

doi: 10.3788/gzxb20174606.0606001

空间光混频器分光比调整与 90° 相位差补偿方法

曹海帅^{1,2}, 江伦², 张鹏², 南航^{1,2}, 佟首峰², 张立中²

(1 长春理工大学 光电工程学院, 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, 长春 130022)

摘 要:对空间光混频器的 90° 相位差补偿的几种方法进行了比较分析, 并在此基础上提出了两种新方法. 第一种方法采取旋转本振光支路的 $1/4$ 波片来补偿相位差, 旋转信号光支路的第一个 $1/2$ 波片来调整 I 路与 Q 路分光比; 第二种方法通过旋转本振光支路的 $1/2$ 波片和 $1/4$ 波片到计算出来的角度来实现预定的相位差和分光比. 对两种方法进行仿真分析和系统实验. 采用第一种方法时, $1/4$ 波片快轴与 x 轴的夹角在 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 变化时, 相位差补偿范围为 $-14^\circ \sim 29^\circ$, 分光比在 $0.7 \sim 1.4$ 范围内变化; 当 $1/2$ 波片的快轴与 y 轴的夹角在 $35^\circ \sim 55^\circ$ 变化时, 分光比在 $0.47 \sim 2.1$ 范围内变化. 采用第二种方法求解出 I/Q 路相位差分别为 $80^\circ, 85^\circ, 90^\circ, 95^\circ, 100^\circ$, I/Q 路分光比分别为 $0.5, 0.75, 1, 1.5, 2$ 时, $1/2$ 波片的快轴和 $1/4$ 波片的快轴的位置. 采用这两种方法均可以简单而精确地实现设定的相位差和分光比, 有利于光锁相环的相位锁定以及解调出的信号强度的提高.

关键词:自由空间光通信; 相干通信; 零差; 光混频器; 相位补偿

中图分类号: TN929.13

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)06-0606001-7

Power Ratio Adjustment and 90° Phase Difference Compensation Method of Space Optical Hybrid

CAO Hai-shuai^{1,2}, JIANG Lun², ZHANG Peng², NAN Hang^{1,2},
TONG Shou-feng², ZHANG Li-zhong²

(1 School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 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 130022, China)

Abstract: Based on the comparison and analysis of phase compensation methods of 90° space optical hybrid, two new methods were proposed. The first method is that $1/4$ wave plate on the local oscillator laser branch is rotated to compensate for the phase difference and the first $1/2$ wave plate on the signal laser branch is rotated to adjust the power ratio of I/Q branches. The second method is that $1/2$ wave plate and $1/4$ wave plate on the local oscillator laser branch are rotated respectively to the calculated angle to achieve a predetermined phase difference and power ratio. The simulation analysis and system experiment of the two methods were carried out. The results of the first method show that when the angle between $1/4$ wave plate fast axis and x axis varies from -10° to 10° , the phase difference ranges from -14° to 29° and power ratio ranges from 0.7 to 1.4 ; when the angle between $1/2$ wave plate fast axis and y axis varies from 35° to 55° , the power ratio ranges from 0.47 to 2.1 . The positions of $1/2$ wave plate fast axis and $1/4$ wave plate fast axis were solved by the second method when I/Q phase

基金项目: 国家自然科学基金(No. 91338116)和吉林省优秀青年人才基金(No. 20170520163JH)资助

第一作者: 曹海帅(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光混频器设计与测试. Email: 1109989732@qq.com

导师: 佟首峰(1972-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为航天遥感, 卫星激光通信. Email: tsf1998@sina.com

通讯作者: 江伦(1984-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为光学系统设计、空间激光通信. Email: jlciomp@163.com

收稿日期: 2016-12-22; 录用日期: 2017-03-01

<http://www.photon.ac.cn>

difference is respectively 80° , 85° , 90° , 85° and 100° and the I/Q power ratio is 0.5, 0.75, 1, 1.5 and 2. Either of this two methods can set the phase difference and power ratio simply and precisely, which is advantageous to the phase locking of the optical phase-locked loop and the enhancement of the intensity of the demodulated signal.

Key words: Free-space optical communication; Coherent communications; Homodyning; Optical hybrid; Phase compensation

OCIS Codes: 060.2605; 060.1660; 060.2920

0 引言

在星地通信和星间通信领域中,自由空间激光通信由于在通信速率、通信距离和天线尺寸等方面的优势,越来越受到人们的重视^[1].自由空间激光通信系统传统的调制方式为强度调制-直接检测(Intensity Modulation/Direct Detection, IM/DD)方式,这类系统成熟、简单、成本低,然而 IM/DD 方式没有利用光载波的频率和相位信息,并且由于背景光和热噪声的影响,系统灵敏度与理论灵敏度极限至少相差 20dB^[2].而相干光通信可以采用多种调制方式,有效地利用光载波的频率和相位信息,可以大大提高通信速率;同时由于采用了相干原理解调信号,可以避免背景光的影响,进而提高系统的灵敏度,理论上零差相干光通信的灵敏度可达到量子极限^[3-4].

零差相干光通信系统的相干过程是通过光混频器来实现的^[5-6],信号光与本振光经过 90° 光混频器相干混频后得到相对相位差分别为 0° 、 90° 、 180° 和 270° 的四路信号, 0° 和 180° 信号经过平衡探测器得到同相(In-phase, I)支路信号, 90° 和 270° 信号经过平衡探测器得到正交(Quadrature, Q)支路信号, I、Q 支路信号都输入到 Costas 锁相环用于数据解调和相位锁定. 90° 光混频器的相位误差过大会使解调出的信号强度降低甚至无法锁定相位,因此, 90° 光混频器的相位准确度是 Costas 锁相环正常工作的重要保证^[7-8].

但是偏振分光棱镜分光膜的相位误差、 $1/2$ 波片和 $1/4$ 波片的相位延迟误差等因素^[9-11],使得光混频器 I、Q 路的相位差与理想的 90° 有偏差,因此,需要采取相位补偿措施.周煜^[12]等提出采取旋转 $1/4$ 波片来补偿相位差,但是没有给出 $1/4$ 波片旋转的角度与补偿相位的关系曲线图.郑阳等^[13]提出了旋转晶体来补偿相位,但是补偿的角度范围小.赵意意^[14]等仿真了 $1/4$ 波片旋转的角度与补偿的相位关系曲线图以及与 I、Q 路分光比的关系曲线图,但是没有给出调整 I、Q 路分光比的措施.本文提出在信号光支路加一个 $1/2$ 波片的方法,来调节由于旋转 $1/4$ 波片补偿相位差所引起的 I、Q 路分光比的变化.

1 空间光混频器光学原理

图 1 为空间光混频器示意图,图中 E_s 和 E_{i0} 分别为信号光和本振光,元件 1 为 $1/4$ 波片,元件 2 为偏振分光棱镜(Polarization Beam Splitter, PBS),元件 3 为 $1/2$ 波片,元件 4 为偏振分光棱镜^[15].将各元件用琼斯矩阵来表示,可以推导出四路输出的结果.

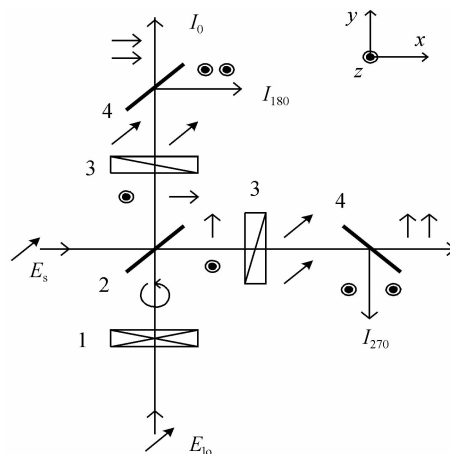


图 1 空间光混频器示意图
Fig. 1 Schematic diagram of space optical hybrid

入射的信号光为

$$\mathbf{E}_s = E_s(x, y, z) \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \end{pmatrix} \exp(i\varphi(t)) \quad (1)$$

式中, $E_s(x, y, z) = E_s(x, y) \exp[i(kz - \omega t)]$, k_1 的方向平行于 y 轴, k_2 的方向平行于 z 轴, $k_1^2 + k_2^2 = 1$, $\varphi(t)$ 为信号光的调制相位.

与信号光表述类似,本振光为

$$\mathbf{E}_{l_0} = E_{l_0}(x, y, z) \begin{pmatrix} k_3 \\ k_4 \end{pmatrix} \exp(i\varphi) \quad (2)$$

快轴方向平行于 x 轴的 $1/4$ 波片为

$$\mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix} \quad (3)$$

本振光经过 $1/4$ 波片后为

$$\mathbf{E}'_{l_0} = \mathbf{A}_1 \mathbf{E}_{l_0} = E_{l_0} \begin{pmatrix} ik_3 \\ k_4 \end{pmatrix} \exp(i\varphi - \pi/4) \quad (4)$$

偏振分光棱镜的反射琼斯矩阵和透射琼斯矩阵分别为

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & r \exp(i\rho) \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} t \exp(i\tau) & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

对于理想的偏振分光棱镜来说, $r = t = 1$.

快轴方向与 z 轴成 22.5° 的 $1/2$ 波片,可用矩阵表示为

$$\mathbf{A}_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

信号光和本振光每经过一个元件时都被左乘对应元件的琼斯矩阵,最后得到四路信号的强度为

$$I_0 = 1/2 \{ k_2^2 |E_s|^2 + k_3^2 |E_{l_0}|^2 + 2k_2 k_3 |E_s E_{l_0}| \cos(\varphi(t) + \rho - \tau - \pi/2 - (\varphi - \pi/4)) \} \quad (8)$$

$$I_{180} = 1/2 \{ k_2^2 |E_s|^2 + k_3^2 |E_{l_0}|^2 - 2k_2 k_3 |E_s E_{l_0}| \cos(\varphi(t) + \rho - \tau - \pi/2 - (\varphi - \pi/4)) \} \quad (9)$$

$$I_{90} = 1/2 \{ k_1^2 |E_s|^2 + k_4^2 |E_{l_0}|^2 + 2k_1 k_4 |E_s E_{l_0}| \cos(\varphi(t) + \tau - \rho - (\varphi - \pi/4)) \} \quad (10)$$

$$I_{270} = 1/2 \{ k_1^2 |E_s|^2 + k_4^2 |E_{l_0}|^2 - 2k_1 k_4 |E_s E_{l_0}| \cos(\varphi(t) + \tau - \rho - (\varphi - \pi/4)) \} \quad (11)$$

令 $\varphi = \rho - \tau - \pi/4$, 可得到

$$I_0 - I_{180} = 2k_2 k_3 |E_s E_{l_0}| \cos(\varphi(t)) \quad (12)$$

$$I_{90} - I_{270} = 2k_1 k_4 |E_s E_{l_0}| \cos(\varphi(t) + 2(\tau - \rho) + \pi/2) \quad (13)$$

理想情况下, $(\tau - \rho)$ 为 $\pi/2$ 的整数倍,最终得到两路相差 90° 的信号.

2 90°相位差补偿原理

赵意意等^[14]仿真了 $1/4$ 波片旋转的角度与 I/Q 路相位差、I/Q 路分光比的关系曲线图,对于旋转 $1/4$ 波片造成的 I/Q 路分光比变化给出的措施是旋转 $1/4$ 波片前的 $1/2$ 波片来调整分光比.

经过实验发现,当旋转 $1/2$ 波片调整分光比时,相位差仍会有较大的变化,仅当 $1/4$ 波片的快轴与 x 轴重合时,相位差没有变化,如图 2 中实线所示.而当 $1/4$ 波片的快轴与 x 轴的夹角为 5° ,且本振光支路的 $1/2$ 波片的快轴与 x 轴的夹角 β_1 在 $35^\circ \sim 55^\circ$ 变化时, I/Q 路相位差在 $275^\circ \sim 258^\circ$ 变化;当 $1/4$ 波片的快轴与 x 轴的夹角为 -5° ,且本振光支路的

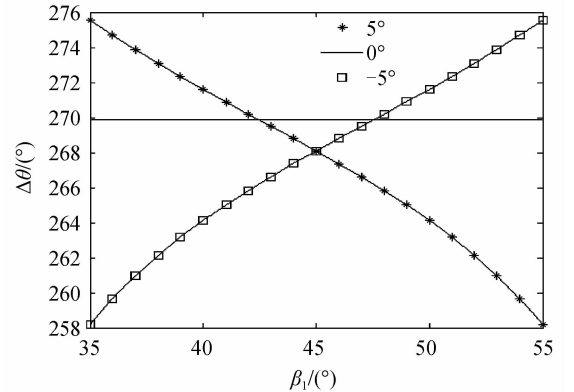


图 2 I/Q 路相位差随本振光支路 $1/2$ 波片旋转角度变化曲线
Fig. 2 Change curve of I/Q phase difference with $1/2$ waveplate rotated angle of the local oscillator

1/2 波片的快轴与 x 轴的夹角 β_1 在 $35^\circ \sim 55^\circ$ 变化时, I/Q 路相位差在 $258^\circ \sim 275^\circ$ 变化. 因此, 旋转 1/4 波片补偿相位差之后, 无法再单独通过旋转 1/2 波片来调整分光比.

对于上述问题提出了两种解决方法, 第一种方法考虑信号光支路没有 1/4 波片, 所以将本振光支路的 1/2 波片移到信号光支路, 通过旋转它来调整 I/Q 支路的光分比. 采取这种措施的好处是调节分光比不会干扰到相位差的变化, 先旋转 1/4 波片来补偿相位, 再旋转 1/2 波片调整分光比, 这样即可快速地调节到所需要的相位差和分光比.

第二种方法 1/2 波片仍然在本振光支路, 以 1/2 波片快轴与 x 轴夹角 β_1 、1/4 波片快轴与 x 轴夹角 β_2 为自变量, 分别对相位差和分光比建立方程, 预定的相位差和分光比作为已知参量, 通过 MATLAB 软件编写程序可求得 β_1 和 β_2 , 将 1/2 波片快轴和 1/4 波片快轴调整到相应的角度可实现所需要的相位差和分光比.

第一种方法可不必计算, 边观察边调整即能得到目标结果; 第二种方法则必须事先计算, 再调节波片到所计算出的位置实现来目标结果.

3 分光比调整与 90° 相位差补偿方

3.1 第一种方法

通过 MATLAB 对旋转 1/4 波片对 I/Q 路相位差及分光比的影响进行仿真, 本振光的偏振方向与 x 轴夹角为 45° , 由文献[16-17]可得, 在只考虑 1/4 波片对 I/Q 路相位差影响时, I/Q 路相位差为

$$\Delta\theta = 2\arctan\left(\left(\tan\frac{\delta_1}{2}\right) \times \frac{k_4 \cos 2\theta_1 - k_3 \sin 2\theta_1}{k_4}\right) \quad (14)$$

式中, $\delta_1 = \pi/2$ 为 1/4 波片延迟, $k_3 = 0.707$ 为本振光 P 波分量, $k_4 = 0.707$ 为本振光 S 波分量, θ_1 为 1/4 波片快轴与 x 轴夹角, 波片快轴顺时针旋转到 x 轴时夹角为正, 逆时针为负.

当 θ_1 在 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 变化时, I/Q 路相位差 $\Delta\theta$ 的变化情况如图 3 实线所示. 从图中可以看出当 $\theta_1 = 0^\circ$ 时, 相位差 $\Delta\theta = 270^\circ$ (即 -90°); 当 $\theta_1 = -10^\circ$ 时, 相位差 $\Delta\theta = 284^\circ$, 相对 $\theta_1 = 0^\circ$ 时改变了 -14° ; 当 $\theta_1 = 10^\circ$ 时, 相位差 $\Delta\theta = 241^\circ$, 相对 $\theta_1 = 0^\circ$ 时改变了 29° . 相位差改变量 φ 在 $-14^\circ \sim 29^\circ$ 范围内变化足以补偿由器件工艺、装调等因素引起的相位误差.

另一方面, 当旋转 1/4 波片来补偿相位误差时, 会引起 I/Q 路分光比的变化. 将所有的偏振元件都用琼斯矩阵表示, 利用 MATLAB 仿真了当 θ_1 在 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 变化时, I/Q 分光比 η 的变化情况如图 4 中实线所示. 在 θ_1 从 0° 旋转到 -10° 过程中, 分光比不断减小, 说明 I 支路能量在减小, Q 支路能量在增加, 而 I 支路能量的减小会导致解调出信号强度的降低; 在 θ_1 从 0° 旋转到 10° 过程中, 分光比不断增加, 说明 I 支路能量在增加, Q 支路能量在减小, Q 支路能量的减小会导致无法鉴相. 因此, 需要一种调节分光比的措施来调整由于旋转 1/4 波片引起的分光比变化.

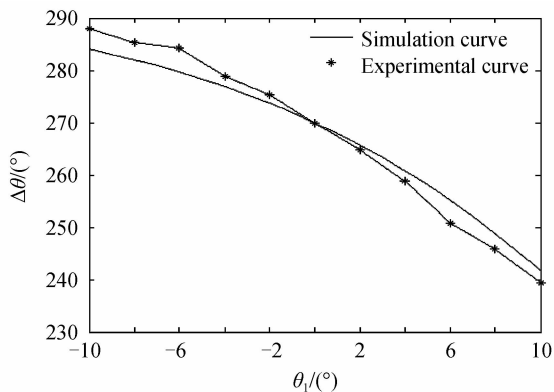


图 3 I/Q 路相位差随 1/4 波片旋转角度变化曲线
Fig. 3 Change curve of I/Q phase difference with 1/4 waveplate rotated angle

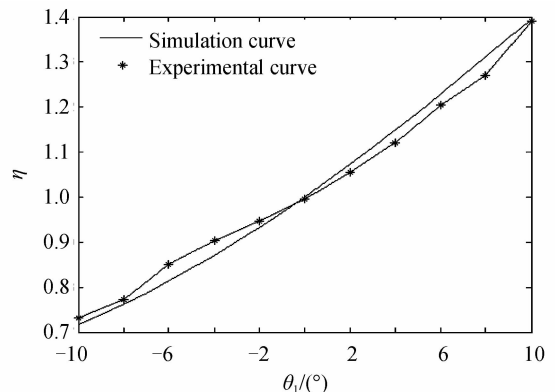


图 4 I/Q 分光比随 1/4 波片旋转角度变化曲线
Fig. 4 Change curve of I/Q power ratio with 1/4 waveplate rotated angle

文献[6]提出了在本振光支路的 1/4 波片前加 1/2 波片, 通过旋转 1/2 波片来调节分光比. 通过 MATLAB 仿真这种方法发现, 当旋转 1/4 波片补偿完相位后, 旋转 1/2 波片来调节分光比时, I/Q 路相位差

依然会改变,仅在1/4波片快轴 x 轴重合时,旋转1/2波片不会改变I/Q路相位差。

考虑将本振光支路的1/2波片移到信号光支路,此时旋转1/2波片会改变分光比,但不会对I/Q路相位差产生影响。通过MATLAB对旋转1/2波片对I/Q分光比的影响进行仿真分析,信号光的偏振方向与 y 轴成 45° ,1/2波片初始快轴与信号光的偏振方向重合,1/2波片快轴与 y 轴夹角 α 在 $35^\circ\sim 55^\circ$ 变化时,I/Q路分光比的变化如图5中实线所示。1/2波片在 -10° 到 10° 区间内旋转时,信号光中S波分量不断增大,所以I/Q路分光比由0.47逐渐增大到2.1。图5中实线的变化幅度要大于图4实线的变化幅度,因此说明调节1/2波片的角度足以调节1/4波片旋转引起的分光比变化。

3.2 第二种方法

第二种方法将1/2波片放置在本振光支路,分别设1/2波片快轴与 x 轴夹角为 β_1 ,1/4波片快轴与 x 轴夹角为 β_2 ,波片快轴顺时针旋转到 x 轴时夹角为正,逆时针为负。由文献[16-17]可得,在只考虑1/2波片和1/4波片对I/Q路相位差影响时,I/Q路相位差为

$$\Delta\theta = 2\arctan\left[\left(\tan\frac{\delta_1}{2}\right) \times \frac{k_4 \cos 2\beta_2 - k_3 \sin 2\beta_2}{k_4}\right] \quad (15)$$

式中, $\delta_1 = \pi/2$ 为1/4波片延迟, β_2 为1/4波片快轴与 x 轴夹角。初始的本振光偏振方向与 x 轴夹角为 45° ,经过1/2波片后偏振方向改变,为了简便设经过1/2波片后的本振光偏振方向与 x 轴夹角为 β_3 ,所以 $k_3 = \cos(\beta_3)$ 、 $k_4 = \sin(\beta_3)$, $\beta_1 = (\beta_3 + 45^\circ)/2$ 。

由文献[16]可得,在只考虑1/2波片和1/4波片对I路 0° 输出信号强度的影响时,有

$$I_0 = \frac{1}{4} + \frac{1}{4}[\cos^2 \beta_3 + \cos^2(\beta_3 - 2\beta_2)] + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\frac{1}{2}(\cos^2 \beta_3 + \cos^2(\beta_3 - 2\beta_2))} \quad (16)$$

在只考虑1/2波片和1/4波片对Q路 90° 输出信号强度的影响时,有

$$I_{90} = \frac{1}{4} + \frac{1}{4}[\sin^2 \beta_3 + \sin^2(\beta_3 - 2\beta_2)] + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\frac{1}{2}[\sin^2 \beta_3 + \sin^2(\beta_3 - 2\beta_2)]} \quad (17)$$

此时可求得I/Q路的光分比为

$$\eta = I_0 / I_{90} \quad (18)$$

已知相位差 $\Delta\theta$ 和分光比 η 时,联立式(15)和(18)建立方程组,采用MATLAB编写二分法程序可解得 β_2 和 β_3 ,进而求得 β_1 。

表1 第二种方法解出的 β_1 、 β_2

Table 1 β_1 and β_2 solved by the second method

$\Delta\theta$	η	0.5	0.75	1	1.5	2
80°	β_1	50.01	45.79	42.45	37.53	34.01
	β_2	-11.26	-6.69	-4.98	-3.30	-2.38
85°	β_1	52.59	47.55	43.68	38.41	34.72
	β_2	-5.33	-3.37	-2.49	-1.65	-1.20
90°	β_1	64.76	49.13	45.09	39.29	35.24
	β_2	0	0	0	0	0
95°	β_1	57.57	50.89	46.32	39.99	35.77
	β_2	5.31	3.37	2.51	1.65	1.19
100°	β_1	61.44	52.65	47.55	40.87	36.47
	β_2	11.37	6.75	5.01	3.31	2.40

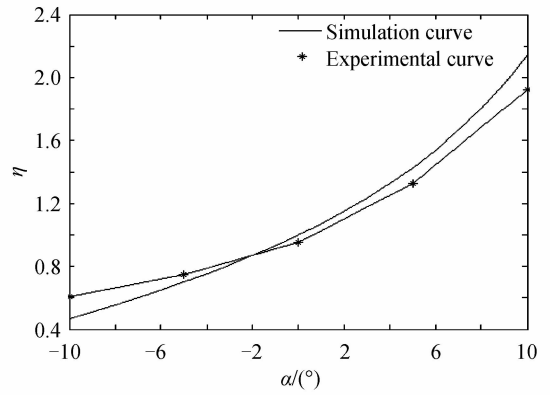


图5 I/Q分光比随1/2波片旋转角度变化曲线
Fig. 5 Change curve of I/Q power ratio with 1/2 waveplate rotated angle

采用该方法可求解任意的相位差和分光比的组合,取典型值进行计算,设 I/Q 路相位差分别为 80° 、 85° 、 90° 、 95° 、 100° , I/Q 路分光比分别为 0.5、0.75、1、1.5、2. 所求得 β_1 和 β_2 见表 1.

4 实验验证

针对提出的两种补偿方法搭建实验系统进行验证. 采用两个 1 550 nm 窄线宽半导体激光器分别作为信号光和本振光,用保偏光纤将两个激光器分别连接到两个偏振控制器上,再连接到两个光纤准直器上. 从光纤准直器射出的光进入光混频器进行相干混频,将输出的光信号接到两个平衡探测器上得到电信号,将得到的电信号接入到示波器中进行观察测量,实验系统的示意图如图 6,空间光混频器实物图如 7. 所采用激光器线宽为 500 kHz,最大输出功率为 19 dBm,从光纤准直器射出的光的功率为 10 dBm.

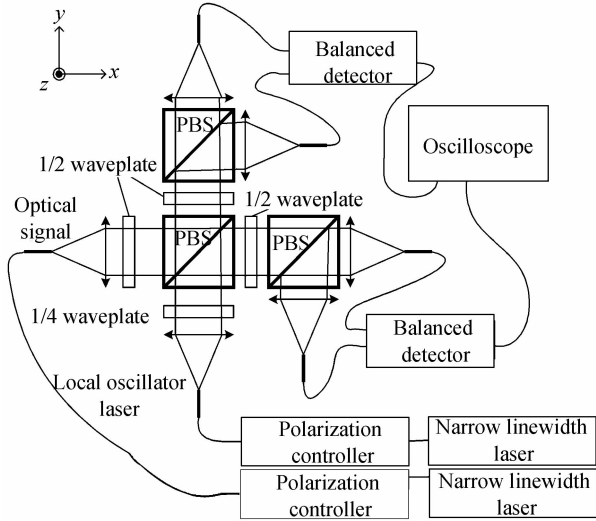


图 6 实验系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of experiment system

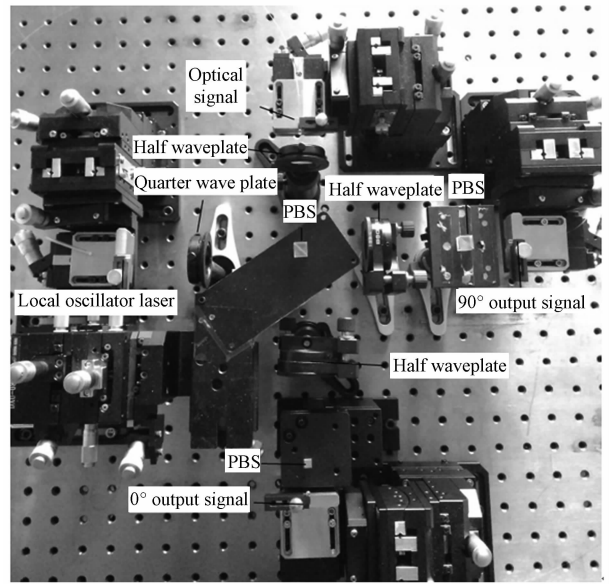


图 7 空间光混频器

Fig. 7 Space optical hybrid

表 2 第二种方法实验数据

Table 2 Experimental data of the second method

Parameter	Value				
β_1	50	46	42	38	34
β_2	-11.3	-6.7	-5	-3.30	-2.4
$\Delta\theta, \eta$	79,0.5	80,0.74	79,1	81,1.6	78,2
β_1	52	48	44	38	35
β_2	-5.3	-3.4	-2.5	-1.7	-1.2
$\Delta\theta, \eta$	83,0.5	85,0.78	84,1	85,1.5	86,2.1
β_1	65	49	45	39	35
β_2	0	0	0	0	0
$\Delta\theta, \eta$	90,0.5	90,0.75	90,1	90,1.5	90,2
β_1	58	51	46	40	36
β_2	5.3	3.4	2.5	1.7	1.2
$\Delta\theta, \eta$	96,0.5	95,0.76	95,1	94,1.4	95,2
β_1	61	53	48	41	36
β_2	11.4	6.8	5.0	3.3	2.4
$\Delta\theta, \eta$	99,0.5	98,0.74	100,1	99,1.5	99,2

对于第一种方法,首先用偏振态测试仪分别测量本振光和信号光的偏振,同时调整偏振控制器使信号光为线偏振光并且偏振方向与 y 轴成 45° ,使本振光为线偏振光并且偏振方向与 x 轴成 45° . 接着用空间光探测器测量由光纤准直器射出的光的功率,调整激光器功率使信号光和本振光功率为 10 dBm. 所使用 PBS 的

P波透过率大于99.8%,S波透射率小于0.005%,因此,PBS所产生的插入损耗不一致的情况几乎可以不用考虑.空间光耦合进单模光纤所产生的插入损耗不一致情况需重点考虑,用探测器分别测量光纤耦合前光功率和光纤耦合后光功率,保证各组光纤耦合效率一致,尽可能排除光纤插入损耗对分光比的影响.旋转1/4波片使得波片的快轴与 x 轴的夹角在 $-10^\circ\sim 10^\circ$ 变化,I/Q路相位差及分光比的变化如图2和图3中的星号曲线所示.旋转信号光支路的第一个1/2波片使得波片的快轴与 y 轴的夹角在 $35^\circ\sim 55^\circ$ 变化,I/Q路分光比变化如图4中星号曲线所示.图2~4中的实线和星号曲线基本吻合,从而印证了MATLAB仿真分析的正确性.对于第二种方法,只需将1/2波片和1/4波片调整到相应的位置,最后得到表2的数据,与仿真的数据接近.

5 结论

对空间光混频器的90°相位差补偿方法和分光比的调整措施进行了分析,并在此基础之上提出了两种新的方法.第一种方法通过旋转本振光支路上的1/4波片来补偿相位差,旋转信号光支路的第一个1/2片来调整I/Q支路的分光比,采用这种方式的优点是旋转1/2波片不会对相位差有影响,可以快速准确地调整到预想的相位差和分光比.第二种方法1/2波片和1/4波片都在本振光支路,通过编写的程序求解出1/2波片和1/4波片快轴的位置.对于两种方法进行了仿真分析和实验验证.采用第一种方法时1/4波片快轴与 x 轴的夹角在 $-10^\circ\sim 10^\circ$ 变化时,相位差改变量 φ 在 $-14^\circ\sim 29^\circ$ 范围内变化,足以补偿由器件工艺、装调等因素引起的相位误差;在补偿相位差的过程中,分光比的变化在0.7~1.4范围内,而当1/2波片的快轴与 y 轴的夹角在 $35^\circ\sim 55^\circ$ 变化时,分光比在0.47~2.1范围内变化,足以调整由于补偿相位差引起的分光比变化.采用第二种方法求解了I/Q路相位差分别为 80° 、 85° 、 90° 、 95° 、 100° ,I/Q路分光比分别为0.5、0.75、1、1.5、2时,1/2波片的快轴和1/4波片的快轴的位置.针对不同的情况,采用这两种方法均可以简单而精确地实现设定的相位差和分光比.

参考文献

- [1] SMUTNY B, LANGE R, MüHLNIKEL G, *et al.* 5.6Gbps optical intersatellite communication link[C]. SPIE, 2009, **7199**: 719906.
- [2] 李玉权,朱勇,王江平.光通信原理与技术[M].北京:科学出版社,2006:198-203.
- [3] 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,2010:1-22.
- [4] 李岩.相干光通信技术的研究[D].北京:北京邮电大学,2009.
- [5] 李晓峰.星地激光通信链路原理与技术[M].北京:国防工业出版社,2007:6-46.
- [6] LANGE R, SMUTNY B. Optical inter-satellite links based on homodyne BPSK modulation: heritage, status, and outlook[C]. SPIE, 2005: 1-12.
- [7] 徐爱民.零差相干光通信调制解调技术研究[D].成都:电子科技大学,2012, 25-28.
- [8] LI Xiang-yang, MA Zong-feng, SHI De-le. Effect of Gaussian fields distribution on mixing efficiency forcoherent 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.
- [9] HSIEH Y C. Free-space optical hybrid: US, 7864433 [P]. 2011-01-04
- [10] SEIMETZ M, WEINERT C M. Options, feasibility, and availability of 2×4 90° hybrids for coherent optical systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(3): 1317-1322.
- [11] WAN Ling-yu, ZHOU Yu, LIU Li-ren, *et al.* Realization of a free-space 2×4 90° optical hybrid based on the birefringence and electro-optic effects of crystals[J]. *Journal of Optics*, 2013, **15**(3): 1-6.
- [12] ZHOU Yu, WAN Ling-yu, ZHI Ya-nan, *et al.* Polarization-splitting 2×4 90° free-space optical hybrid with phase compensation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009,**29**(12): 3291-3294.
周煜,万玲玉,职亚楠,等.相位补偿偏振分光 2×4 90°自由空间光学桥接器[J].光学学报,2009,**29**(12):3291-3294.
- [13] ZHENG Yang, JIANG Hui-lin, TONG Shou-feng, *et al.* Opto-mechanical structure design of the space optical hybrid based on space coherent laser communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(9): 0906008.
郑阳,姜会林,佟首峰,等.基于相干激光通信空间光混频器光机结构设计 [J]. 光学学报,2013, **33**(9): 0906008.
- [14] 赵意意.空间相干光通信终端光学系统研究 [D].西安:中国科学院西安光学精密机械研究所.
- [15] GARREIS R B, CARL Z. 90° optical hybrid for coherent receivers[C]. SPIE, 1991, **1522**: 124-131.
- [16] 周凌尧.相干光通信中的90°光混频器[D].成都:电子科技大学,2011.
- [17] 岳浩.基于90°光混频器的零差相干光通信[D].成都:电子科技大学,2014.