

# 相位补偿偏振分光 $2 \times 4$ $90^\circ$ 自由空间光学桥接器

周 煜<sup>1</sup> 万玲玉<sup>1,2</sup> 职亚楠<sup>1</sup> 栾 竹<sup>1</sup> 孙建锋<sup>1</sup> 刘立人<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 中国科学院空间激光通信及检验技术重点实验室, 上海 201800)

<sup>2</sup> 广西大学物理科学与工程技术学院, 广西 南宁 530004

**摘要** 设计和制作了一种用于卫星相干激光通信的偏振分光  $2 \times 4$   $90^\circ$  自由空间光学桥接器, 提出了两种  $\lambda/4$  波片进行偏振相位补偿的方法及使用啁啾激光及解斜解调的相移测量方法。给出了数学分析、系统设计和实验结果, 结果表明器件运行稳定, 相位补偿精密有效, 相位测量简单而精确。

**关键词** 相干光通信; 光学桥接器;  $\lambda/4$  波片; 解斜解调; 偏振分光;  $90^\circ$  相移

**中图分类号** TN958 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092912.3291

## Polarization-Splitting $2 \times 4$ $90^\circ$ Free-Space Optical Hybrid with Phase Compensation

Zhou Yu<sup>1</sup> Wan Lingyu<sup>1,2</sup> Zhi Ya'nan<sup>1</sup> Luan Zhu<sup>1</sup> Sun Jianfeng<sup>1</sup> Liu Liren<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Space Laser Communication and Testing Technology,  
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup> College of Physical Science and Technology, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China

**Abstract** A  $2 \times 4$   $90^\circ$  free-space optical hybrid with polarization splitting is designed and fabricated for intersatellite coherent laser communication. Two phase compensation arrangements by using a  $\lambda/4$  waveplate are proposed and a phase shift testing method based on the deramping method from a chirped laser is developed. The mathematic analysis, system design and experimental result are given. It is shown that this hybrid works stably, the compensation function works effectively, and the phase test is accurate and simple in configuration.

**Key words** coherent optical communication; optical hybrid;  $\lambda/4$  waveplate; deramping demodulation; polarization splitting; quadrature

在卫星通信领域, 自由空间激光通信在传输码率、天线尺寸、保密性等方面比无线电通信具有明显的优点, 应用前景巨大。相干激光通信体制比光强调制直接探测通信体制具有接收灵敏度高的优点, 为了实现星间高传输码率激光通信终端最重要的技术途径是采用相干光通信<sup>[1]</sup>。经过约 20 年的研究, 德国首先成功制造了轻量化高码率星间相干激光通信终端<sup>[2]</sup>, 实现了低轨卫星之间的 5.6 Gb/s 激光通信<sup>[3]</sup>, 计划将实现 2.8 Gb/s 的高轨中继卫星和低轨观察卫星之间的通信<sup>[3]</sup>。

自由空间相干光通信终端的光学核心器件是

$2 \times 4$   $90^\circ$  光学桥接器, 它对信号光束和本振光束进行合束, 然后分解成 4 束组合光束, 它们之间具有相对的  $0, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  相移, 或者说产生一个同相平衡接收通道 ( $0$  和  $180^\circ$  两路) 和一个正交平衡接收通道 ( $90^\circ$  和  $270^\circ$  两路), 产生两个通道之间的  $90^\circ$  相移是技术关键。由于在星间激光通信中信号光束不仅要传输信息, 同时也需要产生光束位置误差用于终端精密跟踪, 因此  $2 \times 4$   $90^\circ$  光学桥接器也必须具有自由空间光学结构。德国激光相干通信终端中采用了自由空间光学结构的  $2 \times 4$  光学桥接器<sup>[4]</sup>。

基于同样的原理, 本文报道了一种自由空间光

收稿日期: 2009-11-19; 收到修改稿日期: 2009-11-30

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z298)资助课题。

作者简介: 周 煜(1976—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事晶体光学、空间激光通信和空间激光雷达等方面的研究。

E-mail: sunny@mail.siom.ac.cn

学结构的  $2 \times 4$   $90^\circ$  光学桥接器, 提出了采用  $\lambda/4$  波片进行偏振相位变化而产生精确  $90^\circ$  相移的两种补偿方法, 也提出了一种采用啁啾激光光源进行解斜解调的相移测量方法<sup>[5,6]</sup>。给出了器件参数设计, 进行了数学分析并给出了相位补偿的调整条件, 报道了实验结果。表明本光学桥接器运行稳定,  $\lambda/4$  波片的偏振相位补偿精密有效, 啁啾光源相移测量法结构简单测试精确并特别适用于实时装调。

图 1 给出了光学桥接器及其测试装置的结构, 其中光学桥接器包括薄膜型偏振分光镜 PBS, PBS (AB) 和 PBS (CD), 一块  $\lambda/4$  波片, 二块  $\lambda/2$  波片。信号光束以  $45^\circ$  偏振取向入射到 PBS, 其垂直偏振分量通过 PBS 反射, 再经  $\lambda/2$  波片转动偏振方向  $45^\circ$  并且入射到 PBS (AB), 其平行偏振分量直接通过 PBS, 再经  $\lambda/2$  波片转动偏振方向  $45^\circ$  入射到 PBS (CD)。本振光束入射到  $\lambda/4$  波片, 然后到 PBS, 其平行偏振分量直接通过 PBS 再经  $\lambda/2$  波片转动偏振方向  $45^\circ$  入射到 PBS (AB), 其垂直偏振分量经 PBS 反射, 再经  $\lambda/2$  波片转动偏振方向  $45^\circ$  入射到 PBS (CD)。应当注意, 本振光的偏振方向和  $\lambda/4$  波

片快慢轴取向可以有两种安排方式(如图 1 所示), 第一种是本振垂直偏振和  $\lambda/4$  波片  $45^\circ$  取向, 第二种是本振  $45^\circ$  偏振和  $\lambda/4$  波片  $0^\circ$  取向。本振平行偏振分量和信号垂直偏振分量经过偏振态  $45^\circ$  旋转后入射到 PBS (AB), 其共同的平行偏振分量直接通过 PBS (AB) 形成 A 路偏振干涉输出, 其共同的垂直偏振分量通过 PBS (AB) 反射出形成 B 路偏振干涉输出。本振垂直偏振分量和信号平行偏振分量经过偏振态  $45^\circ$  旋转后入射到 PBS (CD), 其共同的平行偏振分量直接通过 PBS (CD) 形成 C 路偏振干涉输出, 其共同的垂直偏振分量通过 PBS (CD) 反射出形成 D 路偏振干涉输出。A 路光输出和 B 路光输出经过透镜聚焦后再通过光电平衡接收产生同相通道电子信号输出, C 路光输出和 D 路光输出经过透镜聚焦后再通过光电平衡接收产生同相通道电子信号输出。在上述两种本振光偏振态和  $\lambda/4$  波片取向的安排下均可以旋转  $\lambda/4$  波片在两个通道之间产生附加相位差进行相位补偿。事实上两个  $\lambda/2$  波片可以不用, 但是这时 PBS (AB) 和 PBS (CD) 需要旋转  $45^\circ$ 。

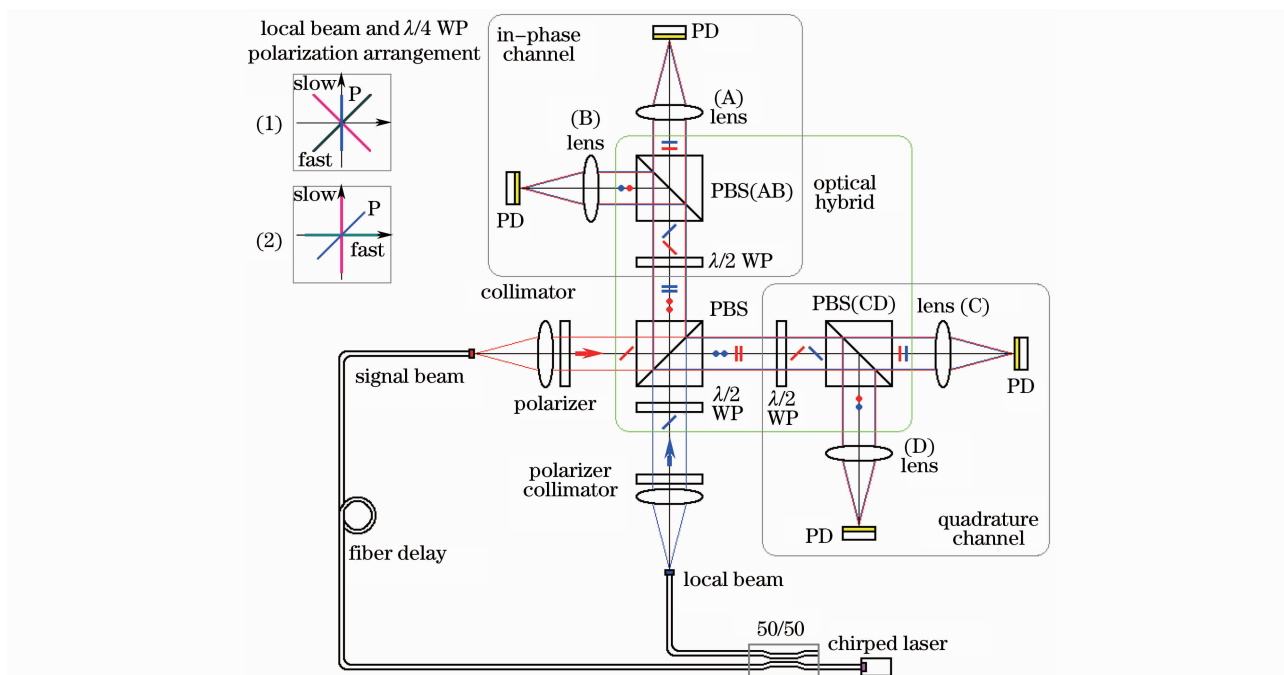


图 1 光学桥接器及其测试装置结构图

Fig. 1 Schematic diagram of optical hybrid and its testing accessories

设入射的信号光和本振光可表示为

$$e_s = E_s \exp[j\phi(t)], \quad (1a)$$

$$e_l = E_l \exp(j\psi), \quad (1b)$$

式中  $\phi(t)$  表示信息的相位调制信号,  $\psi$  表示系统剩余相位。

不考虑偏振分光棱镜的插入损耗即令其透射系数和反射系数都为 1, 同时忽略旋转  $\lambda/4$  波片等因素造成的振幅变化, 在理想条件下可以求得 4 路光学输出为

$$I_A = \frac{1}{4} |E_S|^2 + \frac{1}{4} |E_{LO}|^2 + \frac{1}{2} |E_S| |E_{LO}| \cos[\phi(t) - \psi + \varphi_r^{\text{PBS}} - \varphi_i^{\text{PBS}} - \varphi_p^{\text{WP}}], \quad (2a)$$

$$I_B = \frac{1}{4} |E_S|^2 + \frac{1}{4} |E_{LO}|^2 + \frac{1}{2} |E_S| |E_{LO}| \cos[\phi(t) - \psi + \varphi_r^{\text{PBS}} - \varphi_i^{\text{PBS}} - \varphi_p^{\text{WP}} + \pi], \quad (2b)$$

$$I_C = \frac{1}{4} |E_S|^2 + \frac{1}{4} |E_{LO}|^2 + \frac{1}{2} |E_S| |E_{LO}| \cos[\phi(t) - \psi - \varphi_r^{\text{PBS}} + \varphi_i^{\text{PBS}} - \varphi_v^{\text{WP}}], \quad (2c)$$

$$I_D = \frac{1}{4} |E_S|^2 + \frac{1}{4} |E_{LO}|^2 + \frac{1}{2} |E_S| |E_{LO}| \cos[\phi(t) - \psi - \varphi_r^{\text{PBS}} + \varphi_i^{\text{PBS}} - \varphi_v^{\text{WP}} + \pi], \quad (2d)$$

式中  $\varphi_r^{\text{PBS}}$  和  $\varphi_i^{\text{PBS}}$  分别表示经偏振分束棱镜 PBS 的垂直偏振分量的反射相位变化和平行偏振分量的透射相位变化, 而  $\varphi_v^{\text{WP}}$  和  $\varphi_p^{\text{WP}}$  分别表示本振光束经过  $\lambda/4$  波片在垂直偏振方向产生的相位变化和在平行偏振方向产生的相位变化。对于第一种安排即本振垂直偏振和  $\lambda/4$  波片  $45^\circ$  取向, 当转动角为  $\theta$  时有

$$\varphi_v^{\text{WP}} - \varphi_p^{\text{WP}} = \frac{\pi}{2} + 2\theta. \quad (3a)$$

对于第二种安排即本振  $45^\circ$  偏振和  $\lambda/4$  波片  $0$  取向, 有

$$\varphi_v^{\text{WP}} - \varphi_p^{\text{WP}} = \frac{\pi}{2} - 4\theta^2. \quad (3b)$$

可见第二种方法的角度旋转相位变化灵敏度较低, 因此调整精度较高。

假定  $K$  表示光电子转换因子, 则 A 路和 B 路平衡接收所构成的同相通道(in-phase)和 C 路和 D 路平衡接收所构成的正交通道(quadrature)的光电流输出分别为

$$i_{\text{in-phase}} = K |E_S| |E_{LO}| \cos[\phi(t) - \psi + \varphi_r^{\text{PBS}} - \varphi_i^{\text{PBS}} - \varphi_p^{\text{WP}}], \quad (4a)$$

$$i_{\text{quadrature}} = K |E_S| |E_{LO}| \cos[\phi(t) - \psi - \varphi_r^{\text{PBS}} + \varphi_i^{\text{PBS}} - \varphi_v^{\text{WP}}]. \quad (4b)$$

它们之间的相位差为(第一种  $\lambda/4$  波片取向)

$$\Delta\varphi = 2(\varphi_r^{\text{PBS}} - \varphi_i^{\text{PBS}}) + \frac{\pi}{2} + 2\theta, \quad (5a)$$

或者(第二种  $\lambda/4$  波片取向)

$$\Delta\varphi = 2(\varphi_r^{\text{PBS}} - \varphi_i^{\text{PBS}}) + \frac{\pi}{2} - 4\theta^2. \quad (5b)$$

薄膜型偏振分光镜设计和实际制作产生的相位误差可以通过微小转动  $\lambda/4$  波片使得  $2(\varphi_r^{\text{PBS}} - \varphi_i^{\text{PBS}}) + 2\theta[\text{or}(-4\theta^2)] = 0(\text{or } 2\pi)$ , 产生严格的  $\Delta\varphi = \pm \pi/2$  条件, 即采用偏振相位补偿方式可以确保同相通道和正交通道之间所要求的  $90^\circ$  相位关系。

如图 1 所示, 测试系统由啁啾激光光源, 50/50 分路器, 光纤延时环路和准直透镜组成, 因此信号光束和本振光束都是光频线性调制的啁啾信号, 但存在相对时间延时。光电探测器探测信号和本振光束的干涉, 并以解斜解调制方式产生一个差频的电子信号。令激光波长为  $\lambda$ , 啁啾波长带宽为  $\Delta\lambda$ , 啁啾脉冲时间为  $T$ , 则解斜所得的差频频率为

$$f_r = |\Delta\lambda| \frac{c \Delta\tau}{\lambda^2 T}. \quad (6)$$

设计和研制了光学桥接器的光学元件, 工作波长为 1550 nm 波段, 薄膜偏振分光棱镜,  $\lambda/4$  零级石英波片与  $\lambda/2$  零级石英波片的边长或外径尺寸均为 2.54 cm, 包括输入光纤的准直透镜和接收聚焦透镜及光电探测器件的桥接器实物如图 2 所示。测试时激光器线性调谐范围为 1539~1541 nm, 即波长宽度为 2 nm, 啁啾宽度为 20 ms, 光纤相对延时约为 0.047 ns, 激光输出 1 mW, 准直光束直径 2.1 mm。在第一种  $\lambda/4$  波片取向微调情况下, 采用示波器观察到各路的解斜信号的频率约为 601.5 Hz, A 路与 B 路之间和 C 路与 D 路之间的相位差均为  $180^\circ$ 。采用示波器也测量了 A 路和 B 路组成的同相通道平衡输出和 C 路和 D 路组成的同步通道平衡输出之间的相位差。图 3 为示波器截屏, 显示了两个通道的余弦时间分布图以及它们的李萨如图, 截屏中

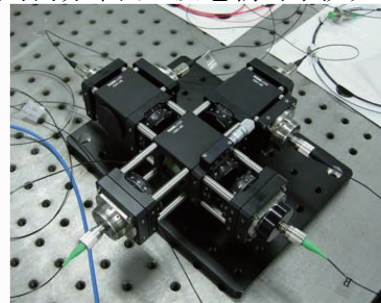


图 2 自由空间  $2 \times 4$   $90^\circ$  光桥接器实验室装置  
Fig. 2 Setup of the prototype of free-space  $2 \times 4$   $90^\circ$  optical hybrid

也包括了示波器实测的相位数据。该图表示了两通道相位差可调整到  $90.02^\circ$ , 表明通过调整  $\lambda/4$  波片的角度能够精确补偿桥接器的相位误差。第二种  $\lambda/4$  波片取向微调也得到相同的结果。

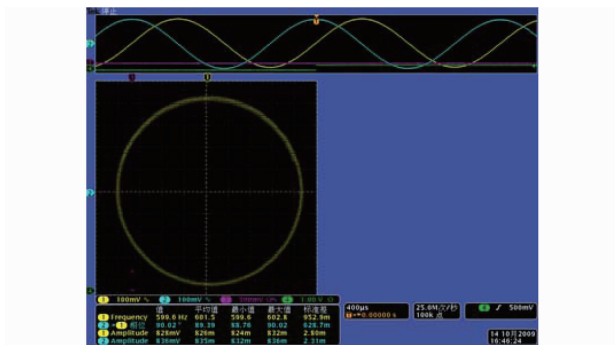


图 3 示波器实验结果演示

Fig. 3 Oscillogram demonstration of the experimental result

实验表明本文的自由空间光学桥接器结构简单而且运行稳定,采用  $\lambda/4$  波片的偏振相位补偿方法精密而且有效,采用啁啾光源的相移测量方法简单、精确,并且非常适合于器件的实时装调。我们将采

用固态化堆栈组装的工艺改进器件机械结构,使之更实用化。

### 参 考 文 献

- 1 B. Smutny, R. Lange, G. Mühlwinkel *et al.*. Coherent laser communication terminals for LEO-GEO data links [C]. 14th Coherent Laser Radar Conference, 2007, Snowmass, CO USA
- 2 R. Lange, B. Smutny. Optical inter-satellite links based on homodyne BPSK modulation; Heritage, status and outlook[C]. *SPIE*, 2005, **5712**: 1~12
- 3 B. Smutny, H. Kaempfner, G. Mühlwinkel *et al.*. 5.6 Gbps optical intersatellite communication link[C]. *SPIE*, 2009, **7199**: 719906-1
- 4 R. Garreis, C. Zeiss.  $90^\circ$  optical hybrid for coherent receivers [C]. *SPIE*, 1991, **1522**: 210~219
- 5 Zhou Yu, Sun Jianfeng, Luan Zhu *et al.*. Aperture-synthesizing experiment of a down-scaled synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2446~2448  
周 煜, 孙建锋, 栾 竹 等. 尺度缩小合成孔径激光成像雷达的孔径合成实验[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2446~2448
- 6 Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu *et al.*. 2D Imaging experiment of a 2D target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 2030~2032  
周 煜, 许 楠, 栾 竹 等. 尺度缩小合成孔径激光雷达的二维成像实验[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 2030~2032