

环形器噪声对激光干涉测量系统影响分析

郝义伟^{1,2,3}, 孔新新^{1,2}, 才啟胜^{1,2}, 张文喜^{1,2,3*}, 伍洲^{1,2}, 戴玉^{1,2,3}, 王永彪^{1,2}¹中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;²中国科学院计算光学成像技术重点实验室, 北京 100094;³中国科学院大学光电学院, 北京 100049

摘要 本文提出一种光学环形器噪声评价指标, 介绍激光外差干涉原理。通过建立典型环形器在激光干涉系统位移测量中的噪声传递模型并结合环形器的噪声来源, 分析和论证环形器非线性误差系数与杂散光相位对系统位移测量误差的影响, 提出以环形器方向性为环形器噪声评价指标的误差评价方法, 通过数值仿真验证其适用性。针对环形器噪声的主要来源, 基于理论分析模型设计并研制一种点衍射空间光环形器。搭建验证系统并与商用典型环形器进行对比, 点衍射空间光环形器方向性达到 129 dB, 较商用典型环形器提高 66 dB, 实现较高精度的目标位移测量。

关键词 测量; 干涉测量; 环形器; 噪声分析; 方向性; 杂散光

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0912003

Analysis of Effect of Circulator Noise on Laser Interferometry System

Hao Yiwei^{1,2,3}, Kong Xinxin^{1,2}, Cai Qisheng^{1,2}, Zhang Wenxi^{1,2,3*}, Wu Zhou^{1,2},
Dai Yu^{1,2,3}, Wang Yongbiao^{1,2}¹Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;²Key Laboratory of Computational Optical Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100094, China;³School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In this paper, we propose an evaluation index for optical circulator noise and explained the principle of laser heterodyne interference. Then, we establish a noise transfer model for a typical circulator in the displacement measurement by laser interferometry systems. In addition, in combination with the noise source of the circulator, we demonstrate the influence of the nonlinear error coefficient of the circulator and the phase of stray light on the displacement measurement error. Furthermore, we propose an error evaluation method with the circulator directivity as the noise evaluation index and verified its applicability by numerical simulation. Aiming at the main source of noise of the circulator, a kind of point diffraction spatial optical circulator is designed and developed based on theoretical analysis model. This circulator has a directivity of 129 dB, the directivity of circulator is 66 dB higher than that of typical commercial circulator, thus achieving high-precision measurement of target displacement.

Key words measurement; interferometry; circulator; noise analysis; directivity; stray light

OCIS codes 120.3180; 120.4640; 290.2648

收稿日期: 2020-09-29; 修回日期: 2020-12-11; 录用日期: 2020-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(61605217)

* E-mail: zhangwenxi@aoe.ac.cn

1 引言

激光干涉测量系统采用光学方法对非接触目标的表面物理量进行精密测量,该系统已深入到物理测量的各个领域^[1-9],其中外差多普勒测量技术采用外差干涉方法获取运动目标的多普勒频移信息以反演物体的运动信息,具有测量精度高、信噪比高、稳定性好以及能够分辨运动方向的优点,已广泛应用于物体运动的测量^[10-13]。

外差多普勒测量系统中的光学收发天线和干涉模块是激光干涉测量系统的核心器件,一般称为光学环形器。光信号经过环形器后会引入环形器噪声,这会影响到外差干涉光路中接收到的回波光能量,从而产生光信号噪声,进而降低解调信号的信噪比,已有部分学者对其展开一定的讨论和研究。Tobar 等^[14]发现了铁氧体光学环形器噪声在工作过程中不断变化,使得光频率发生改变,这为频率测量系统带来很多相位噪声;Hsu 等^[15]比较了几种环形器的内部结构,认为偏振分光器件相比于双折射晶体或偏振模体积全息光栅有较大的优势;Fujii^[16]分析了环形器内部由旋光角度偏差的非理想偏振引起的杂散光;孔新新等^[17]分析了由环形器和准直镜头的前向散射形成的杂散光在激光外差干涉测振系统中对解调振幅造成的影响;陈洪芳等^[18]研究了偏振分光镜分光性能非理想对外差干涉系统的影响等。然而,由于激光干涉测量系统中光学环形器的光路设计原理多样,光学结构复杂,目前噪声的主要来源以及噪声对具体测量系统影响的分析不够完善,这为激光干涉测量系统进一步提高信噪比和测量精度带来困难。

针对上述困难,本文从环形器的组成、噪声传播过程、噪声来源、噪声评价指标以及噪声对测量误差的影响等方面进行论述,建立环形器噪声传递模型并系统地给出典型环形器的噪声分析方案,并通过实验对比分析其对激光干涉测量系统的影响。

2 基本原理

2.1 多普勒外差探测原理

多普勒外差干涉技术利用具有一定频差的双光束进行干涉,实现对光波多普勒效应的测量。理想情况下,假设信号光的物理表达式为

$$E_{ss} = A_s \cos(\omega t + \varphi_s), \quad (1)$$

式中: A_s 为信号的光振幅,与激光出射功率、被测物表面反射率和传播过程中的能量衰减有关; ω 为光

波的角频率; t 为时间; φ_s 为相位变化。参考光与信号光同源,经过声光移频器移频后与信号光发生干涉。设参考光场(由于参考光的相位值稳定,为了方便计算设其值为 0)的物理表达式为

$$E_{rr} = A_r \cos[(\omega + \omega_0)t], \quad (2)$$

式中: A_r 为参考光的振幅; ω_0 为参考光的移频量。两束光发生理想干涉后被去直流光电探测器接收,由于受到光电探测器相应频率的限制,光场中的二倍光频信号难以被探测到,所以理想的电信号物理表达式为

$$I_0 = GA_s A_r \cos(\omega_0 t - \varphi_s), \quad (3)$$

式中: G 为光电探测器的光电转换增益,表示输出电流值与输入光功率的转换率。电流信号通过光电探测器后,其交流分量包含了目标运动所引起的相位变化信息,经过模数(AD)转换、解调和相位解缠等步骤后即可得到 φ_s 。 φ_s 与目标运动位移 x_0 的对应关系可表示为

$$x_0 = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi_s, \quad (4)$$

式中: λ 为激光波长。因此,利用多普勒外差干涉技术对信号光进行探测,可以求得目标物的位移信息。

2.2 环形器噪声

激光干涉系统中的环形器可分为光纤环形器和空间光环形器两种,两者采用的光分离和光隔离的技术原理不同。虽然环形器的内部结构不同,但在干涉系统中实现的功能类似。典型三端口光学环形器的基本结构如图 1 所示。

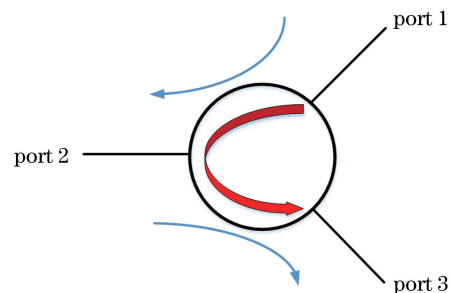


图 1 激光干涉系统环形器的原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of laser interferometer ring

激光干涉测量系统需要携带目标物运动信息的信号光与参考光发生干涉。以图 1 为例,光束若从端口 1 输入,则通过环形器后从端口 2 输出,端口 3 无输出;光束若从端口 2 输入,则通过环形器后从端口 3 输出,端口 1 无输出。根据光的独立传播定律,端口 2 可以同时输入和输出光束且互不影响,因此在激光干涉系统中利用环形器使光源由端口 1 输

入,信号光由端口 3 输出,从而实现非接触测量。

在激光干涉测量系统的实际测量过程中,激光器噪声、移频器噪声、解调过程量化噪声、滤波器噪声和环形器噪声等都会影响最终解算的位移量^[19-23]。光学环形器是干涉测量系统的核心组成部分之一,环形器内部所引入的环形器噪声会对信号光产生影响,最终形成测量误差。

为了探究环形器噪声的传播规律,对激光干涉测量系统中的典型环形器中的噪声传播过程分析,典型环形器的内部结构如图 2 所示。光源出射通过分束器件后分为两束光,一束光通过移频器移频形成参考光后进入光电探测器中;另一束光作为环形

器的输入光进入端口 1,通过起偏器形成的 s 偏振光经过反射镜以及偏振分光棱镜反射后经过 1/4 波片以形成圆偏振光,最后从端口 2 出射并到达运动目标物的表面。信号光在运动目标物的表面发生反射,使携带目标物的运动信息进入端口 2 后返回环形器中,再次通过 1/4 波片来改变偏振方向以形成 p 偏振光,通过偏振分光镜区别于 s 偏振光的反射路径发生透射,在此形成分离的发射光束和回波光束。最终通过检偏器来保留信号光的 s 偏振分量,使其通过端口 3 后作为输出光并从环形器出射,从而完成环形器的功能。输出光进入后端路径并与参考光发生干涉,从而实现干涉测量。

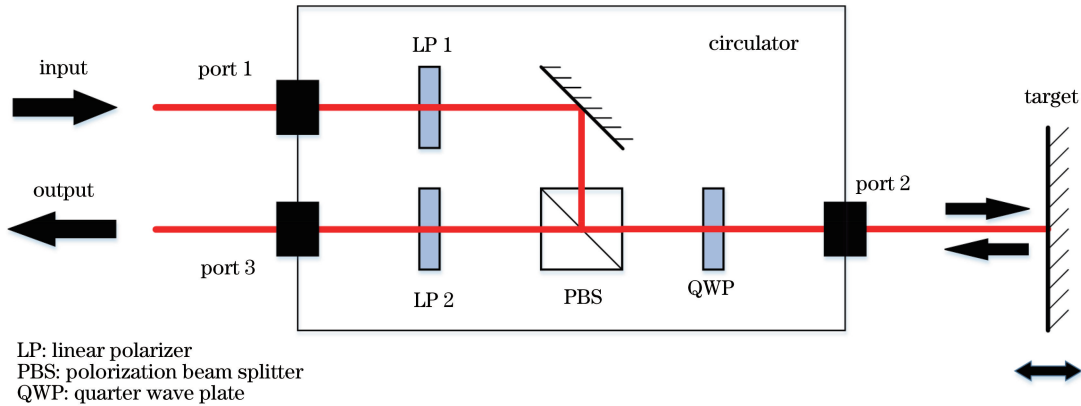


图 2 典型环形器的内部结构

Fig. 2 Internal structure of typical circulator

从图 2 可以看到,信号光进入环形器前,其能量已被目标物和传播介质吸收,进入环形器后环形器内部的光学器件会进一步衰减能量,其中对信号光幅值影响较大的器件是偏振分光镜。偏振分光镜分光性能非理想对环形器噪声的影响实际上体现在不同偏振态光信号通过偏振分光棱镜后的透射率非理想,具体来自偏振分光棱镜的放置角度偏差、器件本身频率-透射率的关系和偏振灵敏度不理想等。此外,反射镜会对频率展宽和偏振非理想的出射激光进行调制,一般定制的反射镜对 s 光的反射率约为 98%,对 p 光的反射率约为 93%,这均会进一步影响信号光的偏振度。检偏器和 1/4 波片对不同偏振态和不同波长的光信号透射率也不同,这使通过检偏器与 1/4 波片的信号光势必发生由透射率非理想造成的幅值衰减与噪声增加。由此建立噪声传递关系,因 E_{ss} 受到环形器噪声的影响,则光场物理表达式可改写为

$$E_{ssc} = T_D R_s T_{PBS}(\omega) T_P A_s \cos(\omega t + \varphi_s), \quad (5)$$

式中: T_D 为信号光通过起偏器和检偏器后的透射

率; R_s 为反射镜对 s 偏振光的反射率; $T_{PBS}(\omega)$ 为偏振分光棱镜的波长(角频率)-偏振透射率函数,表征偏振分光棱镜在不同偏振态下光透射率与光波长的关系; T_P 为 1/4 波片的透射率。

环形器不仅会对信号光进行调制,同时也会引入不规则的杂散光,杂散光的主要参数有杂散光振幅和杂散光相位。杂散光振幅与环形器内部光学机械器件的表面平整度、色散影响、透射率影响、温度变化所导致的光学机械结构变形位移影响,以及光学器件倾斜所导致的光路非理想传播等有关。杂散光初相位由光源相位决定,而杂散光在环形器内部传播过程中经历的色散、振动、温度变化和光纤弯折等不确定因素均会导致杂散光相位的变化,因此由环形器引起的杂散光场物理表达式为

$$E_{st} = A_{st} \cos(\omega t + \varphi_{st}), \quad (6)$$

式中: A_{st} 为杂散光的振幅,由入射光强与环形器内部各元件表面的散射系数决定; φ_{st} 为杂散光的相位,由杂散光传播路径决定。因杂散光与信号光不相关,则干涉光可以视作信号光、杂散光和参考光的

三光束干涉^[24]。与双光束干涉类似,三光束干涉后经过探测器二极管,可以将光信号转换为电信号,解调后计算得到目标位移,物理表达式为

$$x_{\text{CAL}} = \frac{\lambda}{4\pi} \arctan \left[\frac{\sin \varphi_s + a \sin \varphi_{\text{st}}}{\cos \varphi_s + a \cos \varphi_{\text{st}}} \right], \quad (7)$$

式中: a 为非线性误差系数,即

$$a = \frac{A_{\text{st}}}{T_{\text{D}} R_s T_{\text{PBS}}(\omega) T_{\text{p}} A_s}. \quad (8)$$

由(7)式可以看到,对于所求目标物的运动相位,此运算结果存在由环形器噪声引起的计算误差,具体表现为由 φ_{st} 和 a 造成的非线性误差。环形器噪声伴随光信号存在于探测、转换和解调的过程并传递到输出信号中,最终导致信噪比降低,引起测量误差,影响测量精度。

2.3 评价指标

为了评价由环形器噪声引起的测量误差,将(4)式与(7)式作差,得到引入环形器噪声传递的测量结果与理想测量结果间的相对位移残差 e_{circle} ,物理表达式为

$$e_{\text{circle}} = x_0 - x_{\text{sCAL}} = \frac{\lambda}{4\pi} \left[\arctan \left(\frac{\sin \varphi_s}{\cos \varphi_s} \right) - \arctan \left(\frac{\sin \varphi_s + a \sin \varphi_{\text{st}}}{\cos \varphi_s + a \cos \varphi_{\text{st}}} \right) \right]. \quad (9)$$

由反正切函数加减公式可得

$$\arctan \alpha \pm \arctan \beta = \arctan \left(\frac{\alpha \pm \beta}{1 \mp \alpha\beta} \right). \quad (10)$$

求得(9)式可得

$$e_{\text{circle}} = \frac{\lambda}{4\pi} \arctan \left(\frac{\frac{\sin \varphi_s}{\cos \varphi_s} - \frac{\sin \varphi_s + a \sin \varphi_{\text{st}}}{\cos \varphi_s + a \cos \varphi_{\text{st}}}}{1 + \frac{\sin \varphi_s}{\cos \varphi_s} \times \frac{\sin \varphi_s + a \sin \varphi_{\text{st}}}{\cos \varphi_s + a \cos \varphi_{\text{st}}}} \right) = \frac{\lambda}{4\pi} \arctan \left[\frac{a \sin(\varphi_s - \varphi_{\text{st}})}{1 + a \cos(\varphi_s - \varphi_{\text{st}})} \right]. \quad (11)$$

位移残差是实际测量结果与理想位移信号在时间域上的简单作差,在误差原理中被称为绝对误差。(11)式表明了环形器噪声对位移测量精度的影响,非线性误差系数 a 和杂散光相位 φ_{st} 共同决定了干涉仪的位移测量误差。如果存在评价非线性误差系数 a 和杂散光相位 φ_{st} 的技术指标,便可以通过计算评价指标来体现激光干涉测量系统的环形器噪声水平。

环形器非线性误差系数 a 的一个评价指标是环形器方向性 D 。结合图 1 并假设光学环形器端口 2 处没有收发光场,已知功率的输入光从端口 1 输入,若得知端口 3 处的输出光功率,则 D 可表示为

端口 1 与端口 3 的光功率比值, D 可表示为

$$D = 10 \times \lg(P_1/P_3), \quad (12)$$

式中: P_1 为端口 1 的输入光功率; P_3 为端口 3 的输出光功率。由(8)式与(12)式可知,非线性误差系数 a 是杂散光振幅与信号光振幅的比值,环形器方向性 D 是输入光功率与输出光功率的比值的对数表达。在端口 2 处没有收发光场的情况下,端口 3 输出的光由输入光在环形器内部作用而产生,因此端口 3 处的输出光即为环形器杂散光,端口 3 输出的光功率即为输入光在环形器内部作用所产生的杂散光功率,因此输出光功率 P_3 与杂散光振幅 A_{st} 的关系可表示为

$$P_3 \propto A_{\text{st}}^2/2. \quad (13)$$

由于输入光从环形器端口 1 输入,通过环形器衰减后由端口 2 输出,经过透镜以及目标衰减后形成信号光,信号光经过环形器后再次衰减并从端口 3 输出,因此信号光的振幅实际上取决于输入光通过第一次环形器的衰减以及通过端口 2 的外界衰减。忽略光场进入端口 1 所产生的能量损耗,则输入光功率 P_1 与经环形器调制后的信号光振幅 A_s 的关系可表示为

$$P_1 = \left[\frac{A_s}{T_{\text{D}} T'_{\text{PBS}}(\omega) T_{\text{p}} T_o} \right]^2, \quad (14)$$

式中: $T'_{\text{PBS}}(\omega)$ 为另一偏振态经过偏振分光棱镜后的透过率; T_o 为光经过由透镜和目标端影响后的透过率。将(13)式与(14)式相除并结合(8)式与(12)式,经过简单转化后可以得到非线性误差系数与环形器方向性的关系,即

$$D \propto -20 \times \lg a. \quad (15)$$

非线性误差系数与信号光场有关,是整个激光干涉测量系统在测量过程中的效果表征;环形器方向性与信号光场无关,评价的是系统内光学环形器的杂散光抑制水平。环形器方向性 D 是非线性误差系数 a 的一种体现,在一定实验条件下可以将 D 求出用于表征 a 值的大小。环形器杂散光的抑制效果越好,环形器方向性 D 的数值越大,非线性误差系数 a 值越小,则环形器噪声越小,因此环形器方向性 D 是环形器噪声的一个评价指标。

杂散光相位 φ_{st} 和信号光相位 φ_s 之差也会影响位移测量误差,由于目标的运动过程和信号光的相位不确定,若杂散光的相位稳定,则解调信号可根据杂散光的相位进行校正处理;若杂散光的相位变化无规律以及杂散光相位与信号光相位同时改变,则解调信号未能进行相位校正,最终保留环形器的

噪声并影响测量精度。

测量的杂散光相位通常是变化的,此时相位校正法不适用,即使明确得知测量过程中环形器杂散光的相位,但解调信号的校正也是困难的。根据文献[25]可知,随着信号光相位的变化、杂散光相位的不同以及信号解调幅度的不同,解调出的位移误差呈非线性变化。文献[25]提出了一种与杂散光功率相同以及相位相差 π 的校正光场参与干涉的校正方法,虽然仿真结果表明该方法理论上可以提高解调精度,但实际测量过程中杂散光的相位难以与信号光场携带的目标运动相位分离,使得校正光场的相位准确性不能保证,这增加了测量不可控性,还可能引入新的噪声,因此难以运用到实际的测量过程中。

将(11)式对 a 或 $(\varphi_s - \varphi_{st})$ 作麦克劳林展开,可以发现若环形器系统的非线性误差系数 a 或杂散光相位和信号光相位之差 $(\varphi_s - \varphi_{st})$ 有一项为极小值并趋近于 0,则 e_{circle} 值趋近于 0。该结果表明,如果抑制杂散光的功率在极小水平,可以使非线性误差系数 a 的数值在极小水平。即使杂散光的相位变化复杂且不可测,环形器噪声对干涉测量的影响也会得到控制。

为了探究环形器噪声对干涉仪位移测量的影响,对实际测量过程进行 MATLAB 数值仿真。设置激光波长为 1550 nm,运动目标沿光轴方向位移 100 nm。假设信号光在环形器外部无衰减和噪声增加,仅携带目标运动信息。根据(12)式对不同情况下的测量过程进行仿真,仿真得到的绝对误差可以表征环形器噪声对激光干涉仪位移测量精度的影响。

非线性误差系数 a 是环形器噪声的重要决定因素之一,环形器方向性 D 作为非线性误差系数 a 的外在表征之一,可以用于评价环形器的杂散光抑制能力。(11)式中的位移残差是关于杂散光相位的周期奇函数,周期为 2π 。在半个周期内,仿真杂散光相位 φ_{st} 分别为 $0, \pi/6, \pi/4, \pi/3, \pi/2$ 和 π 的 6 种情况下,100 nm 位移的测量误差与环形器方向性 D 的关系如图 3 所示。

从图 3 可以看到,非线性误差系数 a 与杂散光初相位 φ_{st} 均为由系统位移测量带来的非线性误差;环形器方向性 D 值越大,表明环形器非线性误差系数 a 值越小,接收到的环形器杂散光能量越少,解调得到的位移误差越小;当杂散光相位 φ_{st} 取不同值时,位移测量误差不同,这与目标运动所决定的信号光相位 φ_s 有关,两者之差共同决定对测量误

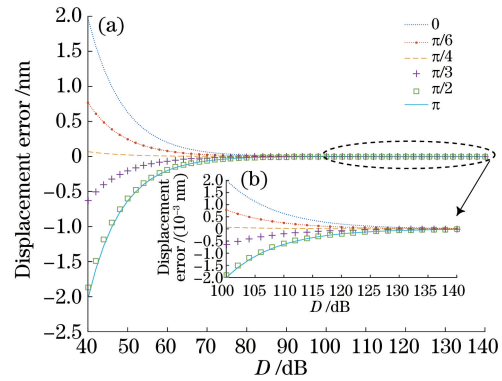


图 3 位移误差与环形器方向性的关系及其局部放大图

Fig. 3 Relationship between displacement error and direction of circulator and its local magnification

差的影响;当环形器方向性 D 值达到 100 dB 以上时,杂散光相位对位移测量误差的影响极小,这印证了(11)式麦克劳林展开后的分析结果,证明增大环形器方向性 D 可以作为抑制环形器噪声的主要手段之一。

3 分析与讨论

3.1 点衍射环形器

基于对环形器噪声的分析,以增大环形器方向性 D 抑制环形器杂散光能量为主要方向,设计并制作了一款点衍射空间光环形器,结构如图 4 所示。

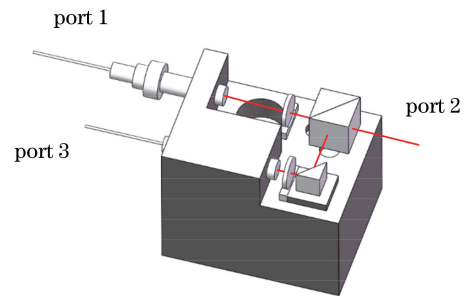


图 4 点衍射空间光环形器

Fig. 4 Point diffraction spatial light circulator

环形器系统包括收发光纤接头、起偏器、偏振分光镜、反射镜、检偏器以及起支撑和固定作用的金属模块。1/4 波片在偏振分光镜的后方,图中未给出。端口 1 和端口 3 为收发光纤端口,端口 2 为开放式端口。不同于传统的光纤环形器或空间光环形器,该环形器采用点衍射的方法,即在发射光纤出射端面构造与出射光波长接近的微型小孔,使出射光产生近乎理想的球面波前,消除由激光出射高斯光束或准直透镜所形成的平行光束带来的波前扰动对测量结果的影响,这有利于减少环形器输入光在起偏

器和偏振分光镜等偏振器件处的能量损耗。使接收光纤的端面与出射光纤严格平行,且保证出射光路与回波光路在偏振分光镜前的光程相等,从而保证环形器端口 1 与端口 3 共轭,消除可能引入的光程变化所导致的附加相位。在可能出现前向散射的器件下方挖孔,用于消耗离轴散射的光能量。环形器所有的机械材料表面均进行表面处理,用于吸收可能存在的散射杂散光。采用光纤点衍射法并结合空间光隔离与传输可以避免纯光纤环形器由外界振动、插入损耗、色散和光纤弯折等因素导致的信号光能量损耗,又可以避免传统空间光环形器用于波前改善和光束准直过程中额外光学器件的引入,提高了光束质量,避免了额外杂散光的产生。

3.2 试验对比

为了探究点衍射空间光环形器的噪声抑制表现,将两款光学环形器在激光干涉测量系统中进行测试试验,对比试验实物如图 5 所示,其中 AOFS 为声光移频器,PZT 为压电陶瓷制动器。

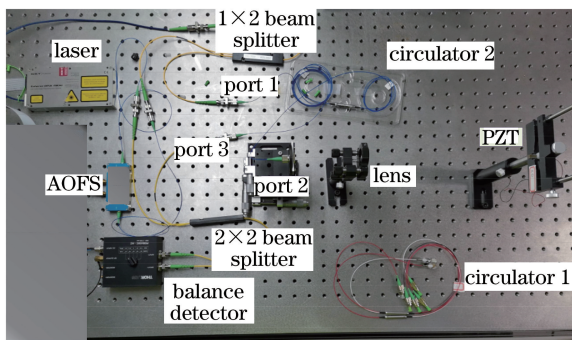


图 5 环形器位移测量对比试验实物
Fig. 5 Contrast test object of circulator displacement measurement

两款环形器分别为环形器 1 和环形器 2,其中环形器 1 为实验室自制的点衍射空间光环形器,环形器 2 为 Thorlabs CIR1550PM 典型光纤环形器。将目标置于距离环形器端口 2 后端面 30 cm 处并在中间放置双胶合透镜,使输出光束与系统环形器端口 2 输出光束组合,在显光卡的配合下调整被测目标并与系统输出的激光束垂直,使光点稳定在被测反射平面的中间并进行调焦,使被测反射面上的高斯光斑最小。信号发生装置选用单频信号发生器,通过压电陶瓷驱动器使被测目标产生振动。信号发生器发出频率为 1 kHz 和电压幅值为 2 V 的单频正弦信号,目标作频率为 1 kHz 和振幅为 100 nm 的正弦振动。窄线宽光纤激光器由光纤发出功率为 40 mW 且波长为 1550 nm 的激光,激光

经过一分二光纤分束器 1 分为输入光和参考光,输入光进入环形器端口 1,测得输入光功率为 P_1 ;参考光进入频率为 50 kHz 的声光移频器进行移频,在进入分束器 2 前探测得到参考光功率 P_r 。在 50:50 二分二光纤分束器 2 处,参考光与端口 3 输出光发生干涉,分光后进入平衡探测器中。探测器型号为 Thorlabs PDB450C,探测过程中选择 10^6 档,光电转换增益为 10^6 V/W。每次试验接收信号的时间为 10 s,信号光被接收并与参考光干涉,然后通过解调模块输出信号来解算结果。测试过程中,光纤采取压紧的方式固定,尽量抑制光纤翘起活动;压电陶瓷被光学座夹紧,不会引起光学平台的抖动;实验室环境为恒温恒湿,试验过程中避免人员走动。为避免偶然性,重复试验三次,测试结果如图 6 所示。

从图 6 可以看到,信号发生器产生的单频信号可以被获取。测量目标位移的过程中,对信号发生器的输出信号进行同步采集,可以换算得到目标的理想运动状态,从而实现对实际测量中位移误差的计算。对两个环形器其中一组的测量数据进行位移误差计算,计算结果如图 7 所示。

从图 6 和图 7 可以看到,点衍射空间光环形器在测量系统中,单频正弦振动目标的位移采集数据较为稳定,没有明显的测量错误,最大位移误差控制在 6 nm 左右;典型环形器中,单频正弦振动目标的位移采集数据出现不应有的振幅波动,测量位移误差在不同时刻表现不同,均带来非线性误差。采用点衍射空间光环形器的激光干涉测量系统的运动目标测量准确度高于同等情况下采用典型环形器。

将被测目标和透镜撤下,在端口 2 前端放置吸收体,使端口 2 无收发光场。由探测器输出电信号来求解端口 3 的输出光功率 P_3 ,计算公式为

$$P_3 = \frac{P_{\text{out}}^2}{4P_r} = \frac{U_{\text{Dmax}}^2}{4G^2P_r}, \quad (16)$$

式中: P_{out} 为光信号转换为电信号输出前的平衡探测光功率; U_{Dmax} 是交流峰值电压。(16)式分母中的 4 是平衡探测器差模放大的结果。(14)式和(16)式的计算结果如表 1 所示。

从表 1 可以看到,典型环形器系统的测试方向性低,非线性误差系数大;点衍射空间光环形器的测试方向性达到 129 dB,较典型环形器提高 66 dB,杂散光功率控制在 10^{-15} W 量级。原因在于典型环形器由长光纤对光束进行收发处理,内部没有很好的杂散光抑制措施,输出光为经过环形器内部器件调

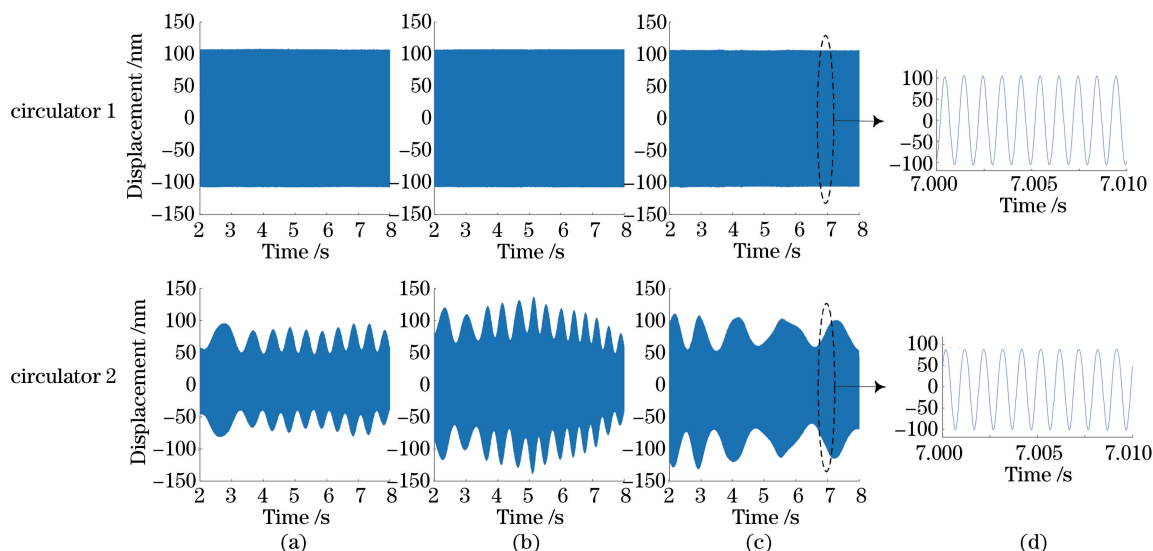


图 6 两个环形器的位移测量结果。(a)第一组测量;(b)第二组测量;(c)第三组测量;
(d)第三组测量的局部放大图

Fig. 6 Displacement measurement results of two circulators. (a) 1st set of measurement; (b) 2nd set of measurement; (c) 3rd set of measurement; (d) local magnification of 3rd set of measurement

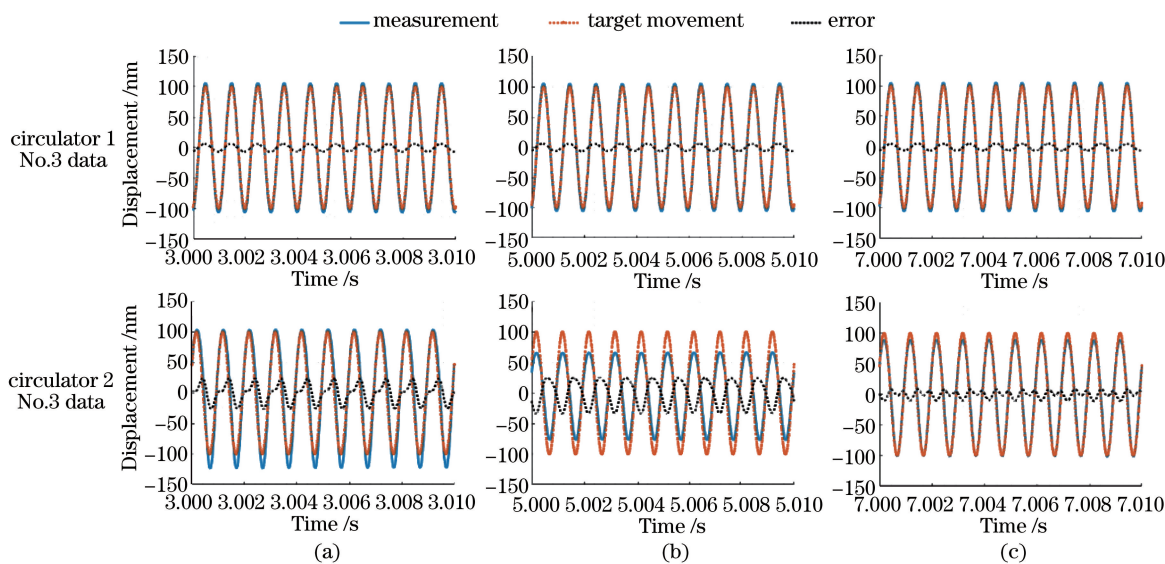


图 7 两个环形器在不同时刻的位移误差。(a) 3.000~3.010 s;(b) 5.000~5.010 s;(c) 7.000~7.010 s

Fig. 7 Displacement error of two circulators at different moments. (a) 3.000~3.010 s; (b) 5.000~5.010 s; (c) 7.000~7.010 s

表 1 两个环形器的方向性计算结果

Table 1 Directionality calculation results of two circulators

Circulator	P_1/W	P_r/W	U_{Dmax}/V	$G/(V \cdot W^{-1})$	P_3/W	D/dB
1	1.40×10^{-2}	1.00×10^{-4}	8.30×10^{-4}	10^6	1.72×10^{-15}	129
2	1.27×10^{-2}	1.00×10^{-4}	0.80	10^6	6.56×10^{-9}	63

制过后的未整形波前,因此其方向性较低,而点衍射空间光环形器经过点衍射光束整形、环形器表面处理和杂散光抑制设计等措施,因此方向性较好。两组环形器在测试过程中,除了环形器不同,信号光经过其他光学系统所产生的噪声、解调模块电路噪声、

解调算法噪声以及外界环境均相同。为了避免周围环境,如环境振动和光纤抖动对测试结果的影响,加入压电陶瓷制动器静止状态的测量结果作为对照组,测试结果如图 8 所示。

图 8(a)的解调数据方差在 10^{-11} nm 量级,表明

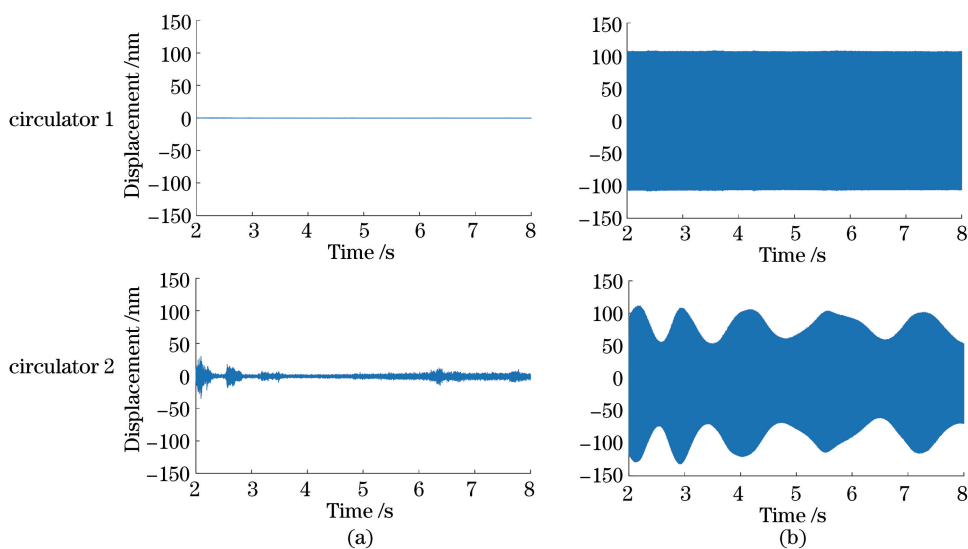


图 8 两个环形器在目标不同状态下的位移测量数据。(a)静止状态;(b)运动状态
Fig. 8 Displacement measurement data of two circulators in different target states.

(a) State of rest; (b) state of motion

了静止状态下环形器 1 的位移测量误差水平。对比图 7 环形器 1 中测量位移误差量级,可以表明环境振动、电路噪声和解调误差等环形器外界不确定因素对环形器 1 性能测试的影响较小;图 8(a)环形器 2 的试验环境与图 8(a)环形器 1 相同,但其解调数据不稳定,测量静止状态 PZT 的峰值位移误差达到 30 nm,平均绝对位移误差达到 nm 量级,这与图 7 环形器 2 和图 8(b)环形器 2 所呈现的对振动目标测量位移误差较大且变化复杂的情况吻合,结合表 1 可以表明典型光纤环形器受环形器噪声的影响较大,印证了方向性、杂散光相位与环形器噪声的联系。

经过试验对比可知,环形器方向性对激光干涉测量系统位移误差的影响与理论模型吻合,即环形器方向性越好,环形器内部杂散光能量越少,对信号光的干扰和影响越小,环形器噪声越小,测量误差越小。

4 结 论

对激光干涉系统中典型的环形器噪声进行分析,构造了环形器噪声传递模型。将环形器噪声评价指标归纳于环形器方向性与环形器杂散光相位,并分别分析了两者对激光干涉测量误差的影响,通过仿真得到环形器噪声为位移测量带来非线性误差的结论。基于误差分析设计并研制了点衍射空间光环形器,并与 Thorlabs CIR1550PM 典型环形器进行对比。结果表明,点衍射空间光环形器的方向性达到 129 dB,较典型环形器提高 66 dB,目标位移测

量误差小于典型环形器系统,证明点衍射空间光环形器能够有效提高激光干涉的测量精度。

参 考 文 献

- [1] Saito S, Yamamoto Y, Kimura T. Optical heterodyne detection of directly frequency modulated semiconductor laser signals[J]. *Electronics Letters*, 1980, 16(22): 826-827.
- [2] Shirinzadeh B. Laser-interferometry-based tracking for dynamic measurements[J]. *Industrial Robot: an International Journal*, 1998, 25(1): 35-41.
- [3] Suo R, Fan Z J, Li Y, et al. Dual-frequency laser interferometer present state and development [J]. *Laser & Infrared*, 2004, 34(4): 251-253.
所睿, 范志军, 李岩, 等. 双频激光干涉仪技术现状与发展[J]. *激光与红外*, 2004, 34(4): 251-253.
- [4] Lazar J, Čip O, Čížek M, et al. Laser interferometric measuring system for positioning in nanometrology [J]. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, 2010, 9(10): 660-669.
- [5] Brandi F, Gizzi L A. Optical diagnostics for density measurement in high-quality laser-plasma electron accelerators [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2019, 7(2): 40-50.
- [6] Zhang Z H, Jiang C L, Shen L Q, et al. Vibration measurement based on the local maximum detection algorithm for laser self-mixing interferometry [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 63462-63469.
- [7] Wu Z, Li Y, Xiangli B, et al. Full-field heterodyne long-cavity interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0912003.

- 伍洲, 李杨, 相里斌, 等. 全视场外差长腔干涉测量技术[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0912003.
- [8] Sun C M, Sun K H, Ge J Q. Measurement of surface vibrations of ultrasonic transducers by laser interference method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0904006.
孙朝明, 孙凯华, 葛继强. 超声换能器表面振动的激光干涉测量[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0904006.
- [9] Liu J Y, Lei F. Measurement of lens-center thickness based on low-coherence interference with transmitted illumination[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(12): 121201.
刘经佑, 雷枫. 基于透过式低相干光学干涉测量透镜中心厚度[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(12): 121201.
- [10] Hou W M, Wilkening G. Investigation and compensation of the nonlinearity of heterodyne interferometers[J]. Precision Engineering, 1992, 14(2): 91-98.
- [11] Demarest F C. High-resolution, high-speed, low data age uncertainty, heterodyne displacement measuring interferometer electronics [J]. Measurement Science and Technology, 1998, 9(7): 1024-1030.
- [12] Cosijns S J A G, Haitjema H, Schellekens P H J. Modeling and verifying non-linearities in heterodyne displacement interferometry [J]. Precision Engineering, 2002, 26(4): 448-455.
- [13] Zhang G X, Zhong Y, Hong X, et al. A laser Doppler interferometric system for measuring motion of vibrating combs[J]. CIRP Annals, 2005, 54(1): 491-494.
- [14] Tobar M E, Ivanov E N, Blondy P, et al. High-Q whispering gallery traveling wave resonators for oscillator frequency stabilization [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2000, 47(2): 421-426.
- [15] Hsu F H, Chen J H, Chen K H, et al. Optimized design of multiport optical circulator [J]. Optik, 2014, 125(10): 2454-2457.
- [16] Fujii Y. Compact high-isolation polarization-independent optical circulator [J]. Optics Letters, 1993, 18(3): 250-252.
- [17] Kong X X, Zhang W X, Cai Q S, et al. Multi beam hybrid heterodyne interferometry based phase enhancement technology [J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(19): 190601.
孔新新, 张文喜, 才啟胜, 等. 基于多光束混合外差干涉的相位增强技术研究[J]. 物理学报, 2020, 69(19): 190601.
- [18] Chen H F, Ding X M, Zhong Z. Effect of nonlinearity by the nonideal splitting performance of polarization beam splitter in laser heterodyne interferometry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(11): 1562-1566.
陈洪芳, 丁雪梅, 钟志. 偏振分光镜分光性能非理想对激光外差干涉非线性误差的影响[J]. 中国激光, 2006, 33(11): 1562-1566.
- [19] Bobroff N. Residual errors in laser interferometry from air turbulence and nonlinearity [J]. Applied Optics, 1987, 26(13): 2676-2682.
- [20] Teoh P L, Shirinzadeh B, Foong C W, et al. The measurement uncertainties in the laser interferometry-based sensing and tracking technique [J]. Measurement, 2002, 32(2): 135-150.
- [21] Pisani M, Zucco M, Nobili A M. A low noise laser interferometry readout for challenging acceleration measurements in space [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 1056: 105625K.
- [22] Sato S, Kokeyama K, Ward R L, et al. Demonstration of displacement-and frequency-noise-free laser interferometry using bidirectional Mach-Zehnder interferometers [J]. Physical Review Letters, 2007, 98(14): 141101.
- [23] Bayle J B, Lilley M, Petiteau A, et al. Effect of filters on the time-delay interferometry residual laser noise for LISA[J]. Physical Review D, 2019, 99(8): 084023.
- [24] Yarovoi L, Siegmund G. The effect of three-wave interference in laser Doppler vibrometry [J]. Measurement Science and Technology, 2004, 15(10): 2150-2156.
- [25] Kong X X, Xiangli B, Zhang W X, et al. Research on LDV stray light suppression technology based on four-wave hybrid interference [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11160: 111600D.