

文章编号: 1005-5630(2023)03-0023-07

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2023.003.004

基于保偏镜组的外差干涉测量几何误差分析

李 斌¹, 董晓浩^{2,3}, 吕丽军¹

- (1. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200444;
2. 中国科学院 上海应用物理研究所, 上海 201800;
3. 中国科学院 上海高等研究院, 上海 201204)

摘要: 角锥棱镜由于本身缺陷会导致失偏效应。在平面镜外差干涉仪中, 使用一种保偏反射镜组替代角锥棱镜, 以减小外差干涉仪的非线性误差。根据这个平面镜外差干涉仪的基本光路图, 基于偏振分光棱镜和角锥棱镜的基本光学特性, 分析了平面镜外差干涉仪中 3 个偏振分光棱镜偏摆角、仰俯角和滚动角, 保偏反射镜组中 2 个偏振分光棱镜之间的间距和角度, 以及角锥棱镜的偏摆角和仰俯角等误差对干涉仪的影响。推导出外差干涉仪中各个光学元件的最大安装误差, 并规定好其加工精度, 确保外差干涉仪性能。

关键词: 偏振分光棱镜; 角锥棱镜; 非线性误差; 激光干涉; 误差分析
中图分类号: TH 744.3 **文献标志码:** A

Geometric error analysis of heterodyne interferometer based on polarization-maintaining retroreflector

LI Bin¹, DONG Xiaohao^{2,3}, LYU Lijun¹

- (1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China;
2. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;
3. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

Abstract: In order to reduce the nonlinear error of the heterodyne interferometer, a polarization-maintaining retroreflector is used in a plane mirror heterodyne interferometer instead of a corner prism due to its defects. According to the basic optical path diagram of the plane mirror heterodyne interferometer, based on the basic optical characteristics of the polarization beam splitter and the corner cube, the effects of the yaw angle, the pitch angle and the rolling angle of the three polarization beam splitters in the plane mirror heterodyne interferometer, and the spacing and angle between the two polarization beam splitters in the polarization-maintaining retroreflector, and the yaw angle and pitch angle of the corner prism on the interferometer were analyzed. The maximum

收稿日期: 2022-12-26

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U1832172); 上海市科技重大专项(2017SHZDZX02); 中科院“BR 计划”人才项目(2018); 国家自然科学基金(61975111)

第一作者: 李 斌(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为精密光机设计。E-mail: lb012597@163.com

通信作者: 董晓浩(1977—), 男, 研究员, 研究方向为 X 射线光学技术以及器件研发。
E-mail: dongxiaohao@zjlab.org.cn

installation error of each optical component in the heterodyne interferometer is deduced, and its machining precision is specified to ensure the performance of the heterodyne interferometer.

Keywords: polarization beam splitting prism; corner prism; nonlinear error; laser interference; error analysis

引 言

由于激光具有优秀的方向性、单色性以及高亮度的特性,尤其是因为它能够直接与光的波长进行联系,实现高精度测量,其在测量领域得到了广泛应用^[1]。外差激光干涉仪通过将检测得到的参考信号与测量信号的相位进行比较,可达到纳米级的分辨率,且其具有检测方便、测量范围广、测量精度高和结构简单等优势,在精密领域得到大量应用^[2]。然而,在实际应用中,由于光学系统中各个元件存在一些不可避免的缺陷,光路中两种不同频率的偏振光并不能完全分离,导致被测信号会产生一个附加的周期相位误差,使测得的相位位移与被测长度之间呈现非线性关系,最终表现为激光外差干涉仪存在周期性非线性误差^[3]。

国内外许多学者对引起非线性误差的因素及影响程度进行了具体分析^[4-10],其中非线性误差的来源可能有:激光源不理想,其发射出的激光非正交化或椭圆偏振化引起频率混叠;光学元件不完美造成偏振混叠;光学元件拥有多个光学反射面,使得光束在光学元件内发生多次反射,导致主反射光与这些反射光会合干涉,造成非线性误差^[11]。本文通过补偿角锥棱镜的失偏效应来减小外差干涉仪的非线性误差。常见解决角锥棱镜失偏效应的方案有:1)使线偏振光的偏振方向以一定角度入射至角锥棱镜,在特定的偏振角度下,出射光依旧是线偏振光^[12]。该方法的优点是原理简单,使用普通的角锥棱镜按一定角度放置即可实现输出线偏振光,其缺点是输出光的偏振方向与输入光不同,角度偏离对偏振态影响大,调试难度大。2)在角锥棱镜全反面上镀全反射保偏膜^[13-14]。该方法的优点是可以较好地保持输入光的线偏特性,且输出光偏振方向与输入光相同,缺点是需要镀膜工艺保证,实现起来有一定的技术难度,反射损耗较大,损伤阈值低,

不能用于高功率激光设备。3)使用 $\lambda/4$ 波片对入射光或出射光进行偏振调制,使线偏振光经角锥棱镜反射后仍保持线偏振特性,且偏振方向与原偏振方向相同^[15]。附加波片法相对于镀膜法在工艺上更简单,但是只能实现特定偏振态的保偏,而且在应用过程中需要频繁调整波片,增加了操作的复杂度。

本文使用的方法是通过在角锥棱镜之前添加两个偏振分光棱镜,重新构建一个保偏反射镜组,在实现出射光与入射光平行反向且空间反向的同时,保证有效出射光的偏振状态与入射光的偏振状态相同^[16]。使用保偏反射镜组替代角锥棱镜用于外差干涉仪中,并根据新镜组中各个光学元件之间的间距关系,分析出偏振分光棱镜以及角锥棱镜的极限偏差角。

1 保偏镜组原理及外差干涉仪基本光路图

保偏镜组具体结构如图1所示^[16],示例中2个偏振分光棱镜(polarization beam splitter, PBS)采用相同棱镜,其透射率和反射率一致。偏振分光棱镜对P偏正光(在入射平面内)和S偏正光(垂直于入射平面)的反射率分别为 R_P 和 R_S ,透射率分别为 T_P 和 T_S 。P偏正光与S偏正光在经过角锥棱镜(corner prism, CP)后反射,

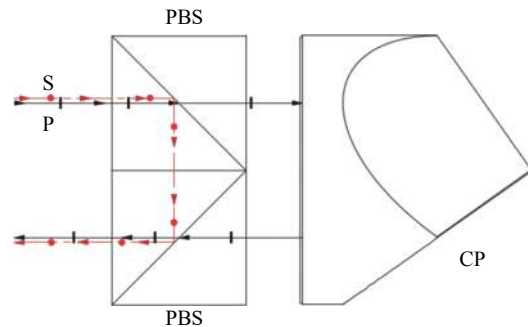


图 1 保偏反射镜组

Fig. 1 Polarization-maintaining retroreflector

其偏振方向特性可能会发生变化。各转换效率分别表示为 $C_{P,P}$ 、 $C_{S,P}$ 、 $C_{P,S}$ 和 $C_{S,S}$, 其中第 1 个下标字母表示出射光偏振方向特性, 第 2 个下标字母表示入射光偏振方向特性。

P 偏正光经过保偏反射镜组后会被分成 3 种光强分量^[17], 分别为理想光路分量 $T_P \cdot C_{P,P} \cdot T_P$, 以及非理想分量 $T_P \cdot C_{S,P} \cdot T_S$ 和 $R_P \cdot R_P$, 因此该保偏反射镜组的出射光 P 偏正光的消光比为

$$E_P = \frac{T_P \cdot C_{P,P} \cdot T_P + R_P \cdot R_P}{T_P \cdot C_{S,P} \cdot T_S} \quad (1)$$

S 偏正光经过保偏反射镜组同样被分成 3 种光强分量, 分别为理想光路分量 $R_S \cdot R_S$, 以及非理想分量 $T_S \cdot C_{P,S} \cdot T_P$ 和 $T_S \cdot C_{S,S} \cdot T_S$, 因此该保偏反射镜组的出射光 S 偏正光的消光比为

$$E_S = \frac{T_S \cdot C_{S,S} \cdot T_S + R_S \cdot R_S}{T_S \cdot C_{P,S} \cdot T_P} \quad (2)$$

当选用透射光消光比优于 1 000 : 1, 反射光消光比优于 100 : 1 的偏振分光棱镜应用于该保偏反射镜组时, 出射光的 S 偏正光和 P 偏正光的消光比分别为 1 667 : 1 和 1 210 : 1, 可实现优于现有技术的保偏性能。现有技术一般通过镀膜保偏, 消光比为 400 : 1^[16]。

将保偏反射镜组应用于一种典型双频平面镜干涉仪中, 具体结构如图 2 所示。

外差干涉仪的基本原理如图 3 所示。激光束在经过偏振分光镜 PBS1 后发生正交偏振光分

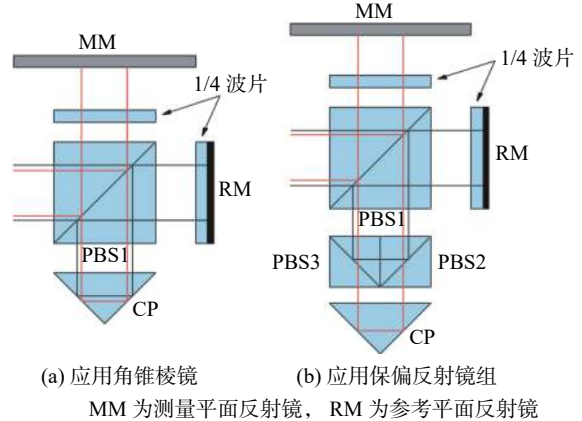


图 2 平面镜干涉仪结构图

Fig. 2 Structural diagram of a planar mirror interferometer

离, 频率为 F_1 的线偏振光透射进入干涉仪的参考路径, 经过参考平面反射镜 (reference mirror, RM) 后, 反射回 PBS1, 由于两次经过 1/4 波片, 其偏振方向改变 90° 。 F_1 线偏振光依次经过 PBS1、PBS2、PBS3、PBS1 反射后再次射向参考平面反射镜, 反射回 PBS1, 期间由于两次经过 1/4 波片, 其偏振方向再次旋转 90° , 透射通过 PBS1 入信号接收器。频率为 F_2 的线偏振光经 PBS1 反射进入干涉仪的测量路径, 在经过测量平面反射镜 (measuring mirror, MM) 后发生多普勒频移, 1/4 波片使其偏振方向改变 90° , 依次经过 PBS1、PBS2、CP、PBS3、PBS1, 再次回到测量平面反射镜, 再次发生多普勒频移, 经过 1/4 波片后, 偏振方向再次改变 90° , 经 PBS1

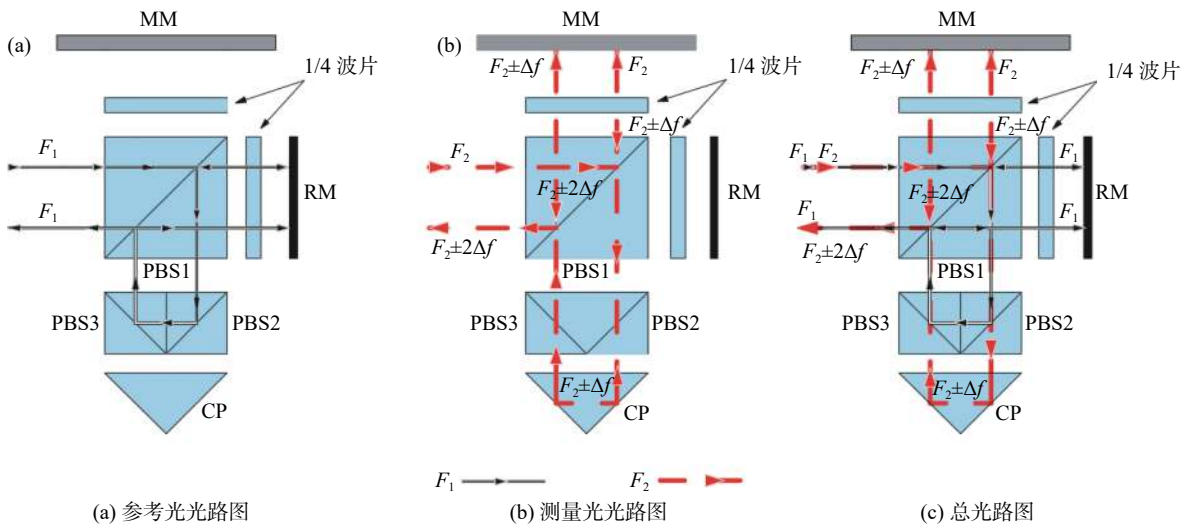


图 3 外差干涉仪光路图

Fig. 3 Optical path diagram of heterodyne interferometer

进入信号接收器。

但由于加工和安装误差的存在，外差干涉仪的性能会受到一定的影响。本文根据各个光学元件的基本特性，对其进行几何误差推导和分析，得出外差干涉仪的加工和安装精度。

2 外差干涉仪几何误差推导及分析

外差干涉仪中的各个光学元件的间距 L 如图 4 所示。

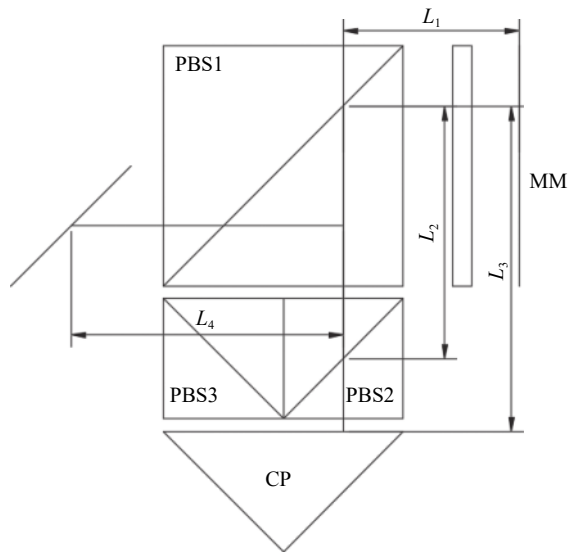


图 4 光学元件间距

Fig. 4 Spacing of optical elements

2.1 PBS1 几何误差分析

如图 5 所示，假设偏振分光棱镜 PBS1 安装时存在绕 Z 轴旋转的 θ° 的偏摆误差，此时透射光会直接穿过偏振分光镜 PBS1，而反射光会发生全反射，即： $\alpha_1 = \alpha_2$ 。

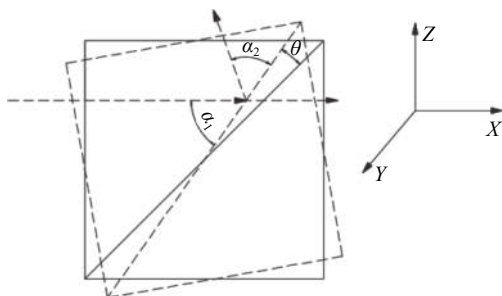


图 5 偏振分光镜 PBS1 偏摆示意图

Fig. 5 Schematic diagram of deflection of polarization beam splitter PBS1

对于参考光，其允许的最大误差为

$$R = 17.9605 \cdot \sin(45 - \theta) - 6.35 \quad (3)$$

在参考光路产生的误差分别为

$$R_1 = \frac{\sqrt{2} \cdot (L_2 + \Delta R) \cdot \sin 2\theta}{2 \cdot \sin(135 - 2\theta)} - \Delta R \quad (4)$$

$$R_2 = \frac{(12.7 + 2 \cdot R_1) \cdot \sqrt{2} \sin 2\theta}{2 \cdot \sin(45 - 2\theta)} \quad (5)$$

$$R_3 = \frac{Y_1 \cdot \sin 2\theta \cdot \sin(45 - \theta)}{\sin(135 - \theta)} \quad (6)$$

式中： $\Delta R = 8.9803 \cdot \sin \theta / \sin(135 - \theta)$ ； $Y_1 = (L_2 - R_1 - R_2 - \tan(45 + \theta)) \cdot (12.7 + R_1 + R_2 - \Delta R)$ 。

根据式(3)至式(6)，可以推出间距 L_2 与偏振分光棱镜 PBS1 极限偏差角 θ 的对应关系。

对于测量光，其允许的最大误差为

$$M = 17.9605 \cdot \sin(45 + \theta) - 6.35 \quad (7)$$

在测量光路产生的误差分别为

$$M_1 = \frac{8.9803 \cdot \sin \theta}{\sin(45 - \theta)} \quad (8)$$

$$M_2 = 60 \cdot \tan 2\theta + 2L_3 \cdot \tan 2\theta \quad (9)$$

$$M_3 = [26.35 + 17.9605 \cdot \sin(45 - \theta)] \cdot \tan 2\theta \quad (10)$$

根据式(7)至式(10)，可以推出间距 L_3 与偏振分光棱镜 PBS1 极限偏差角 θ 的对应关系，具体关系如图 6 所示。

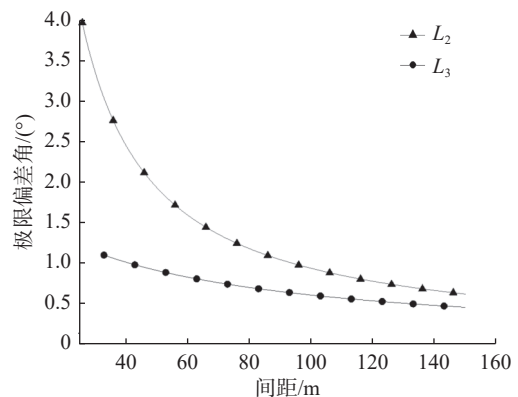


图 6 间距对极限偏差角 θ 的影响

Fig. 6 The influence of spacing on the limit deviation angle θ

2.2 PBS2 与 PBS3 几何误差分析

如图 7 所示，假设将偏振分光棱镜 PBS2

和 PBS3 看作一个整体, 在安装时存在绕 Z 轴旋转的 θ° 的偏摆误差。

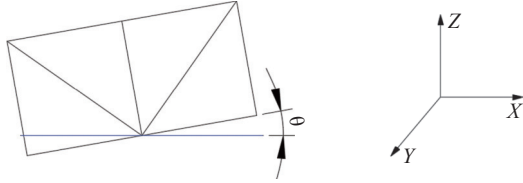


图 7 偏振分光镜 PBS2 和 PBS3 偏摆示意图

Fig. 7 Schematic diagram of deflection of polarization beam splitters PBS2 and PBS3

参考光在偏振分光镜 PBS2 和 PBS3 中的水平位移为

$$X = \frac{8.9803 \cdot \cos 2\theta \cdot \sin 135}{\sin(45 - \theta) \cos(45 - \theta)} \quad (11)$$

将任意偏摆角 θ 带入公式(11)中, 得到的 X 值均为 12.7 mm, 因此该阶段并不会产生误差。

参考光在偏振分光镜 PBS2 中光路位移的水平分量为

$$X_1 = \frac{8.9803 \cdot \sin 45}{\sin(135 - \theta)} \quad (12)$$

参考光在偏振分光镜 PBS3 中光路位移的水平分量为

$$X_2 = \frac{\sqrt{2} \cdot X_1 \cdot \sin \theta}{\sin(45 - \theta)} \quad (13)$$

当 $X_1 + X_2 > 17.9605$ 时, 参考光在经过偏振分光镜 PBS2 时发生反射, 反射光并不能射向偏振分光镜 PBS3 的分束膜, 而是直接射出, 干涉仪将丢失参考光。此时, 外差干涉仪将失效, 其极限偏摆角 $\theta = 24.2961^\circ$ 。

偏振分光棱镜 PBS2 与 PBS3 之间夹角如图 8 所示。由于 PBS2 与 PBS3 之间的夹角会导致参考光的出射光不再与入射光平行, 因此信号接收器能否接收到光信号与偏振分光镜 PBS1 分别到参考平面反射镜之间的距离 L_1 , 到偏振分光镜 PBS2 之间的距离 L_2 , 到接收反射镜之间的距离 L_4 这 3 个参数相关。

此时参考光允许的最大误差 $D = 6.35$ 。

PBS2 与 PBS3 之间的夹角会产生一个旋转偏差

$$D_1 = \frac{8.9803 \cdot \sin \theta}{\sin(45 - \theta)} \quad (14)$$

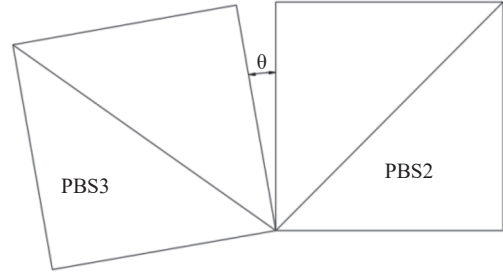


图 8 PBS2 与 PBS3 的夹角示意图

Fig. 8 Schematic diagram of angle between PBS2 and PBS3

参考光从 PBS3 射向 PBS1 会产生一个阶段误差

$$D_2 = \frac{(L_2 - 12.7 - X_1) \cdot \sin 2\theta}{\sqrt{2} \cdot \sin(135 - \theta)} \quad (15)$$

参考光通过偏振分光镜 PBS1 反射到参考平面反射镜 RM 会产生一个阶段误差

$$D_3 = (L_1 + 12.7 + D_1 + D_2) \cdot \tan 2\theta \quad (16)$$

参考光两次经过 1/4 波片后, 其偏振角度变化 90° , 由反射光变成透射光, 由参考平面反射镜射向反射镜, 这一阶段也会产生一个误差

$$D_4 = (L_1 + L_3 + 6.35) \cdot \tan 2\theta \quad (17)$$

当 $D = D_1 + D_2 + D_3 + D_4$ 时, 任意固定 L_1, L_2, L_4 中的两个参数, 就能够得到极限偏差角 θ 分别与 L_1, L_2, L_4 之间的关系, 具体如图 9 所示。

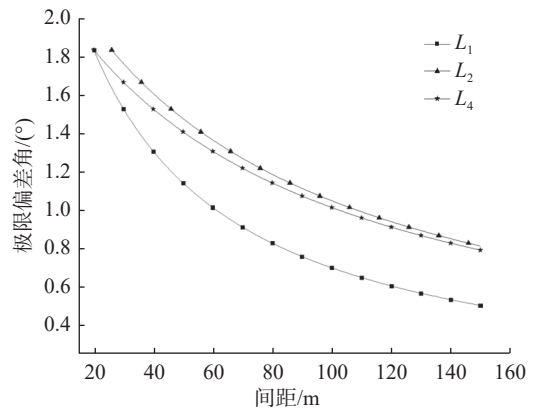


图 9 间距对极限偏差角 θ 的影响

Fig. 9 The influence of spacing on the limit deviation angle θ

PBS2 与 PBS3 之间的间距与误差成正比, 随着这个间距的增加, 出射光误差成线性增加, 当这个间距达到 6.35 mm 时, 该镜组失效。为

保证镜组性能，PBS2 与 PBS3 的间距应控制在 0.5 mm 之内。

2.3 角锥棱镜几何误差分析^[18]

角锥棱镜的仰俯角和偏摆角会对外差干涉仪的测量产生影响^[19]，需要进行推导分析。

如图 10 所示，若角锥棱镜绕 Y_R 逆时针旋转 θ° ，此时存在一个仰俯误差。现假设 F 点为入射光在角锥棱镜底部的入射点，而 H 点为出射点。在仅考虑角锥棱镜在空气中的折射率为 1.5，而不考虑其他误差因素的情况下，当角锥棱镜仰俯角误差控制在 $10 \mu\text{rad}$ 以内时，由此产生的测量误差小于 $0.1 \mu\text{m}$ 。

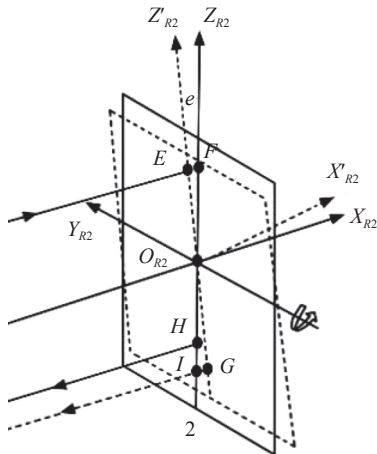


图 10 角锥棱镜仰俯示意图
Fig. 10 Pitch angle of corner prism

如图 11 所示，若角锥棱镜绕 Z_R 逆时针旋转 θ° ，此时存在一个偏摆误差。现假设 F 点为入射光在角锥棱镜底部的入射点，而 H 点为出射点。在角锥棱镜偏摆角误差控制在 $10 \mu\text{rad}$ 以内的情况下，由此产生的测量最大误差为 0.0159 nm ，所产生的测量误差远小于外差干涉仪本身精度，可以忽略不计。

2.4 偏振分光棱镜仰俯角和滚动角误差分析

如图 12 所示，当偏振分光棱镜分别绕 X 轴和 Y 轴偏转，会产生滚动角和仰俯角偏差。

其中，当偏振分光棱镜绕 X 轴旋转 θ° 时，相当于偏摆角误差的对应关系为

$$\gamma = \arctan(\cos \theta) - 45 \quad (18)$$

当偏振分光棱镜绕 Y 轴旋转 θ° 时，相当于

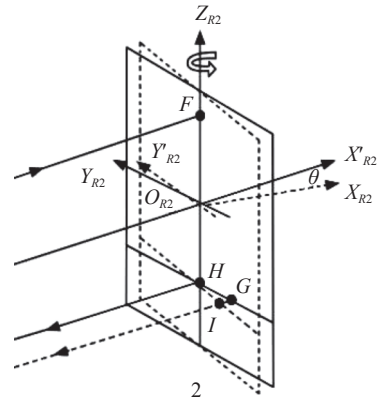


图 11 角锥棱镜偏摆示意图
Fig. 11 Yaw angle of corner prism

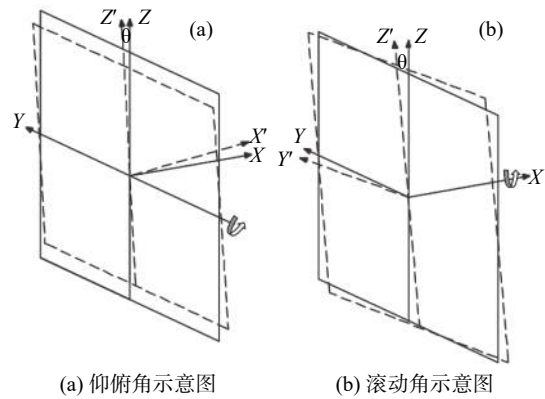


图 12 偏振分光棱镜
Fig. 12 Polarization beam splitter

偏摆角误差的对应关系为

$$\gamma = 45 - \arctan(\cos \theta) \quad (19)$$

当滚动角或者仰俯角为 3° 时，仅相当于 0.04° 的偏摆角误差，对测量结果的影响极小。

尽管仰俯误差和滚动误差对于入射光的影响很小，甚至几乎没有，但是保偏反射镜组的偏振分光棱镜中的仰俯误差和滚动误差将会改变透射光和反射光的偏振方向，造成双频激光交叉混叠^[20]。因此，在外差干涉仪的应用中，偏振分光棱镜的仰俯误差和滚动误差比偏摆误差更为重要。

保偏反射镜组中的偏振分光棱镜的仰俯角和滚动角分别为 θ_1 和 θ_2 ，此时可以得到附加的相位误差为

$$\begin{aligned} \gamma_{\max} &\approx \arctan\left(2 \cdot \frac{\sin \theta_1}{\cos \theta_1}\right) + \arctan\left(2 \cdot \frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2}\right) \\ &= 2\theta_1 + 2\theta_2 \end{aligned} \quad (20)$$

外差干涉仪中的偏振分光棱镜的仰俯角和滚动角应控制在 0.14° 之内^[17]。

3 结 论

基于偏振分光棱镜和角锥棱镜的光学特性, 分析偏振分光棱镜和角锥棱镜对于外差干涉仪的影响, 并推导出其最大安装误差。根据上述分析, 可以得出偏振分光棱镜 PBS1 对测量光的影响远大于对参考光的影响, 应主要考虑其对测量光的影响。为保证外差干涉仪的性能, 应将偏振分光棱镜 PBS1 的偏摆角控制在 0.1° 以内, 两个偏振分光棱镜(PBS2、PBS3)之间的间距与其误差成线性关系, 应将其控制在 0.5 mm 以内。两个偏振分光棱镜夹角对于干涉仪的性能影响最大, 要优先考虑, 应将这个夹角控制在 0.1° 以内。而将两个偏振分光棱镜看作一个整体时, 偏摆角误差相对宽松一些, 控制在 1° 以内即可, 为保证其性能, 可以考虑使用光胶法将两个偏振分光棱镜粘合成一个整体。为了避免双频激光交叉混叠, 偏振分光棱镜的仰俯角和滚动角应控制在 0.14° 以内, 角锥棱镜的仰俯角和偏摆角误差应控制在 0.2° 以内。

通过上述分析结果, 可以确定各个光学元件的最大安装误差, 为后续工作外差干涉仪的光机结构设计提供理论依据。

参考文献:

- [1] 叶声华. 激光在精密计量中的应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1980.
- [2] 姜一民, 王科峰. 激光干涉仪技术及发展 [J]. *工具技术*, 2003, 37(11): 68 – 74.
- [3] WU C M, SU C S. Nonlinearity in measurements of length by optical interferometry[J]. *Measurement Science and Technology*, 1996, 7(1): 62 – 68.
- [4] WU C M, DESLATTES R D. Analytical modeling of the periodic nonlinearity in heterodyne interferometry [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(28): 6696 – 6700.
- [5] ROSENBLUTH A E, BOBROFF N. Optical sources of non-linearity in heterodyne interferometers[J]. *Precision Engineering*, 1990, 12(1): 7 – 11.
- [6] BOBROFF N. Recent advances in displacement measuring interferometry[J]. *Measurement Science and Technology*, 1993, 4(9): 907 – 926.
- [7] BADAMI V G, PATTERSON S R. A frequency domain method for the measurement of nonlinearity in heterodyne interferometry[J]. *Precision Engineering*, 2000, 24(1): 41 – 49.
- [8] HOU W M, WILKENING G. Investigation and compensation of the nonlinearity of heterodyne interferometers[J]. *Precision Engineering*, 1992, 14(2): 91 – 98.
- [9] EOM T B, KIM J A, KANG C S, et al. A simple phase-encoding electronics for reducing the nonlinearity error of a heterodyne interferometer[J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19(7): 075302.
- [10] 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.
- [11] 张鹏, 崔建军. 外差干涉仪非线性误差补偿抑制与测量研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(11): 38 – 50.
- [12] 王勇. 基于角锥棱镜谐振腔的理论研究 [D]. 西安: 西北大学, 2012.
- [13] BIEG B. Polarization properties of a metal corner-cube retroreflector[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2015, 96-97: 729 – 732.
- [14] KALIBJIAN R. Polarization preserving corner cubes[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(1): 239 – 246.
- [15] 彭堂超, 郭良贤, 张鑫, 等. 保偏型角锥棱镜: 中国, 105182457A[P]. 2015-12-23.
- [16] 刘孟廷, 董晓浩, 王劼. 一种偏振保持反射镜组: 中国, 113740946A[P]. 2021-12-03.
- [17] LIU M T, DONG X H, WANG J. Polarization-maintaining retroreflector for reducing the periodic nonlinearity caused by the corner cube in heterodyne interferometers[J]. *Optical Engineering*, 2022, 61(6): 064110.
- [18] 王亮亮, 商正君, 杨海马, 等. 基于角锥棱镜的激光干涉位移测量误差分析 [J]. *计算机测量与控制*, 2022, 30(3): 60 – 66.
- [19] 祝宏彬, 陈俊霆, 郭冬梅, 等. 零差激光干涉仪的大范围位移测量与精度分析 [J]. *光电子技术*, 2016, 36(1): 5 – 11.
- [20] YAN L P, CHEN B Y, ZHANG G, et al. Analysis and verification of the nonlinear error resulting from the misalignment of a polarizing beam splitter in a heterodyne interferometer[J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(8): 085006.

(编辑: 李晓莉)