

基于低频外差干涉的光纤环形器重合度检测*

戴玉¹⁾²⁾ 张文喜^{1)†} 孔新新¹⁾ 沈杨翊¹⁾²⁾ 徐豪¹⁾ 张晓强¹⁾

1) (中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094)

2) (中国科学院大学光电学院, 北京 101400)

(2023 年 12 月 9 日收到; 2024 年 1 月 31 日收到修改稿)

光纤点衍射环形器是激光相干多普勒测振系统中光纤光路和空间光光路耦合的关键器件, 其耦合效率等性能参数对测振系统测量准确度和测量距离的提升具有重要意义. 常规环形器重合度检测采用能量监测法和远场重合度监测法, 不能对光纤失配因素进行定量分析, 环形器耦合效率的一致性无法保障. 针对上述问题, 提出了一种基于低频外差干涉的相位检测技术, 利用干涉相位信息进行光纤相对姿态解算, 可有效解决光纤环形器重合度定量检测的问题. 对不同光纤相对姿态形成的干涉波前进行了仿真分析和实验验证, 给出了光纤相对横向位移、纵向位移和光轴偏离角度与干涉相位 PV(peak-to-valley) 值、Zernike 系数和环形器耦合效率间的规律, 实现了干涉相位到光纤失配因素的分离解算, 解算结果可指导光纤相对姿态的调整. 最后通过实验验证了该技术的可行性, 结果表明该技术对于光纤横向位移的检测精度优于 $1\ \mu\text{m}$, 为提升光纤环形器重合度提供了新的检测途径.

关键词: 光纤失配, 对准误差, 外差干涉测量, 耦合效率**PACS:** 42.87.Bg, 07.60.Vg, 42.79.Qx**DOI:** 10.7498/aps.73.20231941

1 引言

目前激光相干多普勒测振系统已广泛应用于航空航天部件测试^[1]、微型电子机械系统 (micro electromechanical system, MEMS) 检测等领域^[2]进行研究应用, 并延伸拓展到伪装目标识别^[3]、激光语音侦听^[4]、农产品检测^[5]等领域. 激光测振方法按照是否采用光调制分为零差^[6]和外差^[7]两类, 按照光束传输媒介分为空间光和光纤两类. 商用测振系统为减小环境振动和温度变化等因素, 大多采用空间光结构, 由于系统集成时光学元件的偏心和倾斜, 空间光光路结构的干涉效率较低. 采用光纤结构传输系统内部光束^[8,9], 具有干涉效率高、体积小、质量小等优点, 但所用环形器中光纤端面相对空间位置的偏移会造成空间光与光纤耦合效率下

降, 是此技术应用中面临的难题.

对于光纤失配造成的耦合效率下降, 国内外已有较多研究^[10-12], 研究主要围绕光纤端面的倾斜、错位等失配因素对耦合效率的影响开展分析^[13,14], 实际装调中以能量法和远场重合度监测法为主. 能量法是根据实际耦合的光功率大小进行耦合效率的评估^[15], 可以较直接地获得耦合效率, 但无法检测光纤重合度, 只能通过遍历空间位置获取最大效率的方式进行装调. 远场重合度监测法^[16,17]可以在视觉上评估光纤失配项, 但无法定量分析光纤相对姿态, 且由于方法中使用聚焦透镜, 聚焦透镜与光纤之间的空间位移与旋转又会引入测量误差, 造成检测精度下降. 且远场重合度监测法无法直接分析耦合效率, 还需能量法配合验证.

针对光纤环形器耦合效率难以升维解算光纤相对姿态的难题, 提出了一种基于低频外差干涉波

* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFF0706300) 和中国科学院青年创新促进会 (批准号: 2020131) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangwx@aircas.ac.cn

前检测技术的方法,通过干涉波像差监测光纤端面的失配因素来源,根据失配因素及干涉波像差PV(peak-to-valley)值的大小估算耦合效率,根据波前像差拟合的Zernike系数解算光纤相对姿态,解决了光纤端面之间的相对横向位移、纵向位移和光轴角度偏离的检测问题,为光纤环形器重合度的提升提供了新的监测手段和装调方法。

2 理论模型

2.1 光纤环形器基本构型

光纤干涉结构的激光相干多普勒测振系统中多采用M-Z (Mach-Zehnder) 干涉结构,系统中包括激光器、移频器、光纤耦合器和平衡探测器等。如图1(a)所示,光纤中的光经准直聚焦镜聚焦于被测的振动物体表面,经多普勒频移后的测量光返回测振系统中,与参考光干涉,干涉信号经采集解调处理后得到物体振动信息。

在此系统中,出射至目标表面的激光从图1(b)中的光纤环形器1端口出射,经光纤环形器中的反射镜和偏振分光棱镜后从2端口出射,再经波片和准直聚焦镜到达目标表面,从目标表面返回的激光

经2端口和偏振分光棱镜后由3端口接收,接收的光经干涉解调后得到目标表面的振动信息。理想情况下1端口和3端口的光纤接头相对姿态一致,光学相对空间位置重合。但实际安装中会经常出现偏移和倾斜等情况。

图2分别展示了2个光纤相对姿态的横向位移、纵向位移和光轴倾斜情况。针对不同光纤相对姿态采用分离变量法进行研究,将横向位移又细分为X轴位移和Y轴位移,纵向位移为Z轴位移,光轴倾斜为绕X轴旋转角度。

2.2 基于低频外差干涉的相位检测技术

检测系统原理如图3所示,激光器的光经1分2保偏耦合器后分成2路,其中一路从光纤输出后,依次经过光纤环形器1端口、反射镜、PBS(polarizing beam splitting)棱镜到达2端口后,再经1个线偏振片到达探测器;另一路经过低频外差的声光移频器移频后从光纤环形器3端口到达光纤环形器中的PBS棱镜,再经同样的线偏振片到达探测器,两路光在探测器靶面上形成干涉图样。理想情况下2个光纤接头的相对姿态一致时,光纤端面到达探测器靶面的光程为 L 。

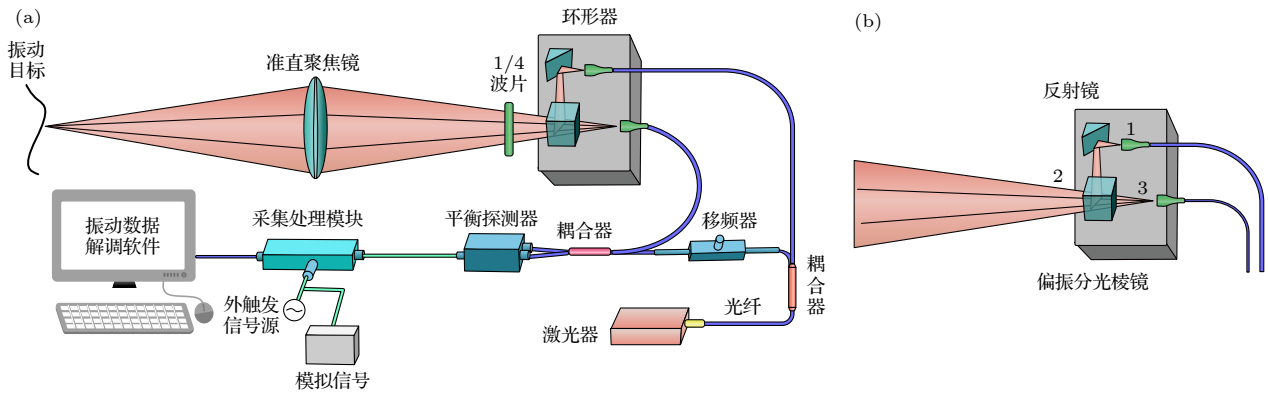


图1 多普勒测振系统及光纤环形器示意图 (a) 光纤M-Z式激光相干多普勒测振系统示意图; (b) 光纤环形器示意图

Fig. 1. Schematic diagrams of laser Doppler vibration measurement system and fiber circulator: (a) Schematic diagrams of fiber M-Z laser coherent Doppler vibration measurement system; (b) schematic diagram of fiber circulator.

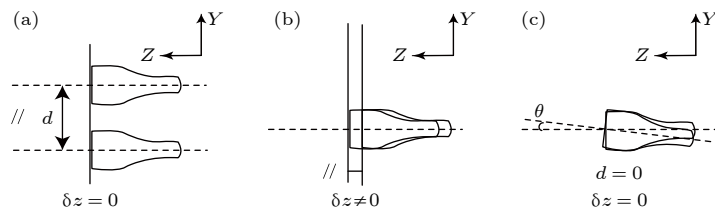


图2 光纤相对姿态示意图 (a) 横向位移; (b) 纵向位移; (c) 光轴倾斜

Fig. 2. Schematic diagram of relative position of optical fibers: (a) Transverse displacement; (b) longitudinal displacement; (c) the optical axis tilts around the X-axis.

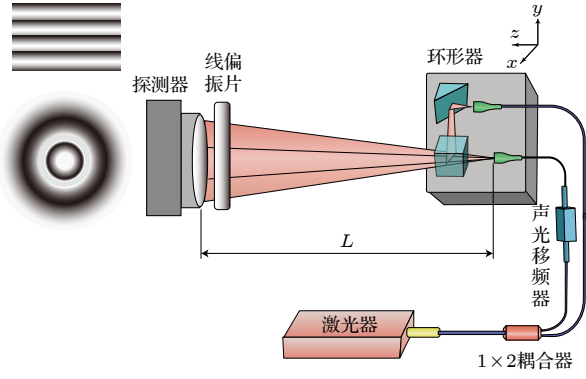


图3 检测系统原理图

Fig. 3. Schematic diagram of detection system.

考察两个光纤端面到达探测器面上任意位置 P 处的场分布, 将两个光纤端面看成是两个发出基模高斯光束的光源, 分析两个光源在 P 处的波动情况.

各自到达 P 点处的场分布为

$$E_1(P, t) = A_1(P) \cdot \exp(-i \cdot \Phi_1(P, t)), \quad (1a)$$

$$E_2(P, t) = A_2(P) \cdot \exp(-i \cdot \Phi_2(P, t)), \quad (1b)$$

其中振幅为

$$A_1(P) = \frac{1}{w(z_1)} \cdot \exp\left(-\frac{r_1^2}{w^2(z_1)}\right), \quad (2a)$$

$$A_2(P) = \frac{1}{w(z_2)} \cdot \exp\left(-\frac{r_2^2}{w^2(z_2)}\right), \quad (2b)$$

$w(z) = w_0 \sqrt{1 + (z/Z_R)^2}$, Z_R 为瑞利距离.

相位为

$$\begin{aligned} \Phi_1(P, t) &= \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_1 - \omega_1 t + \delta_1 \\ &= \frac{k(x_1^2 + y_1^2)}{2R(z_1)} - \arctan \frac{z_1}{z_R} + kz_1 - \omega_1 t + \delta_1, \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} \Phi_2(P, t) &= \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_2 - \omega_2 t + \delta_2 \\ &= \frac{k(x_2^2 + y_2^2)}{2R(z_2)} - \arctan \frac{z_2}{z_R} + kz_2 - \omega_2 t + \delta_2. \end{aligned} \quad (3b)$$

上述公式中可以看出高斯光束的传输中振幅、相位都与波矢方向相关, 对于光纤来说, 端面出射光在空间中分布受到轴向倾斜的影响, 给描述此种状态下的振幅和相位带来不便. 采用建立坐标系并通过坐标变换的方式, 考察两个场在探测器面的分布. 以其中一个光纤端面建立坐标系, 视为理想光纤端面, 该光纤端面的空间位置确定为 $(0, 0, 0)$, 波矢方向为 z 轴正向, 在此坐标系下探测器靶面中心的空间位置为 $(0, 0, L)$; 另一光纤端面相对于理

想光源存在空间位移和倾斜, 空间位置在理想光纤的坐标系下为 $(\delta x, \delta y, \delta z)$, 波矢方向与 z 轴正向夹角为 θ . 考察两个光源在探测器像面上的干涉情况, 引入齐次坐标进行空间位置变换, 在理想状态的坐标轴中, 探测器上任意一点在另一光源的坐标轴中位置为 P_2 , 则在理想光源坐标轴中的位置 P_1 为

$$P_1(x_1, y_1, z_1) = P_2(x_2, y_2, z_2) \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{M}, \quad (4a)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \delta x & \delta y & \delta z & 1 \end{bmatrix}, \quad (4b)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4c)$$

其中 \mathbf{T} 为平移变换矩阵, \mathbf{M} 为旋转矩阵, 由于 2 个光纤为同一种光纤, 且只考察主光线角度、横向位移、纵向位移各自对干涉的影响, 矩阵缩放比例为 1. 通过坐标系变化, 得到有角度和位移偏离的光源在探测器面上的光场分布 $E_2(P(x_1, y_1, z_1), t)$.

得到 $E_1(P(x_1, y_1, z_1), t)$ 和 $E_2(P(x_1, y_1, z_1), t)$, 即可在同一坐标系下的探测器靶面处得到两束光的干涉情况, 由于采用低频外差干涉, P 点的光强不仅与空间分布相关, 还与时间因子相关. 探测器靶面 P 点处光强为

$$\begin{aligned} I(P, t) &= A_1^2(P) + A_2^2(P) + 2A_1(P)A_2(P) \\ &\quad \times \cos(\Delta\varphi_P - \Delta\omega t + \delta_1 - \delta_2), \end{aligned} \quad (5)$$

与时间相关的项为 $\Delta\omega t$, $\Delta\omega$ 为外差频率, 采用低频外差 5 Hz, 探测器帧频是外差频率的 5 倍, 通过五步移相法^[18]可解调得到两束光干涉的相位差信息.

2.3 耦合效率计算模型

耦合效率 η 可以在任意平面之间对光场进行适当的变换^[19,20], 2 个光纤端面间的耦合效率可以等效于探测器靶面处的耦合效率,

$$\eta = \frac{\left| \iint E_2 E_1^* ds \right|^2}{\left| \iint E_2 E_2^* ds \right| \left| \iint E_1 E_1^* ds \right|}. \quad (6)$$

根据光场分布情况, 不仅可以得到探测器靶面上的干涉分布, 还可以对耦合效率进行计算, 分析

不同光纤失配原因对系统耦合效率下降的影响.

3 仿真分析及讨论

3.1 横向位移、纵向位移和光轴夹角对干涉相位的影响

系统仿真中, 采用 1550 nm 保偏光纤, 光纤模场直径 MFD 为 10.5 μm , 探测器靶面距离光纤端面的光程 L 为 80 mm, 探测器靶面尺寸为 5.1 mm \times 5.1 mm, 像元大小 30 μm . 光纤端面的光到达探测器靶面位置时, 光斑直径为 14.35 mm, 可以充满探测器靶面.

图 4—图 6 分别为光纤相对姿态只含横向位移 (X 方向、 Y 方向)、纵向位移 (Z 方向) 和光轴夹角 (绕 X 轴旋转 θ) 时, 对耦合效率和干涉波前 PV 值的影响.

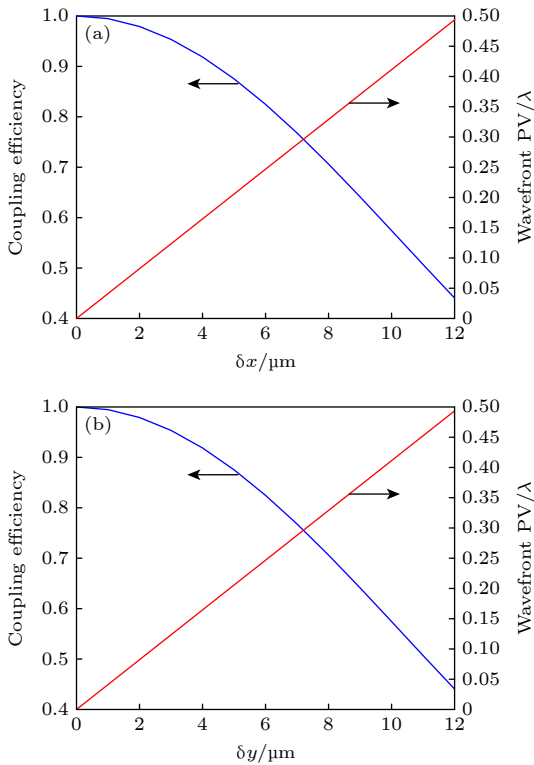


图 4 横向位移与耦合效率和波前 PV 值关系曲线 (a) X 方向横向位移; (b) Y 方向横向位移

Fig. 4. The curves of coupling efficiency and wavefront PV value versus transverse displacement: (a) X -direction transverse displacement; (b) Y -direction transverse displacement.

存在位移或是旋转的情况, 都会造成干涉波前 PV 值的增大, 耦合效率随干涉波前 PV 值的升高而下降, 但二者并非为线性反比关系; 耦合效率的下降受到各光纤相对姿态因素的影响也不同. 各

因素对耦合效率下降的敏感度影响从小到大依次为纵向位移、光轴夹角、横向位移, 其中 X 方向和 Y 方向的横向位移对耦合效率下降的影响一致.

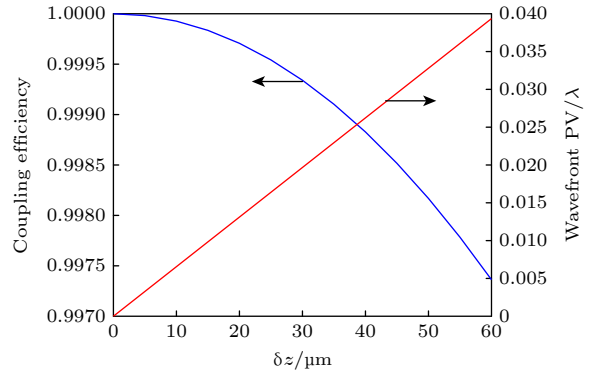


图 5 纵向位移 (Z 方向) 与耦合效率和波前 PV 值关系曲线

Fig. 5. The curves of coupling efficiency and wavefront PV value versus longitudinal displacement (Z -direction).

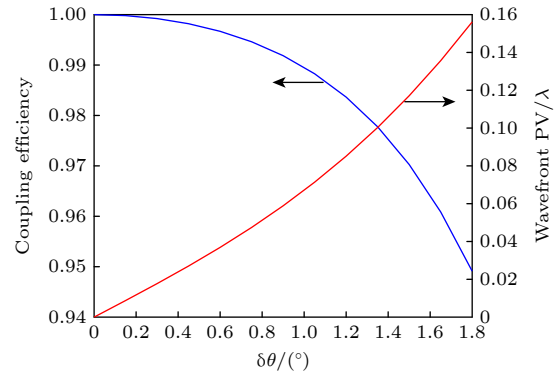


图 6 光轴夹角 (绕 X 轴旋转) 与耦合效率和波前 PV 值关系曲线

Fig. 6. The curves of coupling efficiency and wavefront PV value versus optical axis angle (rotation about X -axis).

无论是 X 方向还是 Y 方向, 横向位移与干涉波前 PV 值均呈线性增大关系, 且 10 μm 的横向位移导致耦合效率下降至 0.5744, 波前 PV 值为 0.411 λ . 相比而言, 纵向位移 10 μm 时, 耦合效率为 0.999, 波前 PV 值为 0.007 λ . 同样的偏移量级, 纵向位移对耦合效率的影响可以忽略. 两光纤端面光轴夹角为 1°时, 耦合效率为 0.988, 波前 PV 值为 0.067 λ .

图 7 为光纤相对姿态包括横向位移 ($X = 2 \mu\text{m}$, $Y = 3 \mu\text{m}$)、纵向位移 ($Z = 5 \mu\text{m}$)、光轴夹角 ($\theta = 0.5^\circ$) 同时存在情况下的干涉图和相位图. 由于各因素共同影响干涉波前 PV, 且由于不同相对姿态对耦合效率的影响不一致, 只通过波前 PV 值的大小无法直接判断光纤相对姿态, 也无法直接估算耦合效率.

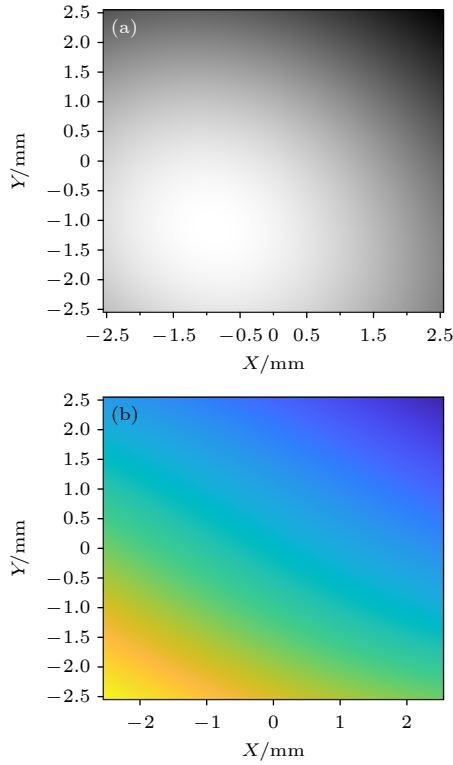


图 7 光纤相对姿态不同因素同时存在时干涉图和相位图 (a) 干涉图; (b) 相位图

Fig. 7. Interferogram and phase diagram of optical fibers with different kinds of alignment errors co-existing; (a) Interferogram; (b) phase diagram.

3.2 光纤重合度与干涉图 Zernike 系数的关系

为了解决波前 PV 值的大小无法直接判断光纤相对姿态和估算耦合效率的问题, 对干涉相位图的分析引入 Zernike 系数. 光纤相对姿态不重合引起耦合效率下降的根本原因在于光纤模场不匹配, 前述分析中表征光纤模场的几何分布的光纤性能参数为模场直径 MFD. 因此选用具有正交性和描述圆孔径特性方面具有对应性的 Zernike 多项式进行系数拟合, 对干涉波前相位信息进行定量分析. 根据得到的干涉波前相位信息进行 9 项 Zernike 多项式拟合, 重点分析了 Z2—Z5 项系数, 得到如图 8—图 11 所示的不同相对姿态因素与 Zernike 系数的关系.

从拟合的 Zernike 系数可以看出, X 方向的横向位移量与 Z3 项呈线性变化关系, Y 方向的横向位移量与 Z2 项呈线性变化关系, 横向位移 $1\text{ }\mu\text{m}$, Z2 或 Z3 系数变化量为 -5.51×10^{-6} , 而 Z4 和 Z5 的变化则在 10^{-10} 及更小的量级, 因而可以根据 Z2 或 Z3 的具体数值定量得到横向位移距离和方向.

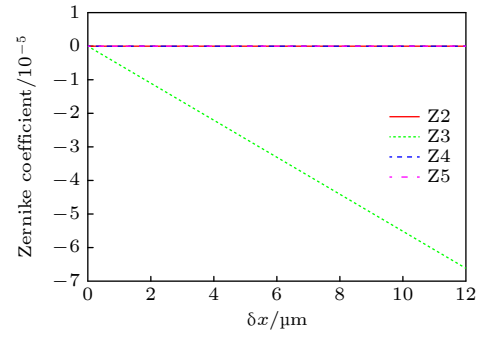


图 8 横向位移 (X 方向) 与 Zernike 系数关系曲线

Fig. 8. The curves of Zernike coefficients versus transverse displacement (X-direction).

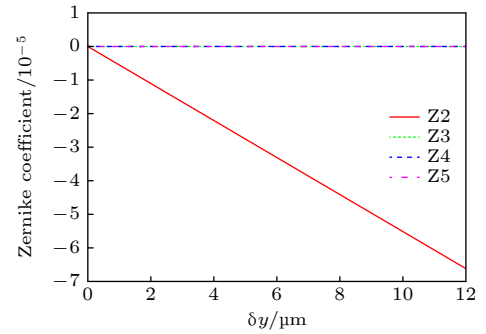


图 9 横向位移 (Y 方向) 与 Zernike 系数关系曲线

Fig. 9. The curves of Zernike coefficients versus transverse displacement (Y-direction).

Z 方向的纵向位移主要引起 Z2, Z3 和 Z4 项的变化. 如图 10(a) 所示, Z 方向的纵向位移引起的 Z2 和 Z3 系数变化值一致, 但是纵向位移变化 $10\text{ }\mu\text{m}$ 引起的 Z2 和 Z3 系数变化量在 10^{-8} 量级, 因而当光纤相对姿态存在横向位移时, 纵向位移带来的系数变化会被湮没. 如图 10(b) 所示, 纵向位移引起的 Z4 项的变化量级为 10^{-11} , Z5 项的变化量级为 10^{-24} , Z4 和 Z5 可以作为区分与其他相对姿态因素的判断依据.

光轴 θ 会引起 Z2—Z5 项集体变化, 当光轴夹角变化 0.5° 时引起的 Z2 和 Z3 的系数变化量级小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 横向位移引起的系数变化量级, Z4 项又与纵向位移带来的变化在同一量级, 但 Z5 项的变化量级为 10^{-11} , 因此, Z5 项可作为是否存在光轴旋转的判断依据.

图 7(b) 的波前相位经 Zernike 多项式拟合后, 与光纤相对姿态分别独立存在横向位移 ($X = 2\text{ }\mu\text{m}$, $Y = 3\text{ }\mu\text{m}$)、纵向位移 ($Z = 5\text{ }\mu\text{m}$) 和光轴夹角 ($\theta = 0.5^\circ$) 的情况相对比, Zernike 第 2 至第 5 项系数的数据如表 1 所示.

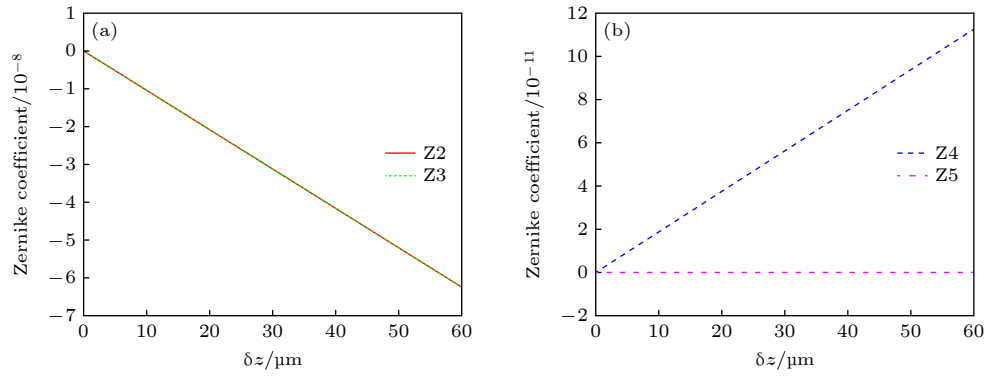
图 10 纵向位移 (Z 方向) 与 Zernike 系数关系曲线 (a) Z2 和 Z3 曲线; (b) Z4 和 Z5 曲线

Fig. 10. The curves of Zernike coefficients versus longitudinal displacement (Z -direction): (a) Z2 and Z3 vs. Z displacement; (b) Z4 and Z5 vs. Z displacement.

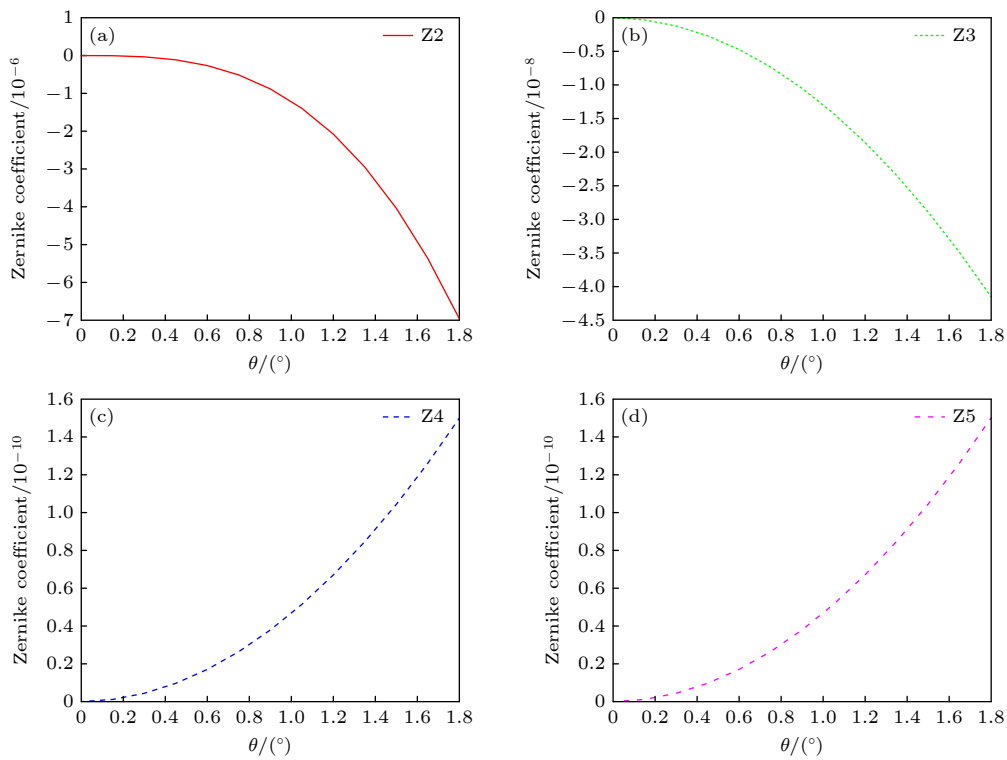
图 11 光轴夹角 (绕 X 轴旋转) 与 Zernike 系数关系曲线 (a) Z2 曲线; (b) Z3 曲线; (c) Z4 曲线; (d) Z5 曲线

Fig. 11. The curves of Zernike coefficients versus optical axis angle (rotation about X -axis): (a) Z2 vs. angle; (b) Z3 vs. angle; (c) Z4 vs. angle; (d) Z5 vs. angle.

表 1 不同光纤相对姿态对应 Zernike 系数比较

Table 1. Comparison of Zernike coefficients corresponding to different kinds of alignment errors.

| 光纤相对姿态 | | | | Z2 | Z3 | Z4 | Z5 |
|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $\delta x/\mu\text{m}$ | $\delta y/\mu\text{m}$ | $\delta z/\mu\text{m}$ | $\theta/(^{\circ})$ | | | | |
| 2 | 3 | 5 | 0.5 | -1.67×10^{-5} | -1.10×10^{-5} | 2.14×10^{-11} | 1.20×10^{-11} |
| 2 | 0 | 0 | 0 | -4.02×10^{-19} | -1.10×10^{-5} | 1.85×10^{-22} | 1.08×10^{-21} |
| 0 | 3 | 0 | 0 | -1.65×10^{-5} | 1.03×10^{-18} | -1.41×10^{-21} | 8.87×10^{-22} |
| 0 | 0 | 5 | 0 | -5.20×10^{-9} | -5.20×10^{-9} | 9.38×10^{-12} | -1.03×10^{-25} |
| 0 | 0 | 0 | 0.5 | -1.54×10^{-7} | -3.30×10^{-9} | 1.19×10^{-11} | 1.19×10^{-11} |

根据多重影响因素与单一因素影响对 Zernike 系数的 2—5 项对比可以发现, 多重影响因素 Z2—Z5 项的系数近似为各单一因素引起的 Z2—Z5 项的系数之和, 在 Z2—Z5 项系数数量级上的偏差不超过 0.01, 可以作为光纤相对姿态定性和定量分析的依据.

如表 2 所示将多重影响因素与单一因素影响对耦合效率和波前 PV 值的对比, 单一因素影响对波前 PV 值影响的累加值为 0.2392λ , 与多重影响因素的波前 PV 值 0.2359λ 对比, 偏差在 0.0033λ ; 单一因素影响的耦合效率累计相乘值为 0.9316, 与多重影响因素的耦合效率 0.9215 相比, 偏差在 0.01. 光纤相对姿态耦合效率可以根据光纤相对姿态各单一因素的影响进行整体耦合效率的估算.

表 2 不同光纤相对姿态对应耦合效率和波前 PV 值比较

Table 2. Comparison of coupling efficiency and wavefront PV value corresponding to different kinds of alignment errors.

| 光纤相对姿态 | | | | 耦合效率 | 波前 PV/ λ |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------|--------|------------------|
| $\delta x/\mu\text{m}$ | $\delta y/\mu\text{m}$ | $\delta z/\mu\text{m}$ | $\theta/(\circ)$ | | |
| 2 | 3 | 5 | 0.5 | 0.9215 | 0.2359 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0.9792 | 0.0823 |
| 0 | 3 | 0 | 0 | 0.9536 | 0.1234 |
| 0 | 0 | 5 | 0 | 0.9999 | 0.0033 |
| 0 | 0 | 0 | 0.5 | 0.9978 | 0.0302 |

4 实验系统及测量结果

为进一步验证理论模型与仿真分析, 结合自研的低频外差驱动电路和光纤调节机构搭建实验平

台, 器材包括 1550 nm 激光器、 1×2 光纤耦合器、声光移频器、环形器、线偏振片和探测器, 如图 12 所示.

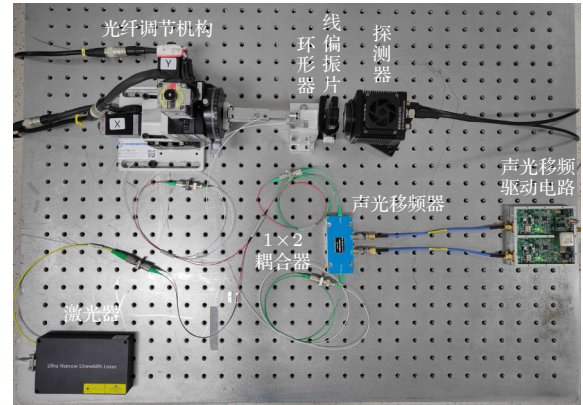


图 12 实验装置图

Fig. 12. Diagram of the experimental setup.

低频外差驱动电路的差频为 5 Hz, 采用五步移相法解调相位, 探测器采集频率为 25 Hz. 探测器选用深圳天盈光电 IH320 型号的短波红外相机, 像元尺寸为 $30\mu\text{m}$, 采集图像区域大小为 $5.1\text{mm}\times 5.1\text{mm}$.

光纤调节机构具备 X, Y, Z 方向微米级调节的功能, 可以控制光纤的横向移动和纵向移动. 环形器中的一个光纤固定在环形器上, 另一光纤由光纤调节机构夹持, 并经其控制移动, 寻找与固定光纤的空间相对重合位置. 根据干涉条纹调至波前 PV 值小于一个波长的范围内, 得到如图 13(a) 所示的干涉相位图, 波前 PV 值为 0.1338λ .

根据实验获得的相位图进行 Zernike 系数拟合, 获得 Z2—Z5 项系数, 与仿真数据进行比对, 如表 3 所示.

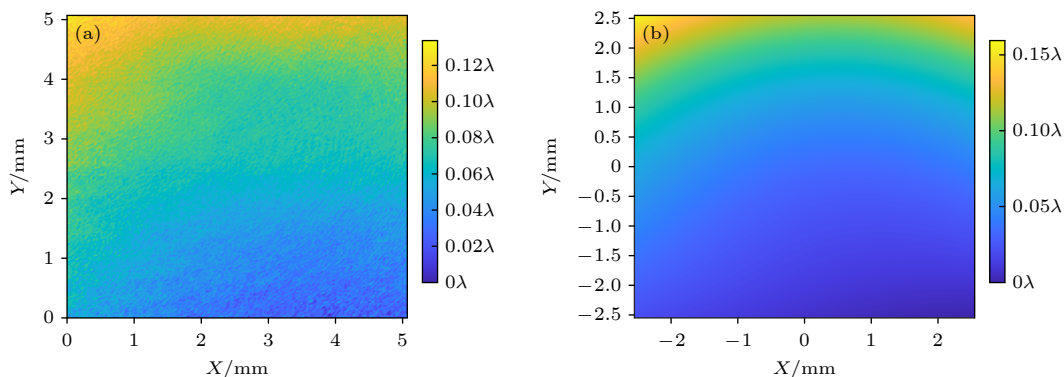


图 13 实验获得的干涉相位图及仿真图对比 (a) 实验获得的干涉相位图; (b) 根据实验结果拟合 Zernike 系数解算得到的相对位置信息获得的仿真干涉相位图

Fig. 13. The experimental phase diagram compared with the simulation diagram: (a) Phase diagram obtained by experiment; (b) simulated phase diagram obtained from calculated relative position information based on experimental results fitting Zernike coefficients.

表 3 实验结果与对应 Zernike 系数比较

Table 3. Comparison of experimental results and simulation Zernike coefficients.

| | 光纤相对姿态 | | | | Z2 | Z3 | Z4 | Z5 |
|-----|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | $\delta x/\mu\text{m}$ | $\delta y/\mu\text{m}$ | $\delta z/\mu\text{m}$ | $\theta/(^{\circ})$ | | | | |
| 实验值 | — | — | — | — | 9.01×10^{-6} | -2.74×10^{-6} | 2.28×10^{-11} | -5.75×10^{-11} |
| 仿真值 | 0.5 | -1.4 | 42 | -1.1 | 9.31×10^{-6} | -2.75×10^{-6} | 2.24×10^{-11} | -5.65×10^{-11} |
| | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 2.26×10^{-19} | -2.75×10^{-6} | -2.28×10^{-22} | -3.60×10^{-22} |
| | 0 | -1.4 | 0 | 0 | 7.71×10^{-6} | -6.33×10^{-19} | 6.38×10^{-22} | -1.01×10^{-21} |
| | 0 | 0 | 42 | 0 | -4.37×10^{-8} | -4.37×10^{-8} | 7.88×10^{-11} | 1.30×10^{-24} |
| | 0 | 0 | 0 | -1.1 | 1.60×10^{-6} | 1.56×10^{-8} | -5.64×10^{-11} | -5.65×10^{-11} |

表 4 横向位移纠正后的实验结果与对应 Zernike 系数比较

Table 4. Comparison of experimental results after transverse displacement correction and simulation Zernike coefficients.

| | 光纤相对姿态 | | | | Z2 | Z3 | Z4 | Z5 |
|-----|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | $\delta x/\mu\text{m}$ | $\delta y/\mu\text{m}$ | $\delta z/\mu\text{m}$ | $\theta/(^{\circ})$ | | | | |
| 实验值 | — | — | — | — | -9.62×10^{-8} | 4.96×10^{-7} | 6.45×10^{-12} | -1.79×10^{-11} |
| 仿真值 | -0.09 | 0.02 | — | — | -1.10×10^{-7} | 4.96×10^{-7} | — | — |
| | -0.09 | 0 | 0 | 0 | -4.07×10^{-20} | 4.96×10^{-7} | 4.10×10^{-23} | 6.47×10^{-23} |
| | 0 | 0.02 | 0 | 0 | -1.10×10^{-7} | 9.04×10^{-21} | -9.11×10^{-24} | 1.44×10^{-23} |

将实验数据获得的值与仿真数据进行插值计算, 得到 X 方向偏差为 $0.5 \mu\text{m}$, Y 方向偏差为 $-1.4 \mu\text{m}$, Z 方向偏差为 $42 \mu\text{m}$, 光轴夹角 (绕 X 轴旋转) 为 -1.1° , 此相对空间位置偏移时的仿真相位图如图 13(b) 所示. 根据前述仿真分析, 此角度光轴夹角引起的 $Z4$ 项系数变化与 Z 方向位移偏差引起的 $Z4$ 项系数变化在同一量级, 由于光纤调节机构只具备 X , Y , Z 方向的微米级调节功能, 不具备光轴夹角的调节功能, 因此实验中只针对 X 和 Y 方向进行横向位移调节, 得到调节后的相位图如图 14 所示, 波前 PV 值为 0.0212λ . 横向位移纠正后的实验测量结果与仿真系数比较如表 4 所示.

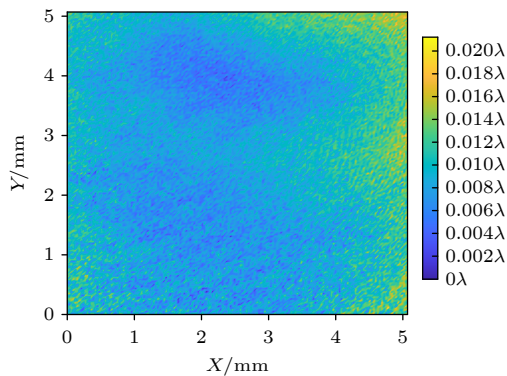


图 14 调节后的实验干涉相位图

Fig. 14. Experimental interference phase diagram after displacement correction adjustment.

前述分析中对耦合效率影响最大是横向位移 (X 方向、 Y 方向), 实验系统测量的横向位移分辨

力优于 $1 \mu\text{m}$. 受限于目前光纤调节机构尚不具备绕 X 轴旋转调节功能, 与 $Z4$ 和 $Z5$ 项相关的角度偏离纠正后, 才能进行纵向位移偏离的纠正. 根据实验中横向位移偏离量, 结合光纤重合度与耦合效率的仿真结果, 实验中横向偏移量导致的光纤环形器耦合效率预计优于 0.9894.

5 结 论

基于低频外差干涉技术通过相位信息的获取与解算, 实现光纤环形器重合度的检测, 本文对其原理及可行性进行了分析与实验验证. 结果表明, 该方法能够实现横向位移、纵向位移和光轴倾斜的直接检测, 不仅可以用于定性判断光纤失配的来源因素, 还可以定量分析该项因素的大小, 进而得到整体耦合效率的估值. 经实验验证, 横向位移检测精度优于 $1 \mu\text{m}$. 相比于目前既有的检测方法, 该方法解决了光纤重合度调节的量化问题, 具有较高的测量精度, 检测结构及组成紧凑, 检测成本较低. 该方法可拓展到光纤器件与空间光器件配准、光学系统像差检测和平面波波前检测等领域, 具有较大的应用潜力.

参考文献

- [1] Zhang Q, Wang H B, Jiang R, Du C Y 2022 *Aeroengine* **48** 76 (in Chinese) [张琦, 王洪斌, 姜睿, 杜传宇 2022 航空发动机 **48** 76]

- [2] Fu X, Liu Y Q, Hu X D, Li D C, Hu X T 2004 *J. Optoelectron. Laser* **11** 1357
- [3] Ebert R, Lutzmann P, Hebel M 2008 *IEEE Photonics Global* Singapore, 2008, p1
- [4] Zhu Z, Li W, Molina E, Wolberg G 2007 *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Minneapolis, MN, USA, 2007 p1
- [5] Zhang W 2016 *Ph. D. Dissertation* (Hangzhou: Zhejiang University) (in Chinese) [张文 2016 博士学位论文 (杭州: 浙江大学)]
- [6] Liu A D, Yu M 2015 *J. Vib. Shock* **34** 212 (in Chinese) [刘爱东, 于梅 2015 振动与冲击 **34** 212]
- [7] Lv T 2019 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: Chinese Academy of Sciences Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics) (in Chinese) [吕韬 2019 博士学位论文 (长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)]
- [8] Li R, Poulos N M, Zhu Z G, Xie L P 2012 *Appl. Opt.* **51** 5011
- [9] Han X Y, Lv T, Wu S S, Li Y Y, He B 2019 *Opt. Laser Technol.* **111** 575
- [10] He Q, Zhao Z G, Ye X D, Luo C, Zhang D C, Wang S F, Xu X P 2022 *Micromachines* **13** 324
- [11] Alaruri S D 2015 *Optik* **126** 5923
- [12] Liu X Y, Guo J, Li G N, Chen N, Shi K 2019 *Results Phys.* **12** 1044
- [13] Zhang M Q, Zhi D, Chang Q, Ma P F, Ma Y X, Su R T, Wu J, Zhou P, Si L 2019 *Laser Phys.* **29** 115101
- [14] Yan Y X, Zheng Y, Duan J A, Huang Z L 2020 *Opt. Fiber Technol.* **58** 102301
- [15] Phattaraworamet T, Saktioto T, Ali J, Fadhali M, Yupapin P P, Zainal J, Mitatha S 2010 *Optik* **121** 2240
- [16] Ding L, Liu D Z, Gao Y Q, Zhu B Q, Zhu J, Peng Z Y, Zhu J Q, Yu L J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5713 (in Chinese) [丁莉, 刘代中, 高妍琦, 朱宝强, 朱俭, 彭增云, 朱健强, 俞立钧 2008 物理学报 **57** 5713]
- [17] Tao J Q, Hu Y, Xiang Z H, Tu J K, Zheng G 2021 *Electron. Sci. Technol.* **34** 37 (in Chinese) [陶嘉庆, 胡越, 项华中, 涂建坤, 郑刚 2021 电子科技 **34** 37]
- [18] Zhu M X, Bai F Z, Gan S M, Huang K Z, Huang L H, Wang J X 2013 *Optik* **124** 5624
- [19] Wallner O, Winzer P J, Leeb W R 2002 *Appl. Opt.* **41** 637
- [20] Kang J M, Guo P, Zhang Y C, Chen H, Chen S Y, Ge X Y 2013 *SPIE Fifth International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging* Beijing, China, June 25, 2013 p891417

Non-coincidence detection of fiber optic circulators based on Hertz-level frequency-shifting heterodyne interferometry^{*}

Dai Yu¹⁾²⁾ Zhang Wen-Xi^{1)†} Kong Xin-Xin¹⁾
 Shen Yang-Yi¹⁾²⁾ Xu Hao¹⁾ Zhang Xiao-Qiang¹⁾

¹⁾ (*Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*)

²⁾ (*School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China*)

(Received 9 December 2023; revised manuscript received 31 January 2024)

Abstract

The fiber optic circulator in the form of point diffraction is a key component for coupling fiber optical path and spatial optical path in a laser Doppler vibration measurement system. The coupling efficiency and other performance parameters of fiber optic circulator are great significant for improving measurement accuracy and working distance of vibration measurement system. The conventional circulator coincidence detection methods include energy monitoring method and far-field coincidence monitoring method, which cannot be used to quantitatively analyze the fiber mismatch factors. Therefore, the consistency of the circulator coupling efficiency cannot be guaranteed. To solve these problems, a phase detection technology based on Hertz-level frequency-shifting heterodyne interferometry is proposed. The interferometry phase information is used to calculate the relative spatial positions of optical fibers, and this technology performs quantitative detection in the fiber alignment process. The interference wavefront formed by relative spatial positions of optical fibers is simulated and validated experimentally. The curves of coupling efficiency and wavefront PV value versus different kinds of alignment errors are simulated and analyzed. By fitting the interference wavefront with the Zernike polynomials, the correspondence between different kinds of alignment errors and Zernike coefficients is obtained. The value of Z2 (Zernike coefficient) can be used as the basis for judging whether there is transverse displacement in the Y direction. Similarly, Z3 corresponds to the transverse displacement in the X direction, Z4 corresponds to the longitudinal displacement in the Z direction and Z5 corresponds to the optical axis angle. Through this correspondence relationship, the quantitative separation and analysis of fiber mismatch factors are realized. The experimental results show that the accuracy of this method for measuring lateral displacement is better than 1 μ m. According to the phase diagram obtained from the experiment, Zernike coefficient fitting is performed. The lateral displacement deviation, longitudinal displacement deviation, and angular deviation are calculated by the coefficients of Z2 to Z5. The fiber adjustment mechanism corrects the transverse displacement deviation. It provides a new detection method for realizing fiber alignment and mismatch correction. Compared with the existing detection methods, the phase detection method based on Hertz-level frequency-shifting heterodyne interferometry solves the quantification problem of fiber coincidence adjustment. This method has the advantages of high measurement accuracy, compact detection structure and composition, and low detection cost. This method has great potential applications in the fields of optical fiber and spatial optical device alignment, optical system aberration detection, and planar wavefront detection.

Keywords: fiber mismatch, alignment error, heterodyne interferometry, coupling efficiency

PACS: 42.87.Bg, 07.60.Vg, 42.79.Qx

DOI: [10.7498/aps.73.20231941](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231941)

^{*} Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2022YFF0706300) and the Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Sciences (Grant No. 2020131).

[†] Corresponding author. E-mail: zhangwx@aircas.ac.cn

基于低频外差干涉的光纤环形器重合度检测

戴玉 张文喜 孔新新 沈杨翊 徐豪 张晓强

Non-coincidence detection of fiber optic circulators based on Hertz-level frequency-shifting heterodyne interferometry

Dai Yu Zhang Wen-Xi Kong Xin-Xin Shen Yang-Yi Xu Hao Zhang Xiao-Qiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 084206 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231941

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231941>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于多光束混合外差干涉的相位增强技术研究

Multi beam hybrid heterodyne interferometry based phase enhancement technology

物理学报. 2020, 69(19): 190601 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200281>

基于光纤锥和纤芯失配的Mach-Zehnder干涉湿度传感器

Mach-Zehnder interferometer based on fiber taper and fiber core mismatch for humidity sensing

物理学报. 2018, 67(2): 024212 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171677>

频差偏差对全视场外差测量精度的影响

Effect of frequency difference deviation on full-field heterodyne measurement accuracy

物理学报. 2018, 67(2): 020601 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171837>

基于高分辨率激光外差光谱反演大气CO₂柱浓度及系统测量误差评估方法

Atmospheric CO₂ column concentration retrieval based on high resolution laser heterodyne spectra and evaluation method of system measuring error

物理学报. 2020, 69(14): 144201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200125>

基于量子增强型光纤马赫-曾德尔干涉仪的低频信号测量

Measurement of low-frequency signal based on quantum-enhanced fiber Mach-Zehnder interferometer

物理学报. 2018, 67(24): 244202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181335>

基于噪声免疫腔增强光外差分子光谱技术实现光纤激光器到1530.58 nm NH₃亚多普勒饱和光谱的频率锁定

Frequency locking of fiber laser to 1530.58 nm NH₃ sub-Doppler saturation spectrum based on noise-immune cavity-enhanced optical heterodyne molecular spectroscopy technique

物理学报. 2018, 67(10): 104207 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172541>