

文章编号: 0253-2239(2010)12-3413-06

晶体双折射自由空间 2×4 90° 光学桥接器

侯培培 周 煜 职亚楠 孙建锋 刘立人

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

摘要 设计和制作了基于晶体双折射的自由空间 90° 光学桥接器,用于在空间相干激光通信接收机中实现信号光束和本机振荡光束的混合并产生 90° 相移四通道合成光束输出,实现空间 2×4 90° 桥接,以进一步进行光电变换及信号解调和锁相。研制的晶体双折射 2×4 90° 光学桥接器由四块结构相同的双折射平板,一块相位延迟平板和一块检偏双折射平板组成。外差测量证明晶体双折射 2×4 90° 光学桥接器运行准确有效,性能稳定可靠,并给出了相位补偿和进一步的优化方案。晶体双折射自由空间光学桥接器适用于自由空间相干激光通信,对于未来星载激光通信终端实现小型化、轻量化、低功耗和高码率具有实际意义。

关键词 自由空间相干激光通信系统; 90° 光学桥接器; 相干接收; 相位补偿; 双折射晶体

中图分类号 TN958 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103012.3413

Free Space Optical 2×4 90° Hybrid Based on Crystal Birefringence

Hou Peipei Zhou Yu Zhi Yanan Sun Jianfeng Liu Liren

(Key Laboratory of Space Laser Communication and Testing Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The design and fabrication of an optical 2×4 90° hybrid based on crystal birefringence for coherent receiver in free-space optical communication system are presented. The two pairs of balanced optical signals combined by the signal beam and local oscillator beam are output, which obtains the accurate phase difference of 90° , realizes 2×4 free-space hybrid, carries out photoelectric conversion and signal demodulation phase-lock. The 90° hybrid comprises two pairs of stacked birefringent plates, an analyser birefringent plate and a phase retardation plate. The testing results measured by heterodyne method verify that the 2×4 optical 90° hybrid can run accurately, effectively, stably and reliably. The phase compensation and further optimization schemes are also proposed. The free-space optical hybrid based on birefringence is particularly suitable for free-space coherent optical communication system, for intersatellite communications terminal for future compact, lightweight, low power consumption and high bit rate in the future.

Key words free-space coherent optical communication system; optical 90° hybrid; coherent receiver; phase compensation; birefringent crystal

1 引言

自由空间相干激光通信将成为未来高带宽卫星间通信的主导技术,能够在几万公里距离使用小型天线和低发射功率建立 Gb/s 以上数据链接^[1]。零

差相移键控系统可以实现接收器的最佳灵敏度和光通信系统中最长传输距离^[2,3]。基于零差二进制相移键控(BPSK)的卫星激光通讯链路已经得到验证,实现了两低轨道卫星之间双向数据传输率

收稿日期: 2010-03-24; **收到修改稿日期**: 2010-07-30

基金项目: 国家自然科学基金委员会青年基金(60908029),上海市自然科学基金(09ZR1435300),中国科学和技术部项目(2007AA01Z298)资助课题。

作者简介: 侯培培(1981—),女,博士研究生,主要从事铁电晶体畴工程及光折变光学方面的研究。

E-mail: houpeipei@siom.ac.cn

导师简介: 刘立人(1942—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事激光技术和光学信息领域方面的研究。

E-mail: lirenliu@mail.shnc.ac.cn

5.6 Gb/s, 误码率优于 10^{-9} [4~6]。 2×4 90° 桥接器以信号光束和本机光束为两路输入, 精确合成两束光的波前, 并产生四路相互有 90° 相移的合成输出光束, 实现信号光与本机振荡光的相干叠加, 是星载相干激光通信系统中光学部分的核心关键器件, 因此系统的接收性能取决于桥接器的性能。光学桥接器主要功能是在空间精确合成信号激光波前和本振激光波前, 以产生两者的差频。光学桥接器分为 90° 相移两通道输出, 180° 相移两通道输出和 90° 相移四通道输出等结构。 180° 相移 2×2 桥接器可用于平衡锁相环路接收机, 90° 相移 2×2 桥接器可用于科斯塔斯锁相环路接收机, 90° 相移 2×4 桥接器可用于平衡接收和科斯塔斯锁相环路相结合的接收机。

在卫星激光通信终端中, 所接收的光信号不仅要用于探测通信信号而且也要用于探测对方终端的空间位置, 即利用光电位置探测器测量光信号对于接收望远镜的离轴量, 这种位置变化信号用于光学精密跟踪[7,8]。因此用于自由空间激光通信的光学桥接器必须有体结构光学元件和自由空间信号输入结构。在光纤通信系统中, 光学桥接器采用波导[9]和光纤器件[10,11]实现原理, 这些器件不属于自由空间光学, 不适合于自由空间卫星激光通信系统应用。基于自由空间光传输的 90° 和 180° 桥接器已有报道[12,13]。 90° 光学桥接器构成的大尺寸光学元件已经被用于零差和外差接收机的研究[14]。两个 2×4 90° 光学桥接器实现的自由空间传输已有报道[15,16]。自由光信号输入的集成 2×4 90° 光学桥接器已成功用于卫星间零差 BPSK 光通信链路[4~6]。这些桥接器主要由传统的偏振光学器件包括偏振分束器和波片构成, 整个光学系统需要保证严格的光束等光程传输。本文设计制作基于晶体双折射的 2×4 90° 空间光学桥接器, 利用晶体双折射实现分束和引入相移, 实现相位误差的补偿, 并有望在未来实现空间光桥接器的电压调谐, 特别适用于自由空间相干激光通信, 对于未来星载激光通信终端实现小型化、轻量化、低功耗和高码率有实际意义。

2 原 理

2.1 概 念

晶体双折射 2×4 90° 光学桥接器原理图如图 1 所示。 2×4 90° 光学桥接器由四块相同结构的双折射光学平板, 一块相位延迟平板和一块检偏双折射平板组成。 P_1, P_2, P_3 和 P_4 均为双折射光学平板,

P_5 为检偏双折射平板。方解石双折射平板主截面内晶体光轴取向和光束偏离如图 1(b) 所示。图中标出了光轴方向和负单轴晶体的主要部分光束传播方向。寻常光沿水平方向偏振, 非常光沿垂直方向偏振。 θ 表示双折射光学平板的光轴取向。 D 表示双折射光学平板的宽度, L 表示双折射光学平板的长度。叠放的双折射光学平板 P_3 和 P_4 的主截面垂直于叠放的双折射光学平板 P_1 和 P_2 的主截面; 检偏双折射平板 P_5 的主截面与双折射光学平板 P_3 和 P_4 的主截面成 45° 放置。假定需要空间复合激光通信信号光束 E_1 和本机振荡激光光束 E_2 并产生 90° 相移四通道合成光束输出。信号光束 E_1 入射到双折射光学平板 P_1 的下部, 本振光束 E_2 入射到双折射光学平板 P_2 上部, 由于光的双折射形成两对互相正交的线偏振光。从叠放的双折射光学平板 P_1 和 P_2 出射的四路光束通过相位延迟板, 正交偏振光束之间产生 $\pi/4$ 的相位延迟。通过相位延迟板上部的两路光束经过双折射光学平板 P_4 在空间上合成一路输出, 而通过相位延迟板下部的两路光束经过双折射光学平板 P_3 在空间上合成一路输出。双折射光学平板 P_3 和 P_4 输出的光束通过检偏双折射平板产生空间分离, 即得到 90° 相移四通道合成光束输出 I_0, I_{180}, I_{90} 和 I_{270} , 即为 2×4 光学桥接器。

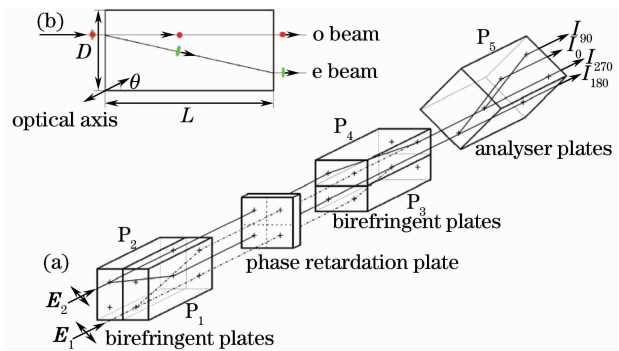


图 1 (a) 晶体双折射 2×4 90° 光学桥接器示意图,

(b) 光束在双折射晶体内的传输

Fig. 1 (a) Schematic diagram of optical 2×4 90° hybrid based on crystals birefringence, (b) propagation of beam in birefringent crystal plates

2.2 数学描述

数学分析采用琼斯矩阵, 它描述一系列电磁波电场 E 由空间正交的两个列向量 E_x 和 E_y 组成。在 X, Y, Z 轴坐标系中, 定义 Z 是光束传播方向。两路输入光束 E_1 和 E_2 有相同的线偏振并相对于 X 轴成 45° 。 E_1 为信号光, E_2 为本振光 (LO)。 E_1 和 E_2 分别表示为

$$\mathbf{E}_1 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} A_1 \exp\{i[\omega_s t + \varphi_s(t) + \varphi_{s0}]\} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} A_1 \exp\{i[\omega_s t + \varphi_s(t) + \varphi_{s0}]\} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{E}_2 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} A_2 \exp[i(\omega_L t + \varphi_{L0})] \\ \frac{\sqrt{2}}{2} A_2 \exp[i(\omega_L t + \varphi_{L0})] \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 A_1 和 A_2 分别为两路输入波振幅, ω_s 是信号光的角频率, ω_L 是 LO 的角频率, $\varphi_s(t)$ 是信号光的调制相位函数, φ_{s0} 是信号光的初始相位, φ_{L0} 是本振光的初始相位。

两路光束 \mathbf{E}_1 和 \mathbf{E}_2 分别入射到双折射光学平板 P_1 和 P_2 , 正交偏振光束之间产生双折射, 将不同的相位延迟引入琼斯矩阵, 水平偏振的两束光为寻常光, 垂直偏振的两束光为非常光; 四路输出光经过相位延迟板, 正交偏振光束之间产生 $\pi/4$ 相位延迟, 再将四路光入射到双折射光学平板 P_3 和 P_4 。由于 P_3 和 P_4 的主截面与 P_1 和 P_2 的主截面正交, 因此双折射光学平板 P_3 和 P_4 内, 水平偏振的两束光是非常光, 垂直偏振的两束光是寻常光。四路光束空间复合后得到两路输出光 \mathbf{E}_3 和 \mathbf{E}_4 表示为

$$\mathbf{E}_3 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} A_2 \exp\left[i\left(\omega_L t + \varphi_{L0} + \frac{2\pi}{\lambda} n_o D_{o1} + \frac{\pi}{4} + \frac{2\pi}{\lambda} n'_{e2} D_{e2}\right)\right] \\ \frac{\sqrt{2}}{2} A_1 \exp\left\{i\left[\omega_s t + \varphi_s(t) + \varphi_{s0} + \frac{2\pi}{\lambda} n'_{e1} D_{e1} + \frac{2\pi}{\lambda} n_o D_{o2}\right]\right\} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{E}_4 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} A_1 \exp\left\{i\left[\omega_s t + \varphi_s(t) + \varphi_{s0} + \frac{2\pi}{\lambda} n_o D_{o1} + \frac{\pi}{4} + \frac{2\pi}{\lambda} n'_{e2} D_{e2}\right]\right\} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} A_2 \exp\left[i\left(\omega_L t + \varphi_{L0} + \frac{2\pi}{\lambda} n'_{e1} D_{e1} + \frac{2\pi}{\lambda} n_o D_{o2}\right)\right] \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 n_o 和 n'_e 分别为寻常光和非常光的折射率。 D_o 和 D_e 分别为寻常光和非常光在双折射平板中的光路长度。两路输出光再经过检偏双折射平板 P_5 , 其主截面与 P_3 和 P_4 的主截面成 45° 放置, 最后输出四路光束可表示为

$$\mathbf{E}_{51} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} A_2 \exp\left[i\left(\omega_L t + \varphi_{L0} + \frac{2\pi}{\lambda} n_o D_{o1} + \frac{\pi}{4} + \frac{2\pi}{\lambda} n'_{e2} D_{e2} + \pi\right)\right] \\ \frac{1}{2} A_1 \exp\left\{i\left[\omega_s t + \varphi_s(t) + \varphi_{s0} + \frac{2\pi}{\lambda} n'_{e1} D_{e1} + \frac{2\pi}{\lambda} n_o D_{o2}\right]\right\} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{E}_{52} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} A_2 \exp\left[i\left(\omega_L t + \varphi_{L0} + \frac{2\pi}{\lambda} n_o D_{o1} + \frac{\pi}{4} + \frac{2\pi}{\lambda} n'_{e2} D_{e2}\right)\right] \\ \frac{1}{2} A_1 \exp\left\{i\left[\omega_s t + \varphi_s(t) + \varphi_{s0} + \frac{2\pi}{\lambda} n'_{e1} D_{e1} + \frac{2\pi}{\lambda} n_o D_{o2}\right]\right\} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{E}_{53} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} A_1 \exp\left\{i\left[\omega_s t + \varphi_s(t) + \varphi_{s0} + \frac{2\pi}{\lambda} n_o D_{o1} + \frac{\pi}{4} + \frac{2\pi}{\lambda} n'_{e2} D_{e2} - \pi\right]\right\} \\ \frac{1}{2} A_2 \exp\left[i\left(\omega_L t + \varphi_{L0} + \frac{2\pi}{\lambda} n'_{e1} D_{e1} + \frac{2\pi}{\lambda} n_o D_{o2}\right)\right] \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\mathbf{E}_{54} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} A_1 \exp\left\{i\left[\omega_s t + \varphi_s(t) + \varphi_{s0} + \frac{2\pi}{\lambda} n_o D_{o1} + \frac{\pi}{4} + \frac{2\pi}{\lambda} n'_{e2} D_{e2}\right]\right\} \\ \frac{1}{2} A_2 \exp\left\{i\left[\omega_L t + \varphi_{L0} + \frac{2\pi}{\lambda} n'_{e1} D_{e1} + \frac{2\pi}{\lambda} n_o D_{o2}\right]\right\} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

假设在理想条件下, 两对双折射平板中的光路可以完全补偿, 表达式为

$$\frac{2\pi}{\lambda} n'_{e1} D_{e1} + \frac{2\pi}{\lambda} n_o D_{o2} - \frac{2\pi}{\lambda} n_o D_{o1} - \frac{2\pi}{\lambda} n'_{e1} D_{e2} = 0, \quad (9)$$

将表达式化简, 两个初始相位 φ_{s0} 和 φ_{L0} 满足

$$(\varphi_{s0} - \varphi_{L0}) = -\pi/4, \quad (10)$$

获得理想条件下输出光束强度的简化表达式为

$$\begin{cases} I_0 = \frac{1}{4} |A_1|^2 R + \frac{1}{4} |A_2|^2 R + \frac{1}{2} R |A_1| |A_2| \cos[(\omega_s - \omega_L)t + \varphi_s(t)] \\ I_{180} = \frac{1}{4} |A_1|^2 R + \frac{1}{4} |A_2|^2 R + \frac{1}{2} R |A_1| |A_2| \cos[(\omega_s - \omega_L)t + \varphi_s(t) - \pi] \\ I_{90} = \frac{1}{4} |A_1|^2 R + \frac{1}{4} |A_2|^2 R + \frac{1}{2} R |A_1| |A_2| \cos[(\omega_s - \omega_L)t + \varphi_s(t) - \frac{1}{2}\pi] \\ I_{270} = \frac{1}{4} |A_1|^2 R + \frac{1}{4} |A_2|^2 R + \frac{1}{2} R |A_1| |A_2| \cos[(\omega_s - \omega_L)t + \varphi_s(t) - \frac{3}{2}\pi] \end{cases}, \quad (11)$$

式中 R 是光电二极管的响应度。因此产生 90° 相移四通道合成光束输出,即实现空间 2×4 桥接。假定两个光电二极管具有相同的响应度,损耗可以忽略。输出的同相和正交相光电流分别为

$$\begin{cases} I_1(t) = I_0 - I_{180} = \\ \quad R |A_1| |A_2| \cos[\omega_{IF}t + \varphi_s(t)] \\ I_Q(t) = I_{90} - I_{270} = \\ \quad R |A_1| |A_2| \sin[\omega_{IF}t + \varphi_s(t)] \end{cases}, \quad (12)$$

式中,中频(IF)是 $\omega_{IF} = \omega_s - \omega_L$ 。对于外差接收机 $\omega_{IF} \neq 0$, $I_1(t)$ 和 $I_Q(t)$ 是 90° 的相位差正交分量。

3 制作和检测

设计并制作了基于双折射晶体的 2×4 90° 光学桥接器,双折射光学平板 P_1, P_2, P_3, P_4 和 P_5 均由优质方解石切割而成。为了减少由于尺寸和非均匀折射率引入的相位误差,先加工一整块双折射光学平板,然后按厚度切割成双折射光学平板 P_1, P_2, P_3 和 P_4 ,结构尺寸相同均为 $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。双折射光学平板输出的两路光束之间偏离角由准直仪测量低于 5 arc sec (约 1.39 mrad)。检偏双折射平板的尺寸为 $30 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。为了获得最大光

学尺寸,双折射光学平板沿自然解理面切割,光轴取向 θ 为 41.85° 。相位延迟板为 $\lambda/8$ 波片(零级石英),其快轴平行于双折射光学平板 P_1 和 P_2 的主截面。

图 2 为测试光学桥接器实验装置示意图。 P_1, P_2, P_3 和 P_4 均为双折射平板, P_5 为检偏双折射平板, PBS 为偏振分束器。利用 YAG 激光器光纤耦合输出 $1.064 \mu\text{m}$ 激光束。信号传输光纤采用保偏单模光纤。输出光由 50/50 分束比的 1×2 耦合器分为两束。一束光由声光移频器移频 80 MHz 作为信号光,另一束光作为本振光,实现外差接收。信号光和本振光分别由直径 2.6 mm 光纤准直器输出到自由空间。用一个立方体结构的偏振分束器来耦合两路输入光束。利用格兰-泰勒棱镜将输入的信号光和本振光的偏振态调整为 45° 线偏振光。测试系统中的 2×2 光探测器阵列包括 4 个匹配光电二极管和 2 个超低噪音、高速跨阻放大器,放大器产生的两输出电压正比于两光电二极管的光电流之差。该探测器材料/类型是 InGaAs/PIN,探测器直径为 0.5 mm ,参数误差(包括光电二极管的响应度和结电容)均小于 1% ,设计的转换增益约为 $2 \times 10^4 \text{ V/W}$ 。用安捷伦数字示波器测试并给出测试结果,示波器

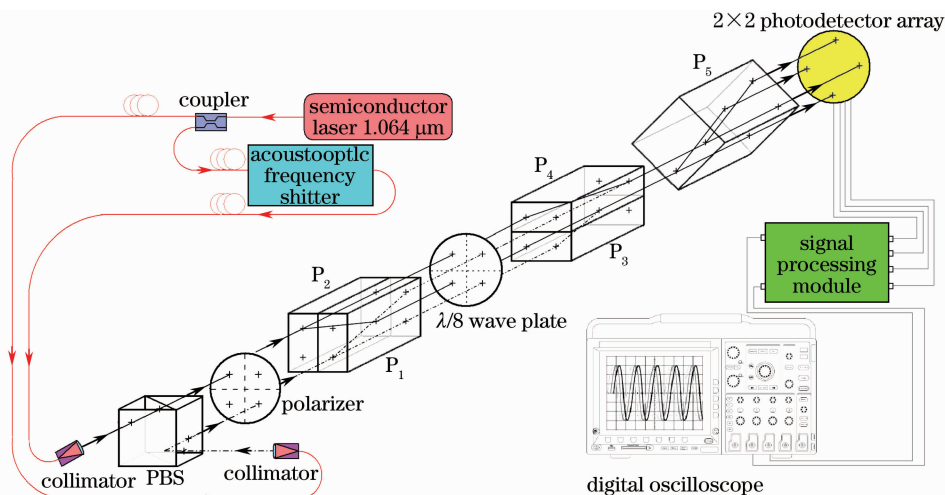


图 2 测试光学桥接器实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup to test the optical hybrid

截屏如图 3 所示,图中 $I_1(t)$ 为接收的同相光电流, $I_Q(t)$ 为接收信号的正交相光电流。显示接收的同相通道和正交通道余弦时间分布图。同步通道和正交通道具有几乎相同的振幅,两通道之间的相位差时间均值为 90.007° ,验证了(12)式的结果。测试结果验证了基于双折射晶体 2×4 90° 光学桥接器运行正确、有效。

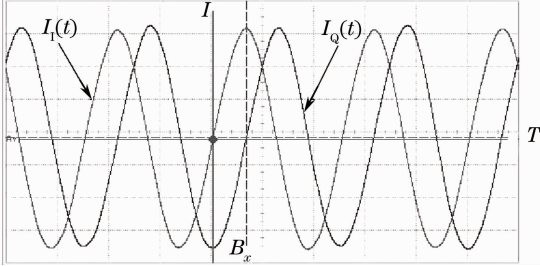


图 3 用安捷伦示波器接收到的输出信号振荡轨迹

Fig. 3 Oscilloscope trace of the output signals measured by an Agilent digital oscilloscope

4 讨 论

利用声光移频器引入相移的外差测量方法可以对光学桥接器进行简单、精确的快速校准。实验证明,微调 $\lambda/8$ 波片可以获得 90° 相位差的相位补偿,令 $\lambda/8$ 波片的快轴沿竖直 Y 方向,微调 $\lambda/8$ 波片,使波片旋转 δ 角,则从 $\lambda/8$ 波片出射波的琼斯矢量表示为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp\left(i \frac{\pi}{4}\right) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \approx \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} \exp\left[i\left(\frac{\pi}{4} + 2\delta\right)\right] & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

对应输出光的相位补偿角为 2δ :

$$\left(\frac{2\pi n'_{e1} D_{e1}}{\lambda} + \frac{2\pi n_o D_{o2}}{\lambda} - \frac{2\pi n_o D_{o1}}{\lambda} - \frac{2\pi n'_{e2} D_{e2}}{\lambda} \right) - 2\delta = 0, \quad (14)$$

因此通过旋转偏振片的方法可以为桥接器的相移提供大范围的相位补偿,但是补偿精度不高。

采用电光相位调制的相位补偿 $\varphi(E)$ 则可以实现相位误差的线性精密补偿。优化补偿方案如图 4 所示。

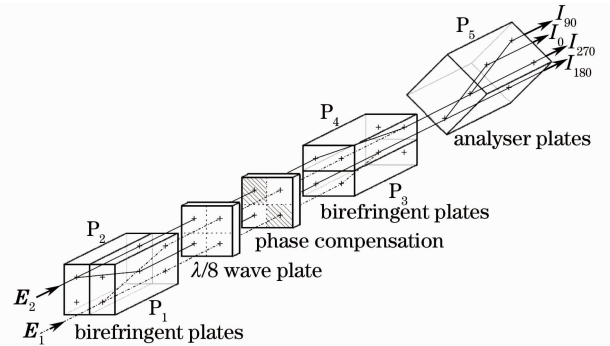


图 4 相位补偿优化方案示意图

Fig. 4 Phase compensation optimization scheme diagram of the hybrid

输出四路光束可表示为

$$\mathbf{E}'_{11} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} A_1 \exp\left[i\left(\bar{\omega}_s t - \varphi_s(t) + \varphi_{s0} + \frac{2\pi n_o D_{o1}}{\lambda} + \frac{\pi}{4} + \varphi(E)\right)\right] \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$\mathbf{E}'_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} A_1 \exp\left[i\left(\bar{\omega}_s t - \varphi_s(t) + \varphi_{s0} + \frac{2\pi n'_e D_{e1}}{\lambda}\right)\right] \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$\mathbf{E}'_{21} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} A_2 \exp\left[i\left(\bar{\omega}_L t + \varphi_{L0} + \frac{2\pi n_o D_{o1}}{\lambda} + \frac{\pi}{4} + \varphi(E)\right)\right] \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$\mathbf{E}'_{22} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} A_2 \exp\left[i\left(\bar{\omega}_L t + \varphi_{L0} + \frac{2\pi n'_e D_{e1}}{\lambda}\right)\right] \end{bmatrix}. \quad (18)$$

对应的电光调制相位补偿为

$$\left(\frac{2\pi n'_e D_{e1}}{\lambda} + \frac{2\pi n_o D_{o2}}{\lambda} - \frac{2\pi n_o D_{o1}}{\lambda} - \frac{2\pi n'_e D_{e2}}{\lambda} \right) - \varphi(E) = 0. \quad (19)$$

实际上,电光相位调制可以代替 $\lambda/8$ 波片作为相位延迟板。所以未来能够实现 90° 光学桥接器电压调谐,这对星载激光通信终端未来实现小型化、轻量化、低功耗和高码率具有实际意义。天然方解石也可以由大尺寸

的人工晶体(比如钽酸铋)取代。

5 结 论

设计制作了用于自由空间激光通信系统相干接收的基于晶体双折射的 2×4 90° 光学桥接器。 2×4 90° 光学桥接器包括四块相同结构的双折射平板,一块相位延迟平板和一块检偏双折射平板。可以成功实现 90° 相移四通道合成光束输出,测试结果表明晶体双折射自由空间 2×4 90° 光学桥接器结构简单,运行正确,稳定有效,并进一步给出了相位补偿和优化方案。下一步将实现具有结构紧凑,损耗低,相移稳定,噪声抑制良好和串扰低的双折射自由空间 2×4 90° 光学桥接器,并有望实现空间 2×4 90° 光学桥接器的电压调谐。

参 考 文 献

- 1 V. W. S. Chan. Free-space optical communications [J]. *Lightwave Technol.*, 2006, **24**(12): 4750~4762
- 2 L. G. Kazovsky, G. Kalogerakis, W. T. Shaw. Homodyne phase-shift-keying systems: past challenges and future opportunities [J]. *Lightwave Technol.*, 2006, **24** (12): 4876~4884
- 3 Xu Nan, Liu Liren, Liu Dean *et al.*. 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, 刘德安等. 自由空间相干光通信技术及发展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(8): 44~51
- 4 R. Lange, B. Smutny. Homodyne BPSK-based optical inter-satellite communication links[C]. *SPIE*, 2007, **6457**: 645703-1
- 5 R. Lange, B. Smutny. Optical inter-satellite links based on homodyne BPSK modulation: Heritage, status and outlook[C]. *SPIE*, 2005, **5712**: 1~12
- 6 B. Smutny, H. Kaempfer, G. Muehlnikel *et al.*. 5.6 Gbps optical inter-satellite communication link [C]. *SPIE*, 2009, **7199**: 719906-1
- 7 N. Xu, L. R. Liu, D. A. Liu *et al.*. Design of 2×6 optical hybrid in inter-satellite coherent laser communications [C]. *SPIE*, 2008, **7091**: 70910T-1
- 8 Liu Liren. Laser communications in space. I 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
- 9 S. H. Jeong, K. Morito. Optical 90° hybrid with broad operating bandwidth of 90 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34** (22): 3505~3507
- 10 L. G. Kazovsky, L. Curtis, W. S. Young *et al.*. All-fiber 90° optical hybrid for coherent communications[J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(3): 437~439
- 11 Y. Wang, W. R. Leeb. A 90° optical fiber hybrid for optimal signal power utilization [J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26** (19): 4181~4184
- 12 W. R. Leeb. Realization of 90° and 180° degree hybrids for optical frequencies [J]. *Arch. Elek. Uberfragung*, 1983, **37**: 203~206
- 13 W. R. Leeb. Optical 90° degrees hybrid Costas-type receivers [J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(18): 1431~1432
- 14 M. Bopp, G. Huether, T. Spatscheck *et al.*. BPSK homodyne and DPSK heterodyne receivers for free-space communication with Nd: Host lasers[C]. *SPIE*, 1991, **1522**: 199~209
- 15 R. Garreis, C. Zeiss. 90° optical hybrid for coherent receivers [C]. *SPIE*, 1991, **1522**: 210~219
- 16 Zhou Yu, Wan Lingyu, 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