

基于相干激光通信的空间光混频器光机结构设计

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 设计了一种应用于星间相干激光通信系统的新型空间光混频器。基于传统的空间光混频器光学原理方案, 加入一块相位补偿晶体, 去掉了两片 1/2 波片, 将两块偏振分光棱镜旋转一定角度, 能消除 1/2 波片由于加工误差对相位延迟造成的影响。研究了相位补偿晶体旋转角度与相对相位差补偿量的关系, 对相位补偿量的仿真曲线进行了分析。提出了一种空间光混频器相位检测方法, 利用该检测方法搭建实验平台, 通过实验数据验证了此方法对于相位补偿晶体的有效性。并针对新型空间光混频器光学结构进行了具体的机械结构设计。该装置可应用于空间相干接收系统。

关键词 光通信; 空间光混频器; 相干; 自由空间; 混频效率

中图分类号 TN929.13 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0906008

Opto-Mechanical Structure Design of the Space Optical Hybrid Based on 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 A new style space optical hybrid is designed for intersatellite coherent laser communication. Based on traditional principle scheme of the space optical hybrid, a phase compensation crystal is added. Two 1/2 wave plates are removed. Two polarization splitting prisms are rotated by a certain angle so as to remove the effect of phase delay due to processing errors of the 1/2 wave plates. The mathematical relationship between phase compensation crystal rotation angle and relative phase difference compensation amount is researched. A phase detection method of the space optical hybrid is proposed. The detection method is used to build experiment and the validity of the phase compensated crystal is proved by experimental data. Mechanical structure of the new style space optical hybrid is designed. The device can be applied to the space coherent receiving system.

Key words optical communications; space optical hybrid; coherence; free space; hybrid efficiency

OCIS codes 060.4510; 060.1660; 060.2920

1 引 言

星际激光通信利用光波作为信息的载体来实现卫星间的信息传递。早期卫星间激光通信采用强度调制/直接检测方式达到了中低速的通信要求。但

随着如今信息量爆炸式的增长, 中低速的通信速率已经不能满足人们日益增长的需求。传统的非相干通信系统由于激光器的发射功率和接受机的探测灵敏度, 限制了通信速率的进一步提高。利用相干探

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

测^[1-4]的方法可较大幅度地提高接收机的探测灵敏度。通过适当增加对中频信号起重要作用的本振光功率,可以增强接收机的探测灵敏度,实现了传统强度调制/直接探测无法逾越的瓶颈。空间相干激光通信在长距离、高速率通信方面具有较大的优势。空间光混频器^[5-9]是空间相干激光通信的核心部件,其混频效率^[10-11]和相位延迟精度决定了相干激光通信接收机探测灵敏度提高的幅度。故高效率空间光混频器的研制对自由空间相干激光通信具有重大研究意义。本文从空间光混频器光学原理出发,对空间光混频器进行了光机结构的设计。

2 空间光混频器的光学原理

空间光混频器主要是把远处传来的信号光与本

振激光在空间进行相干混频。其相对相位延迟形式主要取决于信号处理所采用的锁相环形式,相干混频输出的支路数主要考虑去除噪声等因素。科斯塔斯锁相环对激光线宽的要求相对较低,而且不存在信号处理支路与锁相支路间的串扰。本文主要针对应用于科斯塔斯锁相环的 90°空间光混频器进行光机结构设计。

如图 1 所示,设信号光 E_s 振动方向 45°,本振光 E_L 与 1/4 波片快轴夹角为 45°。偏振分束镜(PBS)偏振分光膜对 p 波产生的相位为 δ_p ,对 s 波产生的相位为 δ_s 。1/2 波片快轴与平行纸面的 p 波夹角为 θ , K_s 和 K_L 分别代表信号光和本振光振幅强度,四个输出端口信号 E_1, E_2, E_3, E_4 可以表示为

$$E_1 = \exp(i\delta_s) \cos 2\theta \{ K_s E_s + \tan 2\theta K_L E_L \exp[i(\delta_p - \delta_s)] \} \exp(i\delta_s), \quad (1)$$

$$E_2 = \exp(i\delta_s) \sin 2\theta \{ K_s E_s + \cot 2\theta K_L E_L \exp[i(\delta_p - \delta_s + \pi)] \} \exp(i\delta_p), \quad (2)$$

$$E_3 = \exp(i\delta_p) \cos 2\theta \{ K_s E_s + \tan 2\theta K_L E_L \exp[i(\delta_s - \delta_p + \pi/2)] \} \exp(i\delta_p), \quad (3)$$

$$E_4 = \exp(i\delta_p) \sin 2\theta \{ K_s E_s + \cot 2\theta K_L E_L \exp[i(\delta_s - \delta_p + 3\pi/2)] \} \exp(i\delta_s). \quad (4)$$

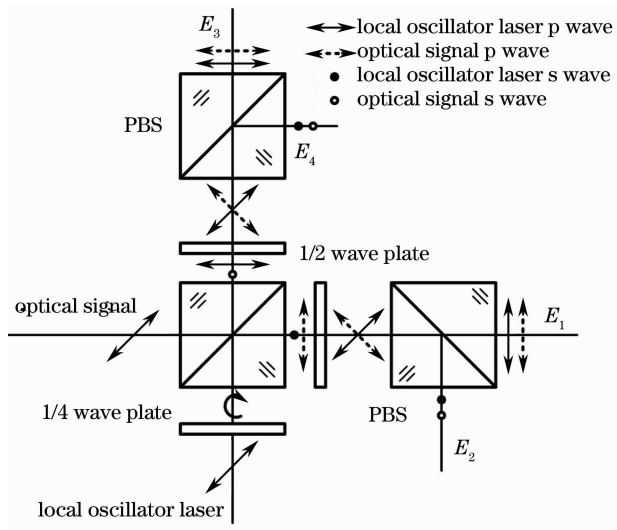


图 1 空间光混频器光学原理图

Fig. 1 Optical principle of the space optical hybrid

为了使信号光与本振光高效率相干混频,要求 $\tan 2\theta = \cot 2\theta = 1$,即 1/2 波片的快轴与平行纸面的波夹角为 22.5°。从(1)~(4)式可看出 E_1 和 E_2 端口相对相位差为 180°, E_3 和 E_4 端口相对相位差为 180°。 E_1 和 E_2 端口与 E_3 和 E_4 端口之间的相对相位差为 $\pi/2 + 2(\delta_s - \delta_p)$,为了后续电学去除调制信号获取本振光与信号光的相位信息,要求经过乘法器的 I、Q 两个支路相对相位差为 90°,即相位 $\pi/2 + 2(\delta_s -$

$\delta_p) = \pi/2$ 。这就要求第一块棱镜的偏振分光膜对 p 波和 s 波产生的相位相同。但是由于膜层的相位精度以及棱镜粘接过程中胶层的厚度都会产生额外的相位延迟,因此要想得到精确的 90°相位差,必须采用相对相位补偿的装置。

3 空间光混频器的相位补偿原理

空间光混频器的相位延迟精度作为衡量空间光混频器的性能指标显得尤为重要。但由于加工工艺等因素的影响,空间光混频器的相位精度很难保证,因此要提高相位精度,相位补偿调整环节必不可少。从晶体补偿角度出发,可以通过旋转晶体来实现相对相位差校正。基本原理如图 2 所示,其中晶体光轴与光线入射面法线平行。晶体绕 x 轴旋转,入射光线与晶体光轴存在夹角时,晶体由于双折射现象将把入射光分成 o 光和 e 光。设两束光光程差为 Δ ,o 光的折射率为 n_o ,e 光的折射率为 n_e ,晶体的折射率为 n_2 ,光线的入射角为 θ ,o 光的折射角为 θ_o ,e 光的折射角为 θ_e 。

根据折射定律得

$$\sin \theta = n_2 \sin \theta_e, \quad (5)$$

$$\sin \theta = n_o \sin \theta_o. \quad (6)$$

将 $n_2^2 = \frac{n_o^2 n_e^2}{n_o^2 \sin^2 \theta_e + n_e^2 \cos^2 \theta_e}$ 代入(5)式得

$$\tan \theta_e = \frac{n_e \sin \theta}{\sqrt{n_o^2 n_c^2 - n_o^2 \sin^2 \theta}}, \quad (7)$$

$$\Delta = (n_o \overline{OA} + \overline{AC}) - n_2 \overline{OB}, \quad (8)$$

$$\overline{OA} = d / \cos \theta_o, \quad (9)$$

$$\overline{OB} = d / \cos \theta_e, \quad (10)$$

$$\overline{AC} = d (\tan \theta_e - \tan \theta_o) \sin \theta. \quad (11)$$

根据光程与相位的对应关系 $\delta = 2\pi\Delta/\lambda$, 由(7)~(11)式可得

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_o d \left[\sqrt{1 - \left(\frac{\sin \theta}{n_o}\right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \theta}{n_e}\right)^2} \right]. \quad (12)$$

如图 2 所示, 当晶体绕 x 轴旋转 θ 角时, 结合(2)式和晶体相位补偿曲线(图 3)可知相位改变量 δ 的数值及其变化趋势。因而可通过旋转晶体来补偿空间光混频器四个输出端口的相对相位误差。

4 空间光混频器相位检测实验

90°空间光混频器四个输出端口的相对相位检测精度的高低, 对于空间光混频器整体装调十分关键。根据空间光混频器的性能指标, 设计出一种相对相位检测方法, 如图 4 所示, 图中 P 代表线偏振光的振动方向。利用两个 1550 nm 窄线宽半导体激光器通过保偏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, 光束在空间传输

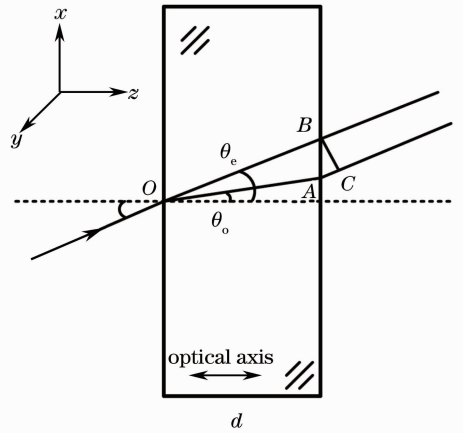


图 2 晶体相位补偿原理

Fig. 2 Compensation principle of crystal phase

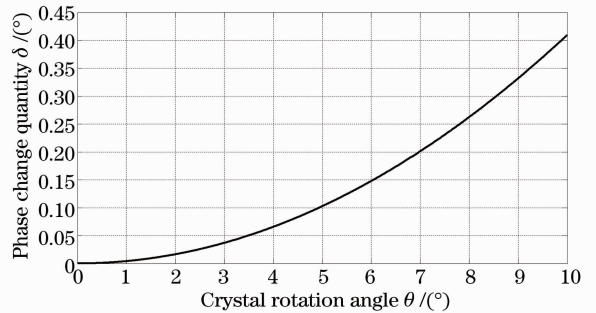


图 3 晶体相位补偿仿真曲线

Fig. 3 Simulation curve of crystal phase compensation

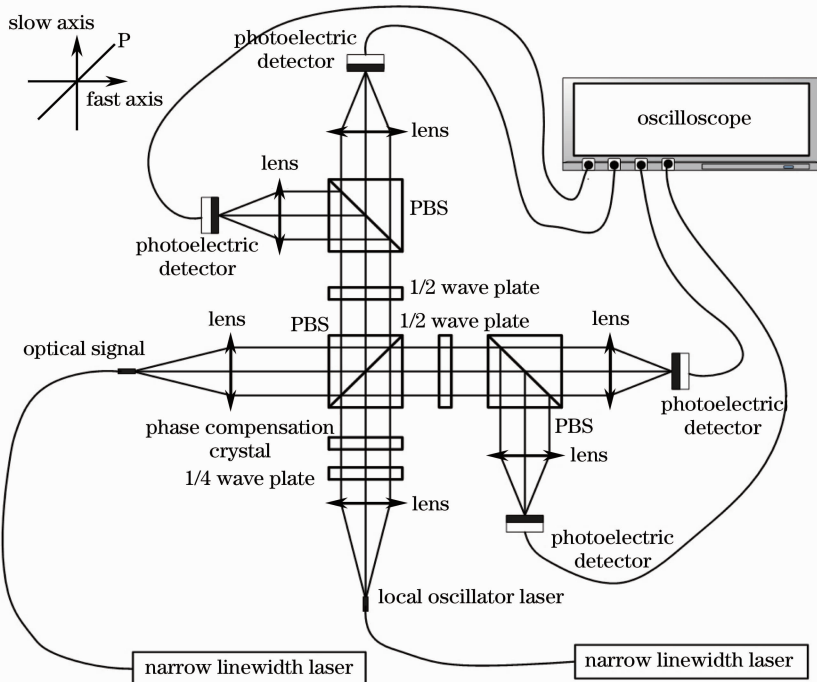


图 4 空间光混频器相位检测实验原理图

Fig. 4 Principle chart of space optical hybrid phase-detection experiment

经过空间光混频器内部光学元件后,由四个光电探测器接收,将光信号转变为电信号,通过示波器观察信号光与本振光的拍频波形,利用示波器上横坐标时间可以计算出空间光混频器四个输出端口的相对相位差。

图5为空间光混频器实验系统,1/4波片粘接到本振光准直器前方使其以圆偏振态出射,整体由调整架A固定。用于相位补偿的晶体安装到调整架B内,旋钮C用于旋转固定在调整架B内的光学晶体使其绕 x 轴(结合图2坐标系)转动。调整架D和调整架E用于固定1/2波片使其绕光传播方向旋转。实验搭建初期利用785 nm半导体激光器作为引导光源,调整光学元件的大致位置,利用光功率计作为检测手段,通过旋转调整架旋钮精调光学元件的位置,使光功率计示数达到最大。再利用1550 nm窄线宽半导体激光器替换作为引导光源的激光器,基于图4的原理示意图来检测空间光混频器的相位。通过示波器观测信号光与本振光产生的拍频信号(如

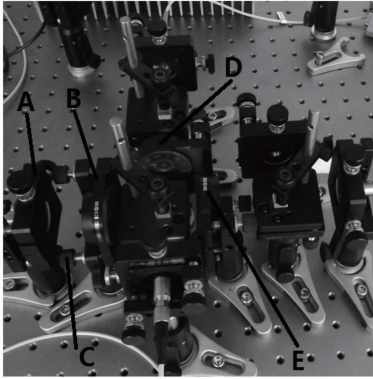


图5 空间光混频器实验实物图

Fig. 5 Actual object in the space optical hybrid experiment

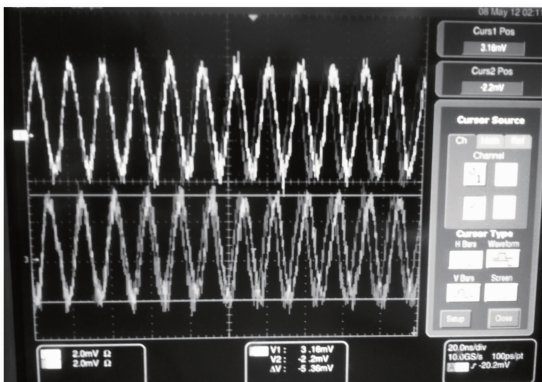


图6 示波器观测的拍频波形图

Fig. 6 Observing the beat wave with oscilloscope

图6所示),旋转相位补偿晶体,利用示波器实测的平衡支路与正交支路之间的相对相位差由 92° 减少到 91.6° 。从实验结果来看旋转相位补偿晶体对空间光混频器相对相位延迟具有一定的补偿作用。

5 空间光混频器光学与机械结构设计

结合 90° 空间光混频器相位检测实验,设计了一种新型 90° 空间光混频器。如图7所示,在本振光光路中加入楔板调整片和晶体补偿片来精确调整同相支路与正交相位支路之间的相对相位差。由于1/2波片主要作用是调整信号光分量和本振光分量的偏振方向使其旋转 45° ,实际光路中把两个1/2波片去掉,将第二个和第三个偏振分光棱镜旋转 45° 粘接到第一块偏振分光棱镜上。去掉两块1/2波片避免了由于1/2波片加工误差而引入的相位延迟误差。

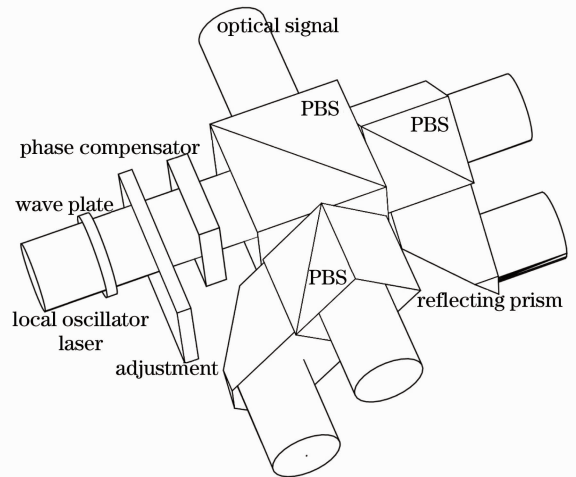


图7 90° 空间光混频器光学结构

Fig. 7 Optical structure of 90° space optical hybrid

如图8所示,晶体补偿片与其旋转结构粘接到一块,通过旋转补偿片的固定结构,使晶体补偿片绕 x 轴(结合图2坐标系)转动来补偿I、Q两支路之间的相对相位差。楔板调整片与其移动结构的凹槽粘接到一起,通过调节两侧的螺钉可以使调整片在滑杆上左右移动,使楔板不同位置进入光路来调整相对相位零位。 90° 空间光混频器的光学元件如图9所示安装在壳体内,第二块偏振分光棱镜和第三块偏振分光棱镜旋转 45° 后粘接到第一块偏振分光棱镜上。第一块偏振分光棱镜粘接到主镜的固定座上。信号光偏振态调整装置内有1/4波片和线偏振器及它们的固定结构。

信号光与本振光相干混频后输出四路平行光

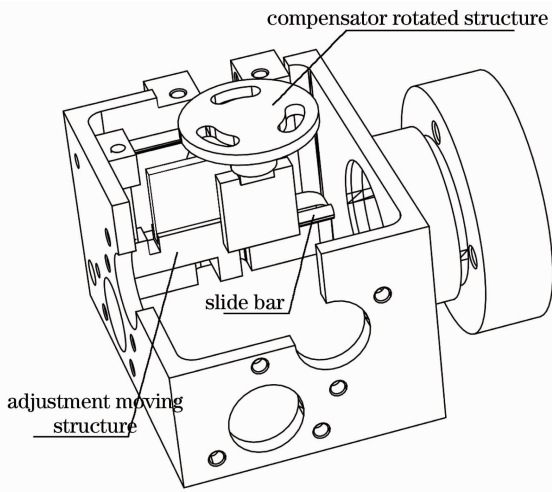


图 8 相位补偿调整结构

Fig. 8 Phase compensation adjustment structure

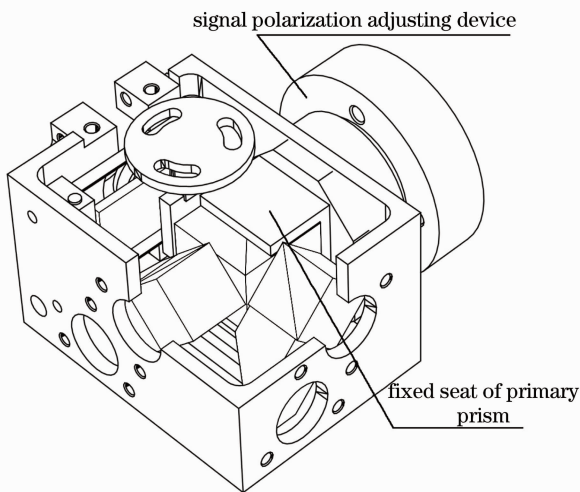


图 9 90°光混频器光学件固定结构图

Fig. 9 90° space optical hybrid optical structure chart

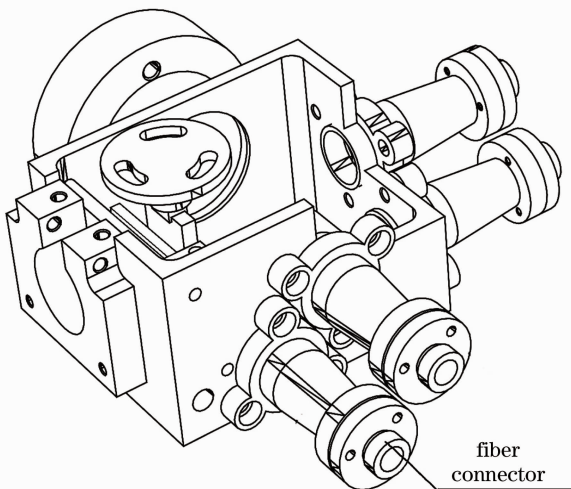


图 10 90°空间光混频器四个输出端口

Fig. 10 Four output ports of 90° space optical hybrid

束,经过如图 10 所示的透镜固定筒使平行光束会聚,通过调焦装置使相干混频后的会聚光耦合到光纤中,光纤的另一端连接到光电探测器上,将光信号转成电信号为相干激光通信接收系统后续电学处理做铺垫。

6 结 论

从空间光混频器光学原理出发,研究了空间光混频器中各光学元件的作用以及它们对空间光混频器性能的影响。设计了一套应用于自由空间相干激光通信 90°空间光混频器的光学与机械结构,通过在结构中引入补偿晶体来调整相对相位延迟,提高空间光混频器的性能指标。基于空间相干激光通信使用的光源,设计出一套空间光混频器相对相位检测方法。利用该相对相位检测原理,通过实验证明了采用旋转晶体方法对空间光混频器输出端口相对相位延迟误差的补偿作用。基于空间光混频器相位检测实验结果,设计出的 90°空间光混频器光机结构具有一定的实用性,可应用于空间相干激光通信接收系统。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 Yves Painchaud, Michel Poulin, Michel Morin, *et al.*. Performance of balanced detection in a coherent receiver [J]. *Opt Express*, 2009, 17(5): 3659-3672.
- 3 Wang Chunhui, Gao Long, Pang Yajun, *et al.*. Experimental investigation for relation between beam splitter coefficient and signal-to-noise ratio of 2 μm 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 μm 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.
- 4 Gao Long, Wang Chunhui, Li Yanchao, *et al.*. Investigation of balanced detection and receiver for 1.55 μm coherent wind lidar [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(6): 1064-1068.
高龙, 王春晖, 李彦超, 等. 1.55 μm 相干激光测风雷达平衡式探测接收实验[J]. *光子学报*, 2010, 39(6): 1064-1068.
- 5 Matthias Seimeta, Carl-Michael Weinert. Options, feasibility and availability of 2×4 90° hybrid for coherent optical systems [J]. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(3): 1317-1322.
- 6 S H Jeong, K Morito. Optical 90° hybrid with broad operating bandwidth of 90 nm [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(22): 3505-3507.
- 7 Zhou Yu, Wan Lingyu, Zhi Yanan, *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.
- 8 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.
- 9 Hou Peipei, Zhou Yu, Zhi Yanan, *et al.*. Free space optical $2 \times 4 90^\circ$ hybrid based on crystal birefringence [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3413–3416.
- 侯培培, 周煜, 职亚楠, 等. 晶体双折射自由空间 $2 \times 4 90^\circ$ 光学桥接器[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3413–3416.
- 10 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. 信号光与本振光振幅分布对星间相干光通信系统混频效率的影响[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1006001.
- 11 Ma Zongfeng, Zhang Chunxi, Zhang Zhaoyang, *et al.*. Signal-noise ratio in optical heterodyne detection [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(5): 889–891.
- 马宗峰, 张春熹, 张朝阳, 等. 光学外差探测信噪比研究[J]. 光学学报, 2007, 27(5): 889–891.

栏目编辑: 王晓球