

文章编号 1004-924X(2016)增-0190-07

PBS 对零差激光干涉仪非线性误差的影响

王超群^{1,2}, 黄强先^{2*}, 伍婷婷², 武万多²

(1. 合肥工业大学 电子科学与应用物理学院, 安徽 合肥 230009;

2. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 基于琼斯矩阵原理研究了分别位于零差激光干涉仪干涉部分和探测部分的 3 个偏振分光棱镜(PBS)引起的非线性误差。首先, 介绍了零差激光干涉仪的构成和工作原理。然后对干涉仪中 PBS 的理想琼斯矩阵进行修正, 建立了与光路中 PBS 用途相对应的误差分析模型。最后, 在 Maple 软件中分别仿真了 PBS 单独和整体引起的非线性误差。结合仿真曲线和误差分析模型可知, 干涉部分的 PBS₁ 主要引起非正交误差, 而探测部分的 PBS₂ 和 PBS₃ 引起直流漂移误差和不等幅误差。仿真结果表明, 采用性能更好的 PBS₁ 可使非线性误差从 2.32 nm 降低至 0.23 nm; 调节光电探测器的增益系数, 则可消除 PBS₂ 和 PBS₃ 引起的直流漂移和不等幅误差。上述研究结果为进一步补偿由 PBS 引起的非线性误差提供了理论依据。

关键词: 零差激光干涉仪; 偏振分光棱镜; 非线性误差; 直流漂移; 不等幅; 非正交

中图分类号: TH703; TH744.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0190

Effect of PBSs on nonlinearity in a homodyne interferometer

WANG Chao-qun^{1,2}, HUANG Qiang-xian^{2*}, WU Ting-ting², WU Wan-duo²

(1. School of Electronic Science & Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Anhui 230009, China)

* Corresponding author, E-mail: huangqx@hfut.edu.cn

Abstract: The non-linear errors caused by performance deficiency of 3 polarized beam splitters (PBS) located on the interferometer part and detection part of homodyne laser interferometer were calculated respectively on the basis of Jones matrix. Firstly, the composition and working principle of the homodyne interferometer were introduced. Then the ideal Jones matrix was modified for establishing the error analysis models of the PBSs with different purpose. The simulation of the non-linear errors induced by PBS separately and integrally was performed in Maple software. In combination of the simulated curve and error analysis model, it shows that the PBS₁ at interference part mainly causes non-orthogonal error and PBS₂ and PBS₃ at detection part mainly cause DC drift error and unequal amplitude error. Therefore, the non-linear error reduces from 2.32 nm to 0.23 nm by adopting PBS with better performance. The DC drift and unequal amplitude error caused by PBS₂ and PBS₃ was eliminated by adjusting the gains of detectors. The research results provide theoretical foundation for further compensation to non-linear error caused by PBS.

收稿日期: 2016-05-28; 修订日期: 2016-06-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51475131)

Key words: homodyne interferometer; Polarized Beam Splitter(PBS); non-linear error; DC drift; unequal amplitude; non-orthogonality

1 引言

随着纳米技术与集成芯片领域的迅速发展和现代制造业精度的不断提高,对微小位移的测量分辨力提出了更高要求^[1]。在诸多能够实现微小位移测量方法中,激光干涉测量技术以其高分辨力和非接触测量而广泛应用于精密和超精密测量中^[2-4]。特别是激光干涉测量技术具有可溯源性,当溯源到米定义时,其他测量手段仍需激光干涉仪来进行标定和校准^[5]。目前,常用的零差激光干涉仪普遍采用了偏振移相技术和信号差分处理,使得测量误差主要体现为较小的干涉仪非线性误差,非常适用于纳米精度的位移测量^[6]。

激光干涉仪的非线性误差主要来源于光学元件的性能不理想和位置调整不完善,非线性误差经理论分析通常达到 10 nm^[7]。在微米级别测量中,这个误差可以忽略,但对于纳米亚纳米级别的测量,此误差无法忽略,从而严重制约了干涉仪在高精度测量领域的应用。研究非线性误差的来源和作用机理,从而减小和消除非线性误差已成为国内外研究的焦点。偏振分光棱镜(PBS)是干涉仪光路中的重要分光元件,其分光不均和漏光导致的偏振态混合是零差激光干涉仪非线性误差的主要来源。李立艳等^[8-9]仅分析了波片产生的非线性误差。杨军^[10]虽然分析了 PBS 的非线性误差,但将光路中所有 PBS 视为相同,没有从本质上研究 PBS 在非线形误差中的作用机理。胡鹏程^[11]在补偿光学元件的非线性误差时,仅考虑探测部分的 PBS 对非线性的影响,而忽略了干涉部分 PBS 引起的非线性。本文研究了零差激光干涉仪中所有 PBS 的性能缺陷,根据它们在干涉光路中位置和用途的不同,分别建立了干涉部分 PBS 的误差分析模型、探测部分 PBS 的误差分析模型和整个光路中所有 PBS 的误差分析模型。通过理论计算和 MAPLE 环境下的仿真,得到了不同用途的 PBS 对三差(直流漂移误差、不等幅误差和非正交误差)的作用机理。干涉部分的 PBS 主要带来非正交误差,而探测部分的 PBS 则引起直流漂移误差和不等幅误差,从而对进一步

补偿非线性误差提供了理论依据。

2 零差激光干涉仪构成及其工作原理

2.1 零差激光干涉仪的光路图

图 1 为零差激光干涉仪的光路图,它主要由干涉和接收两部分组成。干涉部分包含一个偏振分光棱镜 PBS₁, 2 个四分之一波片 QWP₁ 和 QWP₂, 以及参考镜 M_r 和测量镜 M_m。探测部分包含二分之一波片 HWP, 四分之一波片 QWP₃, 消偏振分光棱镜 NPBS, 两个偏振分光棱镜 PBS₂ 和 PBS₃, 4 个光电探测器 PD₁、PD₂、PD₃ 和 PD₄。零差激光干涉仪一般选取稳频激光源, 以及一个用来获得特定方向线偏光的高消光比的线偏振片 P₁。

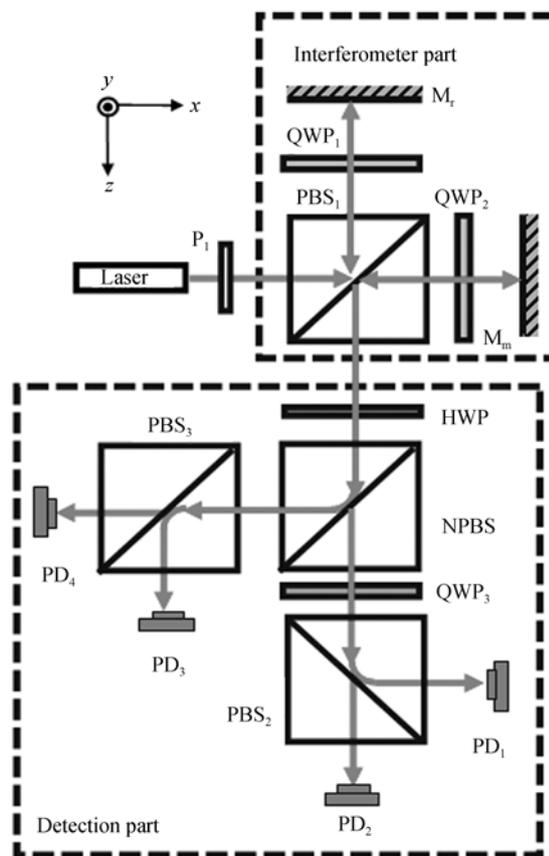


图 1 零差激光干涉仪的光路图

Fig. 1 Homodyne interferometer with a quadrature detector system

2.2 零差激光干涉仪的工作原理

零差激光干涉仪的基本工作原理如图 1 所示,建立平面直角坐标系 xyz , x 轴在纸面内, y 轴垂直纸面向外,光束的传播方向沿 z 轴。线偏片 P_1 、四分之一波片 QWP_1 、 QWP_2 和 QWP_3 均放置在 xy 面内,且透光轴或快轴与 x 轴的夹角为 45° ;二分之一波片 HWP 处于 xy 面内,快轴与 x 轴的夹角为 22.5° ;偏振分光棱镜 PBS_1 、 PBS_2 、 PBS_3 和消偏振分光棱镜 $NPBS$ 放置在 xz 面内,且分光面均与 x 轴成 45° ;参考镜 M_r 和测量镜 M_m 均与光束垂直。

从稳频 He-Ne 激光器发射的光束通过 P_1 , 获得偏振态为 45° 线偏光,在 PBS_1 的分光面上被分为两束线偏振光,其中反射光为振动方向沿 y 轴的 S 分量,透射光为振动方向沿 x 轴的 P 分量。透射光 P 通过 QWP_2 转变为圆偏振光,到达测量镜 M_m 被反射回来,再次通过 QWP_2 偏振态转变为 S,被 PBS_1 反射;同理反射光 S 通过 QWP_1 转变为圆偏振光,到达参考镜 M_r 被反射回来,再次通过 QWP_1 偏振态转变为 P,被 PBS_1 透射。从 PBS_1 出射的参考光 P 和测量光 S 通过 HWP , 偏振态各自旋转 45° 分别变成 $\pm 45^\circ$ 线偏光,入射到 $NPBS$,被均匀地分为反射光和透射光,透射光通过 QWP_3 ,在快慢轴之间产生 90° 的相移,再经过 PBS_2 的分光作用,产生两路干涉信号被 PD_1 和 PD_2 接收;反射光直接通过 PBS_3 的分光作用,产生两路干涉信号被 PD_3 和 PD_4 接收。

在理想情况下,被光电探测器接收的四路干涉信号互相之间的位相相差 90° ,分别表示为:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{I_0}{4} (1 + \sin \varphi) \\ I_2 &= \frac{I_0}{4} (1 - \sin \varphi) \\ I_3 &= \frac{I_0}{4} (1 + \cos \varphi) \\ I_4 &= \frac{I_0}{4} (1 - \cos \varphi) \end{aligned}, \quad (1)$$

式中 I_0 是入射光光强。差分信号处理可得两路正交的余弦信号,可以在示波器中以标准的李萨茹圆显示,两路正交信号满足:

$$\frac{I_y}{I_x} = \frac{I_1 - I_2}{I_3 - I_4} = \tan \varphi, \quad (2)$$

式中 φ 是与位移相关的参考光和测量光之间的相位差。

3 基于琼斯矩阵的误差分析模型

3.1 非线性误差函数

迈克尔逊型零差偏振干涉仪的测长原理是一种“增量法”测长仪器。参考镜固定不动,当测量镜移动时,移动位移 L 与参考光和测量光相干的位相差 φ 之间的关系可表示为:

$$L = \frac{\varphi}{4\pi} \cdot \lambda. \quad (3)$$

理想情况下的正交信号与相位差 φ 的关系为:

$$\frac{I_y}{I_x} = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \tan \varphi. \quad (4)$$

而在实际中,由于 PBS 不理想,引入了非线性误差,此时上式变为:

$$\frac{I_y'}{I_x'} = \frac{A + B \cos \varphi + C \sin \varphi}{D + E \cos \varphi}, \quad (5)$$

式中: A 、 D 表示直流偏移, C 、 E 表示不等幅, B 表示非正交。

根据式(3)~式(5),可以得到位移测量中由于 PBS 引入的非线性误差的表达式:

$$\begin{aligned} \Delta L &= \\ \frac{\lambda}{4\pi} \left\{ \varphi - \arctan^{-1} \left[\frac{A + B \cos \varphi + C \sin \varphi}{D + E \cos \varphi} \right] - m\pi \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $m=0, 1, 2, 3, \dots$, 因为正切函数是周期为 π 的周期函数。

3.2 PBS 的修正琼斯矩阵

对于偏振分光棱镜(PBS)而言,由于性能的不理想,其误差来源主要有两个:一是由于消光比不理想而产生漏光,即在透射光中存在 S 分量,而在反射光中存在 P 分量;二是由于介质的吸收而导致分光不均匀,即透射光强和反射光强的比例不等于 1。理想情况下,偏振分光棱镜没有漏光,即反射光中只有 S 分量,透射光中只有 P 分量;光能量也没有损耗,透射光强和反射光强比等于 1,其透射琼斯矩阵和反射琼斯矩阵可以表示为^[12]:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

在实际光学元件中,上面的矩阵需要进行修正。根据偏振分光棱镜的性能特征,其修正的琼斯矩阵可表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_1 &= \begin{bmatrix} t_{p1} & 0 \\ 0 & t_{s1} \end{bmatrix}, \mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} r_{p1} & 0 \\ 0 & r_{s1} \end{bmatrix} \\ \mathbf{T}_2 &= \begin{bmatrix} t_{p2} & 0 \\ 0 & t_{s2} \end{bmatrix}, \mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} r_{p2} & 0 \\ 0 & r_{s2} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{T}_3 &= \begin{bmatrix} t_{p3} & 0 \\ 0 & t_{s3} \end{bmatrix}, \mathbf{R}_3 = \begin{bmatrix} r_{p3} & 0 \\ 0 & r_{s3} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: t_p, t_s 分别为 P 分量和 S 分量的透射系数, r_p, r_s 分别为 P 分量和 S 分量的反射系数, 角标 1, 2, 3 表示 PBS 的标记。假设它们都是实数, t_p, r_s 接近 1, 而 r_p, t_s 远远小于 1。

处于零差激光干涉仪光路中的其他光学元件, 理想情况下的琼斯矩阵可一一表示如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_p &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{J}_m = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{J}_{\text{qwp}}(+45) &= \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{J}_{\text{qwp}}(-45) &= \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{J}_{\text{hwp}}(+22.5) &= \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{T}_n &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{R}_n = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (9)$$

上面各琼斯矩阵分别为: \mathbf{J}_p 表示线偏片, \mathbf{J}_m 表示平面反射镜, $\mathbf{J}_{\text{qwp}}(+45)$ 和 $\mathbf{J}_{\text{qwp}}(-45)$ 分别表示快轴方向为 $\pm 45^\circ$ 的四分之一波片, $\mathbf{J}_{\text{hwp}}(+22.5)$ 表示快轴方向为 22.5° , \mathbf{T}_n 和 \mathbf{R}_n 分别表示消偏振分光棱镜的透射和反射。入射光 \mathbf{E}_0 的琼斯矢量可表示为:

$$\mathbf{E}_0 = \begin{bmatrix} E_0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

这里的 E_0 是入射光的振幅。

3.3 PBS 的误差分析模型建立

由于在零差激光干涉仪的光路中共有 3 个 PBS, 一个处于干涉部分, 两个处于探测部分: 先计算各 PBS 单独引起的误差函数, 再计算所有 PBS 共同产生的误差函数, 从而建立误差分析模型。

3.3.1 干涉部分 PBS₁ 的误差分析模型

根据图 1 计算由于干涉部分中 PBS₁ 的不理想, 而其它光学元件都理想时产生的误差函数。根据 2.2 中所述, 从光源发出的光在经过了干涉部分, 从 PBS₁ 最后出射时, 其中的参考光 \mathbf{E}_r 和测量光 \mathbf{E}_m 根据琼斯矩阵理论计算如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_r &= \mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{J}_{\text{qwp}}(-45) \cdot \mathbf{J}_m \cdot \mathbf{J}_{\text{qwp}}(+45) \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{J}_p \cdot \mathbf{E}_0, \\ \mathbf{E}_m &= \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{J}_{\text{qwp}}(-45) \cdot \mathbf{J}_m \cdot \mathbf{J}_{\text{qwp}}(+45) \cdot \mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{J}_p \cdot \mathbf{E}_0, \\ \mathbf{E} &= \mathbf{E}_r + \mathbf{E}_m, \end{aligned} \quad (11)$$

式中: \mathbf{E} 是表示将参考光和测量光合并。然后合成光 \mathbf{E} 进入探测部分, 被 PBS₂ 和 PBS₃ 分成四路干涉信号, 由光电探测器 PD₁, PD₂, PD₃ 和 PD₄ 接收, 四路信号为:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_1 &= \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{J}_{\text{qwp}}(+45) \cdot \mathbf{T}_n \cdot \mathbf{J}_{\text{hwp}}(+22.5) \cdot \mathbf{E}, \\ \mathbf{E}_2 &= \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{J}_{\text{qwp}}(+45) \cdot \mathbf{T}_n \cdot \mathbf{J}_{\text{hwp}}(+22.5) \cdot \mathbf{E}, \\ \mathbf{E}_3 &= \mathbf{R}_3 \cdot \mathbf{R}_n \cdot \mathbf{J}_{\text{hwp}}(+22.5) \cdot \mathbf{E}, \\ \mathbf{E}_4 &= \mathbf{T}_3 \cdot \mathbf{R}_n \cdot \mathbf{J}_{\text{hwp}}(+22.5) \cdot \mathbf{E} \\ I_1 &= \mathbf{E}_1 \cdot \bar{\mathbf{E}}_1 \\ I_2 &= \mathbf{E}_2 \cdot \bar{\mathbf{E}}_2 \\ I_3 &= \mathbf{E}_3 \cdot \bar{\mathbf{E}}_3 \\ I_4 &= \mathbf{E}_4 \cdot \bar{\mathbf{E}}_4 \end{aligned} \quad (12)$$

将式(7)~式(10)带入上面的式(11)和式(12)中, 注意 PBS₁ 带入修正琼斯矩阵 $\mathbf{T}_1, \mathbf{R}_1$; 而 PBS₂, PBS₃ 则带入理想矩阵 \mathbf{T}, \mathbf{R} , 最终可得四路信号, 结果中 $t_{s1}^2 \cdot r_{p1}^2$ 是小量可视为 0, 再进行差分信号处理, 得到 I_y, I_x 两路正交信号如下:

$$\begin{cases} I_y = I_1 - I_2 \\ I_x = I_3 - I_4 \end{cases}, \quad (13)$$

$$\frac{I_y}{I_x} = \frac{t_{p1}^2 \cdot r_{s1}^2 \cdot \sin \varphi}{2 \cdot t_{p1} \cdot r_{p1} \cdot t_{s1} \cdot r_{s1} + t_{p1}^2 \cdot r_{s1}^2 \cdot \cos \varphi}. \quad (14)$$

可见, 要降低 PBS₁ 单独引起的非线性误差, 关键在于减低不理想的 t_{s1} 和 r_{p1} 分量, 从而减小式(14)中的 $2t_{p1}r_{p1}t_{s1}r_{s1}$ 项, 这可以通过选用性能更加良好的光学元件来实现。

3.3.2 探测部分 PBS₂ 和 PBS₃ 的误差分析模型

根据图 1, 假设 PBS₂、PBS₃ 性能不理想, 而其它光学元件性能理想, 这里之所以将 PBS₂、PBS₃ 一起考虑, 是因为它们在探测系统中处于对称的位置, 若不一起考虑则差分信号处理将失去意义。现在将式(7)~式(10)带入式(11)~式(13), 注意 PBS₁ 带入 \mathbf{T}, \mathbf{R} , 而 PBS₂, PBS₃ 带入 $\mathbf{T}_2, \mathbf{R}_2, \mathbf{T}_3, \mathbf{R}_3$, 计算出四路信号, 结果中 $t_s^2 \cdot r_p^2$ 为小量可视为 0, 然后进行差分处理可得:

$$\frac{I_y}{I_x} = \frac{(r_{s2}^2 + r_{p2}^2 - t_{p2}^2 - t_{s2}^2) + (r_{s2}^2 - r_{p2}^2 + t_{p2}^2 - t_{s2}^2) \cdot \sin \varphi}{(r_{s3}^2 + r_{p3}^2 - t_{p3}^2 - t_{s3}^2) + (r_{s3}^2 - r_{p3}^2 + t_{p3}^2 - t_{s3}^2) \cdot \cos \varphi}. \quad (15)$$

可见, PBS_2 和 PBS_3 共同引起的非线性误差为直流漂移和不等幅, 不存在非正交误差。若透射系数和反射系数相等, 即 $t_p = r_s, t_s = r_p$, 则 PBS_2 和 PBS_3 共同引起的非线性误差可以消除。但是从光学元件的制造工艺来说, $t_p = r_s, t_s = r_p$ 是不可能的, 可以考虑通过调整光电探测器的增益系数来消除直流漂移误差和不等幅误差。

$$\begin{aligned}
 I_y &= (r_{s2}^2 + r_{p2}^2 - t_{p2}^2 - t_{s2}^2) \cdot t_{p1}^2 r_{s1}^2 + 2(r_{s2}^2 + r_{p2}^2 - t_{p2}^2 - t_{s2}^2) \cdot t_{p1} r_{p1} t_{s1} r_{s1} \cos \varphi + \\
 &\quad (r_{s2}^2 - r_{p2}^2 + t_{p2}^2 - t_{s2}^2) \cdot t_{p1}^2 r_{s1}^2 \cdot \sin \varphi \\
 I_x &= (r_{s3}^2 + r_{p3}^2 - t_{p3}^2 - t_{s3}^2) \cdot t_{p1}^2 r_{s1}^2 + 2(r_{s3}^2 - r_{p3}^2 + t_{p3}^2 - t_{s3}^2) \cdot t_{p1} r_{p1} t_{s1} r_{s1} + \\
 &\quad 2(r_{s3}^2 + r_{p3}^2 - t_{p3}^2 - t_{s3}^2) \cdot t_{p1} r_{p1} t_{s1} r_{s1} \cdot \cos(\varphi) + (r_{s3}^2 - r_{p3}^2 + t_{p3}^2 - t_{s3}^2) \cdot t_{p1}^2 r_{s1}^2 \cdot \cos \varphi \\
 \begin{cases} A = (r_{s2}^2 + r_{p2}^2 - t_{p2}^2 - t_{s2}^2) \cdot t_{p1}^2 r_{s1}^2 \\ B = 2(r_{s2}^2 + r_{p2}^2 - t_{p2}^2 - t_{s2}^2) \cdot t_{p1} r_{p1} t_{s1} r_{s1} \\ C = (r_{s2}^2 - r_{p2}^2 + t_{p2}^2 - t_{s2}^2) \cdot t_{p1}^2 r_{s1}^2 \\ D = (r_{s3}^2 + r_{p3}^2 - t_{p3}^2 - t_{s3}^2) \cdot t_{p1}^2 r_{s1}^2 + 2(r_{s3}^2 - r_{p3}^2 + t_{p3}^2 - t_{s3}^2) \cdot t_{p1} r_{p1} t_{s1} r_{s1} \\ E = 2(r_{s3}^2 + r_{p3}^2 - t_{p3}^2 - t_{s3}^2) \cdot t_{p1} r_{p1} t_{s1} r_{s1} + (r_{s3}^2 - r_{p3}^2 + t_{p3}^2 - t_{s3}^2) \cdot t_{p1}^2 r_{s1}^2 \end{cases}
 \end{aligned} \quad (16)$$

式中: I_y, I_x 分别表示整个光路中所有 PBS 的误差分析模型的分母和分子。由式(16)可见, 所有 PBS 同时产生的非线性误差包含直流漂移、不等幅和非正交。式(17)中若 PBS_1 理想, 则 $B=0, D$ 和 E 的第二项和第一项分别为 0, 则式(16)可改写为式(15), 由此可得结论: PBS_1 引起的非线性主要为非正交, 而 PBS_2 和 PBS_3 引起的非线性则为直流漂移和不等幅。就整个干涉系统而言, 要补偿非线性误差, 对 3 个 PBS 采用的方法是不同的: 对 PBS_1 而言, 主要在于改善元件本身的性能; 而 PBS_2 和 PBS_3 则需要通过光路调节, 尽量使反射光和透射光的光强比为 1:1。

4 非线性误差仿真

本文在 MAPLE 环境中对非线性误差进行了仿真。仿真中 PBS 的性能参数参考大恒、Thorlabs 等目前国内外知名供应商的产品。

4.1 干涉部分 PBS_1 的非线性误差仿真

产品说明中提供的 PBS 的透射率(T_p, T_s)和反射率(R_s, R_p), 与琼斯矩阵中透射系数(t_p, t_s)和反射系数(r_s, r_p)关系为: $T_p = t_p^2, T_s = t_s^2, R_s = r_s^2, R_p = r_p^2$ 。 PBS_1 透射系数和反射系数分别选取性能优劣不同的两组参数: $t_p^2 = 0.95, r_p^2 =$

3.3.3 整个光路中 PBS 的误差分析模型

在实际的四路信号中, 非线性误差是由 3 个 PBS 共同引起的, 此时认为 PBS_1, PBS_2, PBS_3 性能不理想, 其它光学元件性能均理想。现将式(8)~式(10)带入式(11)~式(13), 计算出四路干涉信号, 并约去其中的 $t_s^2 \cdot r_p^2$ 项, 差分处理四路信号可得 I_y, I_x 分别为:

0.05, $r_s^2 = 0.99, t_s^2 = 0.01$ 和 $t_p^2 = 0.95, r_p^2 = 0.05, r_s^2 = 0.998, t_s^2 = 0.0001$ 。采用式(6)仿真时, 注意此时式(14)代替式(5)带入式(6), 仿真结果如图 2 所示。

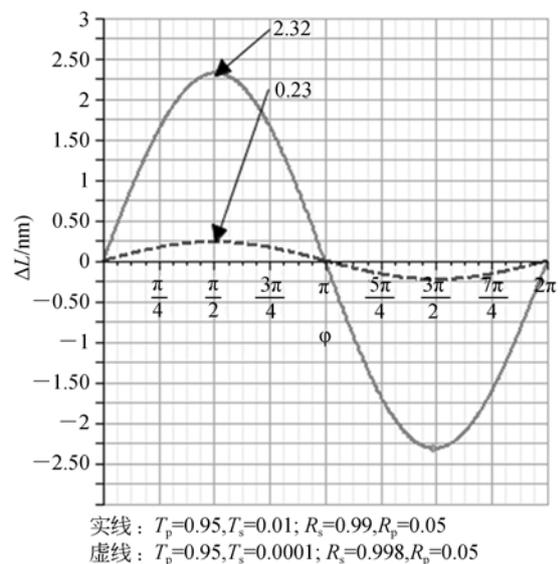


图 2 PBS_1 的非线性误差

Fig. 2 Nonlinear errors of PBS_1

根据图(2)可见, 可以通过选取性能更加良好的 PBS, 显著减小处于干涉部分的 PBS_1 的非线性误差。当 S 分量的反射参数 r_s 从 0.99 提高到

0.998,透射参数 t_s 从 0.01 降低至 0.000 1,非线性误差从 2.32 nm(图 2 中实线)降低至 0.23 nm(图 2 中虚线),减低了一个数量级。仿真结果符合 3.3.1 中的理论分析。

4.2 探测部分 PBS₂ 和 PBS₃ 的非线性误差仿真

对 PBS₂ 和 PBS₃ 共同产生的非线性误差仿真如图 3 所示。仿真函数采用式(6),并且将 3.3.2 中所得误差函数式(15)代入式(6)中。因为 PBS₂ 和 PBS₃ 的对称性,仿真过程中取性能相同的元件,分别取性能优劣不同的两组参数: $t_p^2=0.95, r_p^2=0.05, r_s^2=0.99, t_s^2=0.01$ 和 $t_p^2=0.95, r_p^2=0.05, r_s^2=0.998, t_s^2=0.000 1$ 。从仿真结果可见,当 S 分量的反射参数 r_s 从 0.99 提高到 0.998,透射参数 t_s 从 0.01 降低至 0.000 1,非线性误差从 3.00 nm(图 3 中实线)升高至 3.65 nm(图 3 中虚线),也就是当 PBS 性能提高时,非线性误差没有降低,反而略有升高。但是若 $t_p = r_s, t_s = r_p$,则 PBS₂ 和 PBS₃ 共同引起的非线性误差则可消除,符合 3.3.2 中的理论分析。

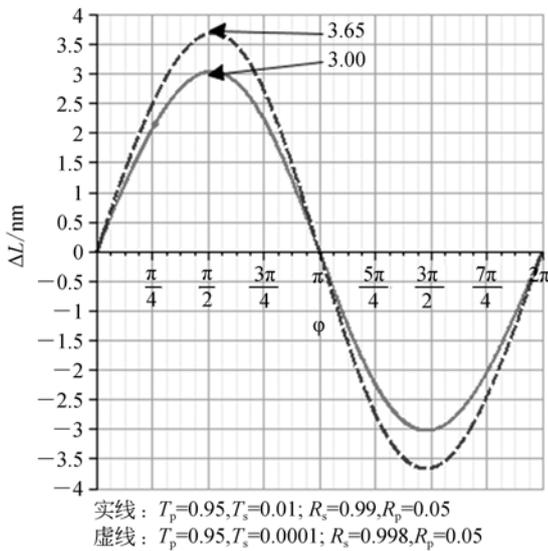


图 3 PBS₂ 和 PBS₃ 的非线性误差
Fig. 3 Nonlinear errors of PBS₂ and PBS₃

4.3 整个光路中 PBS 的非线性误差仿真

所有 PBS 共同产生的非线性误差仿真如图 4 所示。仿真函数采用式(6),将 3.3.3 中所得误差函数式(16)代入式(6)中。在仿真过程中,由于 PBS 的用途不同:处于干涉部分的 PBS₁ 和探测部分的 PBS₂ 和 PBS₃,PBS₁ 主要尽可能分离 P 分量

和 S 分量,而 PBS₂ 和 PBS₃ 主要是保证四路信号比重一致。取两组参数:第一组 PBS₁ 性能优于 PBS₂ 和 PBS₃, $t_{p1}^2=0.95, r_{p1}^2=0.05, r_{s1}^2=0.998, t_{s1}^2=0.000 1$ 和 $t_{p2}^2=t_{p3}^2=0.95, r_{p2}^2=r_{p3}^2=0.05, r_{s2}^2=r_{s3}^2=0.99, t_{s2}^2=t_{s3}^2=0.01$;第二组 PBS₁ 性能劣于 PBS₂ 和 PBS₃, $t_{p1}^2=0.95, r_{p1}^2=0.05, r_{s1}^2=0.99, t_{s1}^2=0.01$ 和 $t_{p2}^2=t_{p3}^2=0.95, r_{p2}^2=r_{p3}^2=0.05, r_{s2}^2=r_{s3}^2=0.998, t_{s2}^2=t_{s3}^2=0.000 1$ 。从仿真结果可见,当 PBS₁ 性能优于 PBS₂ 和 PBS₃ 时非线性误差为 3.19 nm(图 4 中实线),而当 PBS₁ 性能劣于 PBS₂ 和 PBS₃ 时非线性误差为 5.47 nm(图 4 中虚线)。结果再次验证了提高 PBS₁ 性能可降低非线性误差,而提高 PBS₂ 和 PBS₃ 性能并不会降低非线性误差,符合前面理论分析的结果。

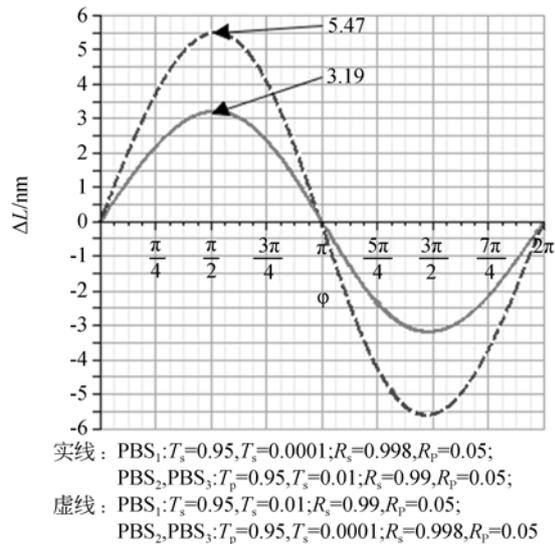


图 4 3 个 PBS 的非线性误差
Fig. 4 Nonlinear errors of all PBSs

5 结 论

本文基于琼斯矩阵理论,针对零差激光干涉仪中 PBS 性能不理想引起的直流漂移、不等幅和非正交等三差,研究了处于不同位置的 PBS 对三差的作用机理。通过理论计算建立了干涉部分 PBS₁ 单独产生的误差分析模型、探测部分 PBS₂ 和 PBS₃ 共同产生的误差分析模型和整个光路中所有 PBS 引起的误差分析模型,并在 Maple 中仿

真了 3 种状况下光学元件性能对非线性误差的影响。最后,结合误差分析模型和仿真结果得出:干涉部分的 PBS_1 主要引起非正交误差,选取性能更好的元件,可将非线性误差从 2.32 nm 降低至

0.23 nm;而探测部分的 PBS_2 和 PBS_3 则引起了直流漂移和不等幅误差,通过调节光电探测器的增益系数可以消除这二项误差,从而为进一步补偿 PBS 的非线性误差提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 段小艳,任冬梅.激光干涉法微位移测量技术综述[J].计测技术,2012,32(6): 1-13.
DUAN X Y, REN D M. Review of high-resolution measuring method of displacement using laser interferometer [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2012, 32(6): 1-13. (in Chinese)
- [2] 韩东松,何昕,魏仲慧,等.应用高精度旋转法的干涉仪检测误差校正[J].光学精密工程,2015,23(5):1272-1278.
HAN D S, HE X, WEI ZH H, *et al.*. Error correction of interferometer detection with high-accuracy rotation method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5):1272-1278. (in Chinese)
- [3] 周延周,刘运红,刘羽飞,等.干涉法测量双层树脂基材料内部的压缩位移场分布[J].光学精密工程,2014,22(11): 2923-2929.
ZHOU Y ZH, LIU Y H, LIU Y F, *et al.*. Measurement of compression displacement fields in dual layer epoxy composites by interferometry[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 2923-2929. (in Chinese)
- [4] 冯金扬,吴书清,李春剑,等.基于双干涉仪的自由落体绝对重力测量[J].光学精密工程,2015,23(10): 2740-2746.
FENG J Y, WU SH Q, LI CH J, *et al.*. Free-fall absolute gravity measurement based on double interferometers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10): 2740-2746. (in Chinese)
- [5] 刘娇月,杨聚庆,董登峰,等.激光跟踪仪的光电瞄准与定位系统[J].光学精密工程,2015,23(8): 1558-1564.
LIU J Y, YANG J Q, DONG D F, *et al.*. The application of computer in automatic measure of the non-round degree of the parts [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8): 1558-1564. (in Chinese)
- [6] TAE B E, TAE Y CH, KEON H L, *et al.*. A simple method for the compensation of the nonlinearity in the heterodyne interferometer [J]. *Measurement Science and Technology*, 2002, 13: 222-225.
- [7] 戴高良,殷纯永,谢广平.纳米精度外差干涉仪非线性漂移的研究[J].光学学报,1998,18(12): 1697-1702.
DAI G L, YIN CH Y, XIE G P. Study on drift of nonlinearity in nanometer precision heterodyne interferometers [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(12): 1697-1702. (in Chinese)
- [8] 李立艳,苑勇贵,吴冰,等.单频偏振激光干涉仪中波片对非线性误差的影响[J].光学学报,2011,31(1): 0112009-1-6.
LI L Y, YUAN Y G, WU B, *et al.*. Effect of wave plate on nonlinear error in single-frequency polarized laser interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0112009-1-6. (in Chinese)
- [9] 杨军,刘志海,苑立波.波片对偏振激光干涉仪非线性误差的影响[J].光子学报,2008,37(2): 364-369.
YANG J, LIU ZH H, YUAN L B. Effects of wave plate on nonlinear errors in polarization laser interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(2): 364-369. (in Chinese)
- [10] 杨军,吴冰,刘志海,等.无源零差偏振激光干涉仪的误差研究[J/OL]. <http://www.paper.edu.cn>. [2006-07-07].
YANG J, WU B, LIU ZH H. *et al.*. Errors of passive homodyne polarized laser interferometer [J/OL]. <http://www.paper.edu.cn>. [2006-07-07]. (in Chinese)
- [11] HU P CH, ZHU J H, ZHAI X Y, *et al.*. DC-offset-free homodyne interferometer and its nonlinearity compensation [J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 8399-8408.
- [12] 廖廷彪.偏振光学[M].北京:科学出版社,2003.
LIAO Y B. *Polarization Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)

作者简介:



王超群(1980—),女,陕西礼泉人,博士研究生,讲师,2005年于合肥工业大学获得硕士学位,主要从事激光干涉测量系统中非线性误差方面的研究。E-mail: wangchaoqun@hfut.edu.cn



黄强先(1968—),男,山东即墨人,教授,博士生导师,1990年、1993年、1998年于合肥工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事微纳米三维测量技术、纳米扫描探针技术研究及应用、仪器精度理论研究及应用等领域的研究。E-mail: huangqx@hfut.edu.cn