = \frac{1}{4} \{ [(k_1 \cos 2\theta + k_2 \sin 2\theta)^2 + k_1^2] |E_s|^2 + 2k_4 |E_{LO}|^2 + 2\sqrt{2} (k_2 k_4 \sin 2\theta \sin y + k_1 k_4 \cos y + k_1 k_4 \cos 2\theta \sin y) |E_s E_{LO}| \}, \quad (10)$$

$$I_{180} = \frac{1}{4} \{ [(k_1 \sin 2\theta - k_2 \cos 2\theta)^2 + k_2^2] |E_s|^2 + 2k_3 |E_{LO}|^2 + 2\sqrt{2} [k_2 k_3 \cos 2\theta \sin x - k_2 k_3 \cos x + k_1 k_3 \sin 2\theta \sin(-x)] |E_s E_{LO}| \}, \quad (11)$$

$$I_{270} = \frac{1}{4} \{ [(k_1 \cos 2\theta + k_2 \sin 2\theta)^2 + k_1^2] |E_s|^2 + 2k_4 |E_{LO}|^2 + 2\sqrt{2} [k_1 k_4 \cos 2\theta \sin(-y) + k_2 k_4 \sin 2\theta \sin(-y) - k_1 k_4 \cos y] |E_s E_{LO}| \}. \quad (12)$$

将 0° 、 180° 两个支路的光电流相减, 得到直流信号 I'_1 ; 将 90° 、 270° 两个支路的光电流相减, 得到正交信号 I'_Q , 则 I'_1 、 I'_Q 可分别表示为

$$I'_1 = I_0 - I_{180} = \sqrt{2} [k_2 k_3 \cos x + k_3 \sin x (k_1 \sin 2\theta - k_2 \cos 2\theta)] |E_s E_{LO}|, \quad (13)$$

$$I'_Q = I_{90} - I_{270} = \sqrt{2} [k_1 k_4 \cos y + k_4 \sin y (k_1 \cos 2\theta + k_2 \sin 2\theta)] |E_s E_{LO}|. \quad (14)$$

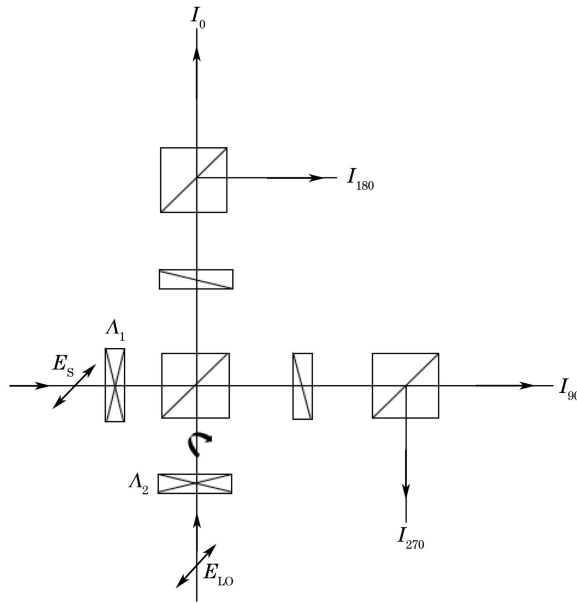


图 2 加入 $1/4$ 波片后的结构示意图

Fig. 2 Structural diagram with $1/4$ wave plate

4 仿真分析

4.1 90° 混频器功能的验证

忽略信道条件、编码方式、大气传输的随机性等外界因素, 只考虑信号光的偏振态变化对混频效率的影响。假定激光器发出的线偏振光经光纤耦合至混频器时为理想状态, 此时偏振夹角为 45° , 线偏振光在水平、垂直两方向上均匀分布, 故 $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = \frac{\sqrt{2}}{2}$ 。当调制相位与初始相位均为 0° 时, 直流、正交两路最终输出光电流的简化形式为

$$I_1 = I_0 - I_{180} = \frac{1}{2} [1 - (\sin 2\theta - \cos 2\theta)] |E_s E_{LO}|, \quad (15)$$

$$I_2 = I_{90} - I_{270} = \frac{1}{2} [1 + (\sin 2\theta + \cos 2\theta)] |E_s E_{LO}|. \quad (16)$$

仿真结果如图 3 所示, 图中纵坐标单位因子 $a = |E_s E_{LO}|$ 。

从图 3 可以看出, 通过控制 $1/4$ 波片快轴夹角, 可以实现直流、交流两支路的相互平衡输出, 且不影响混

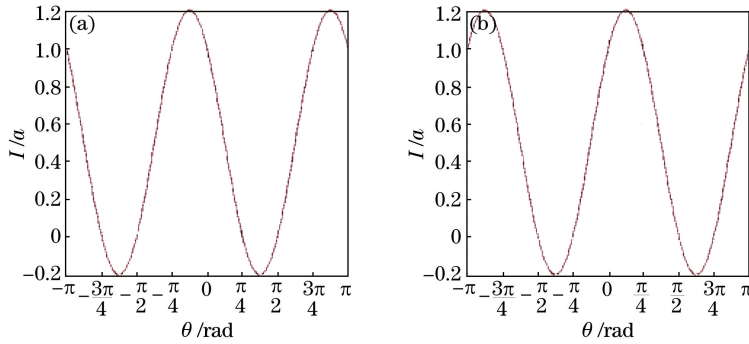


图3 仿真结果。(a) I支路输出光电流;(b) Q支路输出光电流

Fig. 3 Simulation results. (a) Output photocurrent of I branch; (b) output photocurrent of Q branch

频器功能的实现。

4.2 信号光偏振特性对混频效率的影响

根据(8)式,还原(13)、(14)式中的相位信息,为不影响 90° 混频器功能的实现,将第2节计算得到的 $\tau - \rho = \pm \frac{\pi}{4}$ 的关系式也代入公式,可得相位参量 x 、 y 均可以表示为信号光与本振光调制相位差的形式,即 $\varphi(t) - \psi$,则输出光电流为

$$I'_1 = I_0 - I_{180} = \sqrt{2} \left\{ \frac{1}{2} \cos [\varphi(t) - \psi] + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin [\varphi(t) - \psi] \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \sin 2\theta - \frac{\sqrt{2}}{2} \cos 2\theta \right) \right\} |E_s E_{LO}|, \quad (17)$$

$$I'_Q = I_{90} - I_{270} = \sqrt{2} \left\{ \frac{1}{2} \cos [\varphi(t) - \psi] + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin [\varphi(t) - \psi] \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \cos 2\theta + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin 2\theta \right) \right\} |E_s E_{LO}|. \quad (18)$$

当 θ 在 $0 \sim \frac{\pi}{2}$ 之间变化时,模拟不同偏振态的信号光入射时的情况,信号光与本振光相干混频后,得到光电流和的表示形式如(19)式所示。当波片快轴夹角 θ 在 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 之间变化时,仿真得到混频效率的变化如图4(a)所示。当 θ 为 $\pm 45^\circ$ (即入射圆偏振光)时光功率可以达到极值。从公式及仿真曲线中可以看出,函数极值具有对称性,因此只需再考虑 θ 为 $45^\circ \sim 90^\circ$ 时的情况,如图4(b)所示。综上分析,发现当入射圆偏振态信号光时,得到的光功率较大。光电流和 I 和混频效率 η 可以分别表示为

$$I = I'_1 + I'_Q = \sqrt{2} \{ \sin [\varphi(t) - \psi] \sin 2\theta + \cos [\varphi(t) - \psi] \} |E_s E_{LO}|, \quad (19)$$

$$\eta = \frac{I_{\text{actual}}^2}{I_{\text{ideal}}^2} = \frac{\{ \cos [\varphi(t) - \psi] + \sin [\varphi(t) - \psi] \sin 2\theta \}^2}{2}. \quad (20)$$

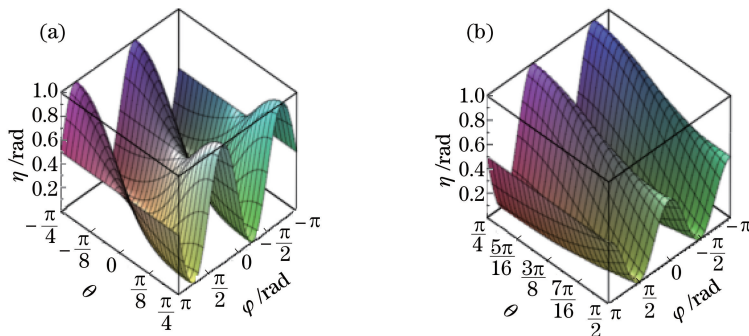


图4 混频效率随波片夹角及调制相位的变化。(a) θ 在 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 之间变化;(b) θ 在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 之间变化

Fig. 4 Variations in mixing efficiency with wave plate angle and modulated phase. (a) θ changes between -45° and 45° ; (b) θ changes between 45° and 90°

在实际空间传输过程中,信号光的偏振态会受到诸多外界因素的影响。圆偏振态的信号光是由激光器发出的线偏振光经过光学系统后得到的,当发出的光束与后续光学系统存在一定的偏角时,信号光的偏振态可能会受到影响而变为椭圆偏振态,此偏角越大代表实际偏离正入射的角度越大,则所得信号光的椭圆度越

大。为分析 θ 对混频效率的影响,将 $\varphi(t) - \psi$ 赋值为 $\frac{\pi}{4}$,并代入(20)式中,得到混频效率随 θ 的变化曲线如图 5 所示。混频效率可表示为

$$\eta = \frac{(1 + \sin 2\theta)^2}{4}. \quad (21)$$

从图 5 可以看出,当 $\theta = \frac{\pi}{4}$ 时,信号光为圆偏振态,混频效率最高,以此为中心,当 θ 向两侧偏移且保持在 $0 \sim \frac{\pi}{2}$ 之间,代表保持信号光与本振光的旋向相同,此时混频效率的对称性减弱,且随着 θ 与 $\frac{\pi}{4}$ 差值的增大(意味着实际入射信号光椭圆度的增大,即激光器发出的线偏振光斜入射到系统的偏角越大),混频效率衰减越明显。当 $\theta = -\frac{\pi}{4}$ 时,信号光与本振光的旋向相反,混频效率较低,在实际系统中,无论是光学系统受外界环境影响时沿光轴方向的误差,还是激光器发出激光的准直误差,产生的偏角都不会这么大,故此种情况可以忽略。当激光器发射的光波正入射到光学系统中时,信号光为圆偏振态,此时混频效率最高;当激光器发射的光波斜入射到光学系统时,入射偏移的角度越大,信号光的椭圆度越大,对混频效率的影响越大。

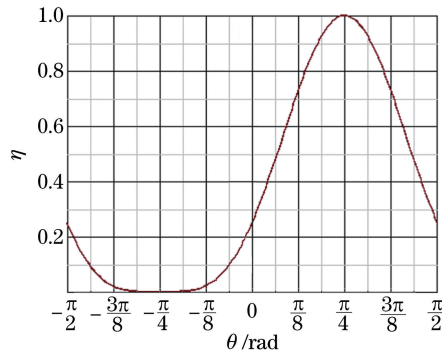


图 5 混频效率随波片夹角的变化

Fig. 5 Variation in mixing efficiency with wave plate angle

5 结 论

采用了一种应用于相干激光通信领域的 90° 混频器,在此基础上提出了研究偏振态对混频效率影响的方法,并进行了数学计算及仿真。在其他限定条件相同的情况下,将信号光分别以圆偏振态及椭圆偏振态进行入射,经相干混频后前者得到更大的输出功率,进而得到更高的混频效率。在空间相干激光通信终端,可以考虑采用圆偏振态信号光进行信息传输,以得到更高的探测灵敏度和提高通信接收性能。对圆偏振态信号光受影响时系统混频效率的变化进行了分析,发现在外界因素的影响下,激光器非正入射到后续光学系统时,信号光变为椭圆偏振态,且斜入射的偏角越大,对混频效率的影响越大。

参 考 文 献

- [1] He Ning, Xie Zhaoling. Effect of beam characteristic on detection efficiency for the coherent optical detection system based on acousto-optic deflection[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0206007.
何 宁, 谢朝玲. 光束特性对声光偏转相干光探测效率的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0206007.
- [2] Li J S, Billah M R, Schindler P C, *et al.* Four-in-one interferometer for coherent and self-coherent detection[J]. Optics Express, 2013, 21(11): 13293-13304.
- [3] 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影响[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1006001.

- [4] Li Xiangyang, Ma Zongfeng, Shi Dele. Effect of Gaussian field distribution on mixing efficiency for coherent detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 539-543.
李向阳, 马宗峰, 石德乐. 高斯光束场分布对相干探测混频效率的影响[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(2): 539-543.
- [5] Garreis R B. 90 degree optical hybrid for coherent receivers[J]. *SPIE*, 1991, 1522: 210-219.
- [6] Zhao Yiyi. Study on the optical system of space coherent optical communication terminal[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015: 73-81.
赵意意. 空间相干光通信终端光学系统研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 2015: 73-81.
- [7] Wang Chao, Jiang Lun, Dong Keyan, *et al.* Analysis of the polarization characteristic of a satellite-to-ground laser communication optical system[J]. *Lasers & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(12): 120607.
王超, 江伦, 董科研, 等. 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.
- [8] Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering optics*[M]. Beijing: China Machine Press, 2013: 162-165.
郁道银, 谈恒英. *工程光学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 162-165.