

基于相干激光通信空间光混频器数学模型的建立

郑 阳¹ 姜会林² 佟首峰² 郑建平¹ 贺文俊¹

¹ 长春理工大学光电工程学院, 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

摘要 从自由空间相干激光通信接收机的核心部件空间光混频器的光学原理出发, 基于其在相干接收系统中所起的作用, 建立了一套利用介质膜偏振分光棱镜(PBS)交叉分光构成方式的结构模型。研究结构模型中各光学元件对信号光与本振光作用的数学关系式, 最终建立出空间光混频器的数学模型。该数学模型向具体结构演化, 通过实验佐证了空间光混频器数学模型的正确性及其合理性。空间光混频器数学模型具体指出了各种光学元件相对摆放位置及其相对角度和相位补偿晶体的补偿范围及其调整方式, 对未来高性能空间光混频的研制与改进有重大的指导意义。

关键词 光通信; 空间光混频器; 相干; 数学模型; 自由空间

中图分类号 TN929.13 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0706024

Establishment of Space Light Mixer Mathematical Model Based on the Space Coherent Laser Communication

Zheng Yang¹ Jiang Huilin² Tong Shoufeng² Zheng Jianping¹ He Wenjun¹

¹ College of Opto-Electronic Engineering, ChangChun University of Science and Technology, ChangChun, Jilin 130022, China

² Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Space-Ground Laser Communication Technology, ChangChun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract From the optical principle of spatial light mixer which is the core-block of the free space coherent laser communication receiver, based on it's importance in the coherent receiver system, a structure model of the spatial light mixer is established by dielectric film polarization beam splitting (PBS) cross-spectral. Meanwhile, the mathematical relationship of optical signal and local oscillator laser effected by each optical component in the structure model is studied and the spatial light mixer mathematical model is established finally. With the mathematical model evolved to the specific structure, the correctness and rationality of mathematical model of the spatial light mixer are evidenced by experiment. The mathematical model of spatial light mixer points out not only the relative placement of various optical components, their relative angles, but also the compensating scope of crystal phase compensation and its adjustment method, which has a great guiding significance for the development and improvement of high-performance spatial light mixer in the future.

Key words optical communications; space light mixer; coherence; mathematical model; free space

OCIS codes 060.4510; 060.1660; 060.2920; 080.2720; 230.5480

1 引 言

相干激光通信作为一种星际间高速率信息极具潜力的技术手段^[1-3], 已成为各国研究的热点。利

用自由空间传输光信号的相干激光通信系统, 信号光与本振光的混频应在空间中进行。不同于光纤激光通信中信号光与本振光的混频和相应的相位延迟

收稿日期: 2013-03-26; **收到修改稿日期**: 2013-05-05

基金项目: 国家 863 计划(2011AA701111)

作者简介: 郑 阳(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事空间相干激光通信方面的研究。E-mail: 747421565@qq.com

导师简介: 姜会林(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学系统设计、光电检测技术和激光通信技术等方面的研究。E-mail: hljiang@cust.edu.cn

在光纤和波导中完成的情况^[4-5],其主要原因是远处传输来的信号光功率较弱,相对位置和方向性较差,再考虑空间光到光纤耦合效率等因素,信号光与本振光的混频应于光纤耦合前的空间信道完成,故其光束相对孔径必然很大。从现有研究归纳主要有两种形式:1)利用晶体双折射^[6-8]使信号光与本振光混频,两光在晶体中的路径差异又构成了输出相对相位延迟量值;2)利用光学膜进行光路交叉混合使信号光与本振光混频,介面分光产生输出相位量值的一部分,之后再分光延迟产生所需要的几路输出。目前尚没有针对该类型空间光混频结构原理的统一数学模型,实践中多是针对一事一物的孤立研究讨论,不利于对混频结构方式的全局把握。本文针对介质膜偏振分光棱镜(PBS)交叉分光混频结构的抽象,进行空间光混频器数学模型的导出。

2 空间光混频器数学模型的建立

根据笛卡尔坐标系的标定原则建立如图1所示的直角坐标系。 x 轴在纸面内竖直向上, y 轴垂直于纸面向外, z 轴在纸面内水平向右。 z_s 和 z_l 分别代表信号光和本振光的传播方向。 x_s 和 y_s 分别代表信号光振动方向在 x 轴和 y 轴方向上的分量, x_l 和 y_l 分别代表本振光振动方向在 x 轴和 y 轴方向上的分量。 W_s 和 W_l 分别代表信号光与本振光光路中所对应的波片, x_{ws} 和 x_{wl} 分别代表信号光与本振光光路中所对应波片的快轴方向, y_{ws} 和 y_{wl} 分别代表信号光与本振光光路中所对应波片的慢轴方向。

$\exp(i\delta_{ws})$ 和 $\exp(i\delta_{wl})$ 分别代表信号光与本振光光路中所对应的波片慢轴相对于快轴的相位延迟。 α_1 和 α_2 分别代表信号光与本振光光路中所对应波片绕光轴 z 旋转的角度, x_{TS} 和 y_{TS} 分别代表信号光光路中相位补偿所用晶体的快轴与慢轴方向, $\exp(i\delta_{TS})$ 和 $\exp(i\delta_{TL})$ 代表信号光与本振光光路中相位补偿所用晶体慢轴相对于快轴的相位延迟。 x_{TL} 和 y_{TL} 分别代表本振光光路中相位补偿所用晶体的快轴与慢轴方向, μ_1 和 μ_2 分别代表信号光和本振光光路中所对应的相位补偿晶体绕光轴 z_s 和 z_l 旋转的角度。①和②代表信号光在 y 轴和 x 轴上分量所对应的光路,③和④代表本振光在 x 轴和 y 轴上分量所对应的光路。光学元件F可以将信号光的p波与本振光的s波混合在一起,把信号光的s波与本振光的p波混合在一起。信号光经过光学元件F透射和反射分别产生的相位为 $\exp(i\delta_{r1})$ 和 $\exp(i\delta_{t1})$ 。本振光经过光学元件F透射和反射产生的相位为 $\exp(i\delta_{r2})$ 和 $\exp(i\delta_{t2})$ 。光学元件F右上方和右下方脚标分别代表A端口和B端口出射, x_a 和 y_a 分别代表A端口出射光 x 轴和 y 轴方向, x_b 和 y_b 代表B端口出射光 x 轴和 y 轴方向。 W_a 和 W_b 分别代表A端口和B端口出射光所对应的波片。 x_{wa} 和 y_{wa} 分别代表A端口出射光所对应波片的快轴与慢轴。 $\exp(i\delta_{wa})$ 和 $\exp(i\delta_{wb})$ 分别代表A端口和B端口出射光所对应波片的慢轴相对于快轴的相位延迟, x_{wb} 和 y_{wb} 代表B端口出射光所对应波片的快轴与慢轴, β_1 和 β_2 分别代表A端口和B端口出射光

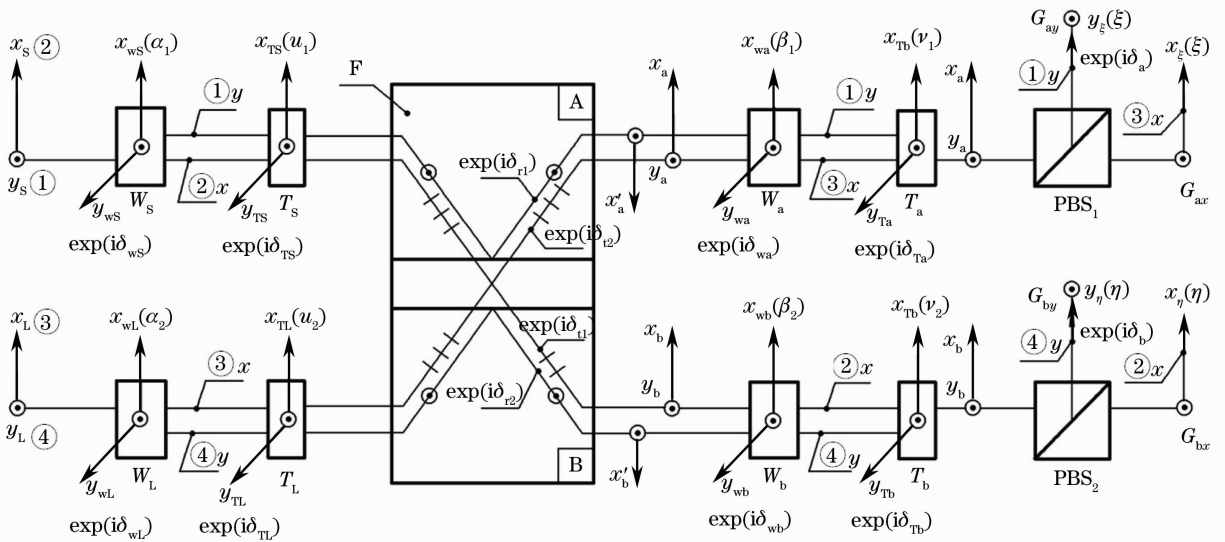


图1 空间光混频器内部光学元件结构模型

Fig. 1 Structure model of internal optical element for spatial light mixer

光路所对应波片绕光轴旋转的角度。 T_a 和 T_b 分别代表 A 端口和 B 端口出射光光路调节相位所用晶体, x_{Ta} 和 y_{Ta} 分别代表 A 端口出射光光路调节相位所用晶体的快轴与慢轴方向, x_{Tb} 和 y_{Tb} 分别代表 B 端口出射光光路调节相位所用晶体的快轴与慢轴方向, $\exp(i\delta_{Ta})$ 和 $\exp(i\delta_{Tb})$ 分别代表 A 端口和 B 端口出射光光路调节相位所用晶体慢轴相对于快轴的相位延迟, ν_1 和 ν_2 分别代表 A 端口和 B 端口出射光光路调节相位所用晶体绕光轴旋转的角度。PBS₁ 和 PBS₂ 分别代表 A 端口和 B 端口出射光光路所对应的 PBS。 ξ 和 η 分别代表 A 端口和 B 端口出射光光路中所对应的 PBS 绕光轴旋转的角度, $\exp(i\delta_a)$ 和 $\exp(i\delta_b)$ 分别代表 A 端口和 B 端口出射光光路所对应的偏振分光棱镜反射 s 波光束相对于透射 p 波光束产生的相位。 G_{ax} 和 G_{ay} 分别代表 A 端口出射光经过 PBS₁ 后分成的两路输出端口, G_{bx} 和 G_{by} 代表 B 端口出射光经过 PBS₂ 后分成的两路输出端口。

信号光 \mathbf{E}_s 可表示为

$$\mathbf{E}_s = \mathbf{A}_s \exp[i(\mathbf{k}_s \cdot \mathbf{r}_s - \omega_s t + \varphi_s)] = \begin{bmatrix} \cos \theta_s \\ \sin \theta_s \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{E}}_s, \quad (1)$$

本振光 \mathbf{E}_L 可表示为

$$\mathbf{E}_L = \mathbf{A}_L \exp[i(\mathbf{k}_L \cdot \mathbf{r}_L - \omega_L t + \varphi_L)] = \begin{bmatrix} \cos \theta_L \\ \sin \theta_L \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{E}}_L, \quad (2)$$

式中, θ_s 和 θ_L 分别代表信号光振动方向 \mathbf{A}_s 与 x_s 轴的夹角和 \mathbf{A}_L 与 x_L 轴的夹角, A_s 和 A_L 分别代表信号光和本振光的振幅, \mathbf{k}_s 代表波矢量信号光的传播方向, \mathbf{r}_s 和 \mathbf{r}_L 分别代表信号光和本振光的传播距离, ω_s 和 ω_L 分别代表信号光的角频率, t 代表时间, φ_s 和 φ_L 分别代表信号光和本振光的初相位, $\tilde{\mathbf{E}}_s$ 和 $\tilde{\mathbf{E}}_L$ 分别代表信号光与本振光的复振幅。

根据图 1 所示的空间光混频器内部光学元件的结构模型, 详细研究信号光与本振光经过每一块光学元件后的数学关系式, 最终建立出空间光混频器输出端口的数学模型。

$$\begin{aligned} G_{ax} = & \{ [g_3 \exp(i\delta_{t2}) \cos(\beta_1 \tilde{\mathbf{E}}_L) + g_1 \exp(i\delta_{r1}) \sin(\beta_1 \tilde{\mathbf{E}}_s)] \cos(\nu_1 - \beta_1) + \\ & \{ [-g_3 \exp(i\delta_{t2}) \sin(\beta_1 \tilde{\mathbf{E}}_L) + g_1 \exp(i\delta_{r1}) \cos(\beta_1 \tilde{\mathbf{E}}_s)] \exp(i\delta_{wa}) \} \sin(\nu_1 - \beta_1) \} \cos(\xi - \nu_1) + \\ & \{ - [g_3 \exp(i\delta_{t2}) \cos(\beta_1 \tilde{\mathbf{E}}_L) + g_1 \exp(i\delta_{r1}) \sin(\beta_1 \tilde{\mathbf{E}}_s) \exp(i\delta_{r1})] \sin(\nu_1 - \beta_1) \exp(i\delta_{Ta}) + \\ & \{ [-g_3 \exp(i\delta_{t2}) \sin(\beta_1 \tilde{\mathbf{E}}_L) + g_1 \cos(\beta_1 \tilde{\mathbf{E}}_s)] \exp(i\delta_{wa}) \} \cos(\nu_1 - \beta_1) \exp(i\delta_{Ta}) \} \sin(\xi - \nu_1), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} G_{ay} = & - \{ [g_3 \exp(i\delta_{t2}) \cos(\beta_1 \tilde{\mathbf{E}}_L) + g_1 \exp(i\delta_{r1}) \sin(\beta_1 \tilde{\mathbf{E}}_s)] \cos(\nu_1 - \beta_1) + \\ & \{ [-g_3 \exp(i\delta_{t2}) \sin(\beta_1 \tilde{\mathbf{E}}_L) + g_1 \exp(i\delta_{r1}) \cos(\beta_1 \tilde{\mathbf{E}}_s)] \exp(i\delta_{wa}) \} \sin(\nu_1 - \beta_1) \} \sin(\xi - \nu_1) \exp(i\delta_a) + \\ & \{ - [g_3 \exp(i\delta_{t2}) \cos(\beta_1 \tilde{\mathbf{E}}_L) + g_1 \exp(i\delta_{r1}) \sin(\beta_1 \tilde{\mathbf{E}}_s)] \sin(\nu_1 - \beta_1) \exp(i\delta_{Ta}) + \\ & \{ [-g_3 \exp(i\delta_{t2}) \sin(\beta_1 \tilde{\mathbf{E}}_L) + g_1 \exp(i\delta_{r1}) \cos(\beta_1 \tilde{\mathbf{E}}_s)] \exp(i\delta_{wa}) \} \cos(\nu_1 - \beta_1) \exp(i\delta_{Ta}) \} \cos(\xi - \nu_1) \exp(i\delta_a), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} G_{bx} = & \{ [g_2 \exp(i\delta_{t1}) \cos(\beta_2 \tilde{\mathbf{E}}_s) + g_4 \exp(i\delta_{r2}) \sin(\beta_2 \tilde{\mathbf{E}}_L)] \cos(\nu_2 - \beta_2) + \\ & \{ [-g_2 \exp(i\delta_{t1}) \sin(\beta_2 \tilde{\mathbf{E}}_s) + g_4 \exp(i\delta_{r2}) \cos(\beta_2 \tilde{\mathbf{E}}_L)] \exp(i\delta_{wb}) \} \sin(\nu_2 - \beta_2) \} \cos(\eta - \nu_2) + \\ & \{ - [(g_2 \exp(i\delta_{t1}) \cos(\beta_2 \tilde{\mathbf{E}}_s) + g_4 \exp(i\delta_{r2}) \sin(\beta_2 \tilde{\mathbf{E}}_L)] \sin(\nu_2 - \beta_2) \exp(i\delta_{Tb}) + \\ & \{ [-g_2 \exp(i\delta_{t1}) \sin(\beta_2 \tilde{\mathbf{E}}_s) + g_4 \exp(i\delta_{r2}) \cos(\beta_2 \tilde{\mathbf{E}}_L)] \exp(i\delta_{wb}) \} \cos(\nu_2 - \beta_2) \exp(i\delta_{Tb}) \} \sin(\eta - \nu_2), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} G_{by} = & - \{ [g_2 \exp(i\delta_{t1}) \cos(\beta_2 \tilde{\mathbf{E}}_s) + g_4 \exp(i\delta_{r2}) \sin(\beta_2 \tilde{\mathbf{E}}_L)] \cos(\nu_2 - \beta_2) + \\ & \{ [-g_2 \exp(i\delta_{t1}) \sin(\beta_2 \tilde{\mathbf{E}}_s) + g_4 \exp(i\delta_{r2}) \cos(\beta_2 \tilde{\mathbf{E}}_L)] \exp(i\delta_{wb}) \} \sin(\nu_2 - \beta_2) \} \sin(\eta - \nu_2) \exp(i\delta_b) + \\ & \{ - [g_2 \exp(i\delta_{t1}) \cos(\beta_2 \tilde{\mathbf{E}}_s) + g_4 \exp(i\delta_{r2}) \sin(\beta_2 \tilde{\mathbf{E}}_L)] \sin(\nu_2 - \beta_2) \exp(i\delta_{Tb}) + \\ & \{ [-g_2 \exp(i\delta_{t1}) \sin(\beta_2 \tilde{\mathbf{E}}_s) + g_4 \exp(i\delta_{r2}) \cos(\beta_2 \tilde{\mathbf{E}}_L)] \exp(i\delta_{wb}) \} \cos(\nu_2 - \beta_2) \exp(i\delta_{Tb}) \} \cos(\eta - \nu_2) \exp(i\delta_b), \end{aligned} \quad (6)$$

(3)~(6) 式中, g_1, g_2, g_3, g_4 表达式如下所示:

$$\begin{aligned} g_1 = & [\cos(\theta_s - \alpha_1) \cos(\mu_1 - \alpha_1) + \sin(\mu_1 - \alpha_1) \sin(\theta_s - \alpha_1) \exp(i\delta_{ws})] \sin \mu_1 + \\ & [-\cos(\theta_s - \alpha_1) \sin(\mu_1 - \alpha_1) + \sin(\theta_s - \alpha_1) \exp(i\delta_{ws}) \cos(\mu_1 - \alpha_1) \exp(i\delta_{Ts})] \cos \mu_1, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} g_2 = & [\cos(\theta_s - \alpha_1) \cos(\mu_1 - \alpha_1) + \sin(\mu_1 - \alpha_1) \sin(\theta_s - \alpha_1) \exp(i\delta_{ws})] \cos \mu_1 - \\ & [-\cos(\theta_s - \alpha_1) \sin(\mu_1 - \alpha_1) + \sin(\theta_s - \alpha_1) \exp(i\delta_{ws}) \cos(\mu_1 - \alpha_1) \exp(i\delta_{Ts})] \sin \mu_1, \end{aligned} \quad (8)$$

$$g_3 = [\cos(\theta_L - \alpha_2)\cos(\mu_2 - \alpha_2) + \sin(\mu_2 - \alpha_2)\sin(\theta_L - \alpha_2)\exp(i\delta_{wL})]\cos\mu_2 -$$

$$[-\cos(\theta_L - \alpha_2)\sin(\mu_2 - \alpha_2) + \sin(\theta_L - \alpha_2)\exp(i\delta_{wL})\cos(\mu_2 - \alpha_2)\exp(i\delta_{TL})]\sin\mu_2, \quad (9)$$

$$g_4 = [\cos(\theta_L - \alpha_2)\cos(\mu_2 - \alpha_2) + \sin(\mu_2 - \alpha_2)\sin(\theta_L - \alpha_2)\exp(i\delta_{wL})]\sin\mu_2 +$$

$$[-\cos(\theta_L - \alpha_2)\sin(\mu_2 - \alpha_2) + \sin(\theta_L - \alpha_2)\exp(i\delta_{wL})\cos(\mu_2 - \alpha_2)\exp(i\delta_{TL})]\cos\mu_2. \quad (10)$$

空间光混频器在空间相干激光通信接收系统中,根据锁相环形式的不同分为 180°空间光混频器和 90°空间光混频器。(3)~(6)式为空间光混频器输出端口的数学模型,该数学模型涵盖了 180°和 90°空间光混频器利用介质膜 PBS 交叉分光的一般构成形式。对于 90°空间光混频器的构成形式可根据(3)~(6)式进行分析,对于 180°空间光混频器的构成形式可根据(3)式和(4)式或者(5)式和(6)式进行分析。空间光混频器数学模型的建立对空间光混频器结构形式的研制以及对空间光混频器性能评价都具有重大的研究意义。

3 空间光混频器数学模型的验证

空间光混频器数学模型建立过程中考虑到信号光与本振光的混频,信号光与本振光混频后的固定相位延迟以及由于光学元件加工误差造成的相位延迟不准等因素。空间光混频器数学模型的正确性需要通过具体实验加以验证。在空间相干激光通信研究领域,Garreis 等^[9-10]提出过一种空间光混频器光学元件结构形式,如图 2 所示。建立的空间光混频器数学模型涵盖此种结构,只需将空间光混频器数学模型中某些光学元件的参量赋予具体数值,即可演化成如图 2 所示的结构形式。利用空间光混频

器数学模型计算出如图 2 所示的光学元件应该满足的条件,进行光学元件的加工和膜层镀膜,再通过实验加以验证。

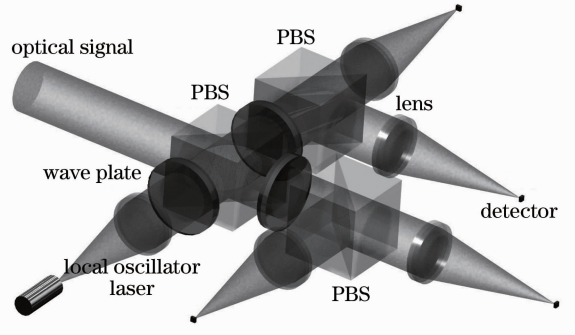


图 2 一种空间光混频器光学元件结构形式
Fig. 2 Optical components structure form of spatial light mixer

当光学参量取 $\theta_s = 45^\circ, \alpha_1 = 0, \delta_{ws} = 0, \mu_1 = 0, \delta_{TS} = 0, \beta_1 = 22.5^\circ, \delta_{wa} = \pi, \nu_1 = 0, \delta_{Ta} = 0, \theta_L = 45^\circ, \alpha_2 = 0, \delta_{wL} = \pi/2, \mu_2 = 0, \delta_{TL} = 0, \beta_2 = 22.5^\circ, \delta_{wb} = \pi, \nu_2 = 0, \delta_{Tb} = 0, \xi = 0$ 时,空间光混频器数学模型演化成如图 2 所示的结构形式。

信号光与本振光混频后 4 个输出端口 G_{ax}, G_{ay}, G_{bx} 和 G_{by} 数学关系式可根据(3)~(6)式进行计算,得

$$G_{ax} = \cos 45^\circ \cos 45^\circ \exp(i\delta_{t2})\tilde{E}_L + \sin 45^\circ \sin 45^\circ \exp(i\delta_{r1})\tilde{E}_S, \quad (11)$$

$$G_{ay} = \cos 45^\circ \sin 45^\circ \exp(i\delta_{t2})\tilde{E}_L + \cos 45^\circ \sin 45^\circ \exp[i(\delta_{r1} - \pi)]\tilde{E}_S, \quad (12)$$

$$G_{bx} = \sin 45^\circ \sin 45^\circ \exp[i(\delta_{r2} + \pi/2)]\tilde{E}_L + \cos 45^\circ \cos 45^\circ \exp(i\delta_{t1})\tilde{E}_S, \quad (13)$$

$$G_{by} = \cos 45^\circ \sin 45^\circ \exp[i(\delta_{r2} + 3\pi/2)]\tilde{E}_L + \cos 45^\circ \sin 45^\circ \exp(i\delta_{t1})\tilde{E}_S. \quad (14)$$

信号光与本振光混频后四路相对相位差为 $\delta_{ax}, \delta_{ay}, \delta_{bx}$ 和 δ_{by} 分别对应于 4 个输出端口 G_{ax}, G_{ay}, G_{bx} 和 G_{by} , 从(11)~(14)式可知:

$$\delta_{ax} = \delta_{t2} - \delta_{r1}, \quad (15)$$

$$\delta_{ay} = \delta_{t2} - \delta_{r1} + \pi, \quad (16)$$

$$\delta_{bx} = \delta_{r2} + \pi/2 - \delta_{t1}, \quad (17)$$

$$\delta_{by} = \delta_{r2} + 3\pi/2 - \delta_{t1}. \quad (18)$$

信号光与本振光经过空间光混频器后的 4 个输出端口 G_{ax}, G_{ay}, G_{bx} 和 G_{by} , 应该满足的相对相位差

为 $0^\circ, 180^\circ, 90^\circ, 270^\circ$, 故 $\delta_{t2} - \delta_{r1} = 2n\pi, \delta_{r2} - \delta_{t1} = 2n\pi$, 其中 n 为 0 或整数,即要求第一块 PBS 的偏振分光膜对信号光的反射相位与本振光的透射相位相等或为 2π 的整数倍,对信号光的透射相位与本振光的反射相位相等或为 2π 的整数倍(偏振分光膜透 p 波反射 s 波)。

将加工好的 PBS 和波片安放在事先设计好的调整架上,1550 nm 窄线宽半导体激光器通过光纤连接到其中一个光纤准直器上,4 个输出端口通过

光纤会聚器及光纤连接到光功率计上。调整安装固定调整架旋钮使 4 个光功率计同时达到最大示数，然后将窄线宽半导体激光器的连接光纤头从一个光纤准直器拿下来安装到另一个光纤准直器上(如图 3 所示)，观察此时 4 个光功率计示数是否改变，如果没有发生改变证明此时光学元件位置已经调好，将调整架位置锁定。

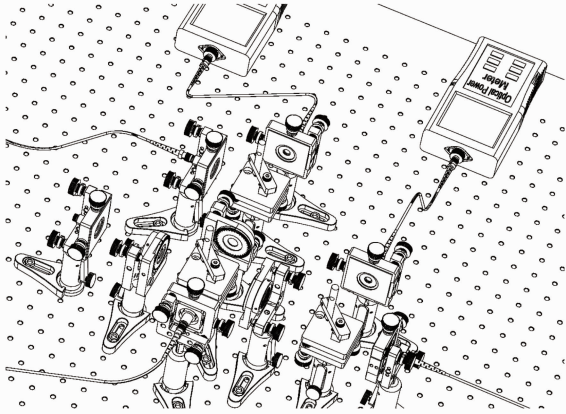


图 3 空间光混频器实验的搭建

Fig. 3 Construction of the spatial light mixer experiments

如图 4 所示，将 4 个光功率计换成 4 个光电探测器，探测器的输出端口连接到有四项输入端口的示波器上，两个窄线宽半导体激光器通过光纤分别连接到两个光纤准直器上，一个作为信号光，一个作为本振光。利用电脑上的激光器控制软件调节两个窄线宽半导体激光器的频率使其拍频满足光电探测器带宽的要求。

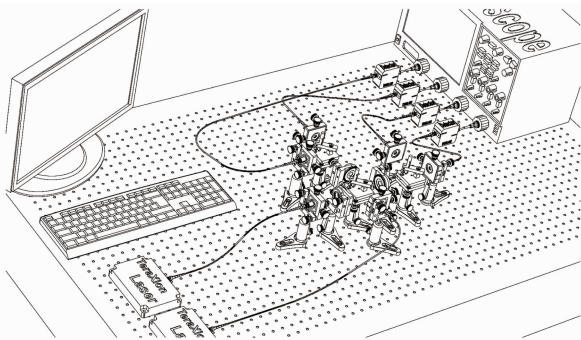


图 4 空间光混频器实验检测

Fig. 4 Experimental detection of the spatial light mixer

通过观察示波器四路相干光的波形图，可测量 4 个拍频信号波峰的横向距离，利用横坐标时间折算出空间光混频器四路输出端口相对相位延迟。从示波器波形图相对相位差测试结果来看， 0° 和 180° 两路平衡支路相对相位差为 183.4° ， 90° 和 270° 两路平衡支路相对相位差为 183.7° 。 0° 和 180° 两路组合

与 90° 和 270° 两路组合构成正交支路之间的相对相位差为 95.4° 。4 个输出端口的拍频波形并没有达到相对相位相差 0° 、 180° 、 90° 、 270° 的理想设计指标。主要原因是偏振分光膜的镀制精度及棱镜与波片的加工误差。可见，空间光混频器要想实现高精度的相对相位延迟，必须在光路中置有补偿相对相位的调整元件。空间光混频器数学模型的建立考虑到相位补偿环节因而具有一定的合理性。

4 结 论

从空间光混频器的光学原理出发，研究一切可能利用到的光学元件，考虑将能产生固定相位延迟的波片，能对相位进行补偿的晶体以及能把信号光与本振光进行合束和分束的 PBS 等光学元件作为研究重点，根据空间光混频器在相干接收系统中所要实现的作用，建立起空间光混频器内部光学元件的结构模型。该结构模型能涵盖空间光混频器利用介质膜 PBS 交叉分光所有可能的结构形式。研究结构模型中各光学元件对信号光与本振光作用的数学关系式，将其统一起来最终建立起空间光混频器输出端口的数学模型。将数学模型向已有的具体结构演化，通过实验验证了空间光混频器数学模型的正确性及合理性。空间光混频器数学模型的建立对未来高性能空间光混频器的研制与改进有重大的指导意义。

参 考 文 献

- Xu Nan, Liu Liren, Wan Lingyu, *et al.*. Coherent detection of position errors in space laser coherent communications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 347-351.
许楠, 刘立人, 万玲玉, 等. 空间相干激光通信中目标位置误差的相干探测[J]. *光学学报*, 2010, 30(2): 347-351.
- Y Painchaud, M Poulin, M Morin, *et al.*. Performance of balanced detection in a coherent receiver [J]. *Opt Express*, 2009, 17(5): 3659-3672.
- Wang Chunhui, Gao Long, Pang Yajun, *et al.*. Experimental investigation for relation between beam splitter coefficient and signal-to-noise ratio of $2\ \mu\text{m}$ balanced coherent system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1104002.
王春晖, 高龙, 庞亚军, 等. 光束分束比对 $2\ \mu\text{m}$ 平衡式相干探测系统信噪比影响的实验研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1104002.
- Matthias Seimeta, Carl-Michael Weinert. Options, feasibility, and availability of $2 \times 4\ 90^\circ$ hybrid for coherent optical systems [J]. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(3): 1317-1322.
- S H Jeong, K Morito. Optical 90° hybrid with broad operating bandwidth of 90 nm [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(22): 3505-3507.
- Zhou Yu, Wan Lingyu, Zhi Yanan, *et al.*. Polarization-splitting $2 \times 4\ 90^\circ$ 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 $2 \times 4\ 90^\circ$ 自由空间光学桥接器[J]. *光学学报*, 2009, 29(12): 3291-3294.

- 7 Wan Lingyu, Su Shida, Liu Liren, *et al.*. Design of a new 90° 2×4 hybrid based on the birefringence and the electro-optic effect of crystal [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(9): 2358–2361.
万玲玉, 苏世达, 刘立人, 等. 基于晶体双折射和电光效应设计的 $90^\circ 2 \times 4$ 空间光桥接器[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2358–2361.
- 8 Hou Peipei, Zhou Yu, Zhi Yanan, *et al.*. Free space optical 2×4 90° hybrid based on crystal birefringence [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3413–3418.
侯培培, 周煜, 职亚楠, 等. 晶体双折射自由空间 2×4 90° 光学桥接器[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3413–3418.
- 9 R Garreis, C Zeiss. 90° optical hybrid for coherent receivers [C]. SPIE, 1991, 1552: 210–219.
- 10 W R Leeb. Optical 90 degrees hybrid Costas type receivers [J]. Electron Lett, 1990, 26(18): 1431–1432.

栏目编辑: 王晓琰