

# 正弦相位调制双法布里-珀罗干涉术 的实验研究

朱若谷

(中国计量学院机械量计量系, 杭州 310034)

**摘 要** 讨论了光纤传光、正弦相位调制的双法布里-珀罗(Fabry-Perot)干涉术实验结果. 通过光强信号的傅里叶分析, 证实基频幅值和相位均含谐振腔长度或程函变化信息, 从而提出实现基频相位或幅值测量的时间间隔测量法或幅值整流基频幅值测量法. 在已研制的实验装置上, 测试两种方法的灵敏度阈, 结果表明: 作者提出的平行双通道结构和光纤传光的测试方法能补偿谐振腔温漂影响, 简化信号处理过程, 更适合实时测量.

**关键词** 正弦相位调制, 双法布里-珀罗干涉术, 基频幅值.

## 1 引 言

自 Petuchowski 等人提出灵敏的光纤法布里-珀罗干涉仪以后<sup>[1]</sup>, Mallison 又提出法布里-珀罗干涉仪的单模光纤波分多路复用系统(WDM)波长选择滤波器<sup>[2]</sup>. 研究重点从功能型光纤法布里-珀罗又转到光纤传光型、空气介质法布里-珀罗上. 通过类似的研究, 发现后者光孔径大, 不受光纤介质参数变化的影响, 从而更稳定、更便于控制和信号处理. 本文在文献[3]、[4]的基础上又提出光纤传光型双法布里-珀罗正弦相位调制干涉术的理论和实验研究. 由于采用并行双通道结构和光纤传光使装置完成了基频时间间隔测量和基频幅值测量, 经改进后, 可以成为微型在线测量系统.

## 2 工作原理

由作者提出的正弦相位调制法布里-珀罗干涉术分析给出, 输出光强零级近似时, 基频  $I_1^{(0)}$  为

$$I_1^{(0)} \cong (4/F)I_0J_1(x) \sin(\omega_m t + \phi_m) \sin(\Lambda\omega_0 t + \theta), \quad (1)$$

对应小调制幅值,  $x < 1$ , 应用  $J_1(x) \cong (x/2)$ , (1)式可表示为

$$I_1^{(0)} \cong k_1 I_0 \sin(\omega_m t + \phi_m) \sin(\Lambda\omega_0 t + \theta). \quad (2)$$

式中:  $k_1 = 8\pi n I_0 a_1 / (F\lambda)$ ;  $I_0$  为入射光强;  $F = 4R / (1 - R)^2$  为精巧系数, 其中  $R = (R_1 R_2)^{1/2}$  为

国家技术局资助的课题.

收稿日期: 1993年3月31日; 收到修改稿日期: 1993年9月3日

两端面镜的平均光强反射率;  $J_1(\cdot)$  为一阶贝塞尔函数, 宗量  $x = (4\pi/\lambda)na_1V_0$ ,  $V_0$  为正弦调制电压幅值,  $a_1$  为压电陶瓷的一次压电系数(忽略非线性影响),  $n$  为腔内介质折射率,  $\lambda$  为光波长;  $\omega_m$  和  $\phi_m$  分别为正弦调制电压的角频率和初相位;  $\theta$  为光束初相位, 并引入时刻  $t$  由谐振腔共振频率变化  $\Delta\omega_0$  引起的相位变化  $\Delta\omega_0 t$ .

因为腔长  $d$  变化  $\Delta d$  引起的共振频率  $\omega_0$  变化为

$$\Delta\omega_0 = -\omega_0 \Delta d/d = -(2\pi/T)(\Delta d/d), \quad (3)$$

则共振频率变化引起的相位变化

$$\Delta\theta = \Delta\omega_0 t = -(4\pi/\lambda)\Delta d. \quad (4)$$

由(3)式、(4)式推出

$$d = \frac{t}{T} \frac{\lambda}{2} \quad \text{或} \quad \Delta d = \frac{\Delta t}{T} \frac{\lambda}{2}. \quad (5)$$

式中:  $\Delta t$  为时间间隔;  $T$  为扫描电压引起腔长变化  $\lambda/2$  所需时间, 在本装置中为正弦扫描电压周期.

(2)式和(5)式分别表明光强的幅值和相位均含谐振腔长度或程函变化信息. 它是本文提出的时间间隔测量法(或相位测量法)和基频幅值测量法的理论基础.

### 3 实验结果

实验装置如图 1 所示, 它是插入传光光纤的正弦相位调制双法布里-珀罗干涉系统. 其中: 1、2 分别表示相同的两个并行通道, SAC 为交流扫描源, BDC 为直流偏置源, C 为隔直电容, BS 为分光器, OF 为光纤,  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  和  $L_4$  分别为耦合透镜, FP 为法布里-珀罗干涉微位移传感头, PM 为光电倍增管, PA 为前置放大器, AABF 为可调有源带通滤波器, A 为有源检波器, k 为双掷开关, V 为交直流两用电压表, DV 为数字电压表, w 为电位器, TDM 为时间间隔测量器, DTO 为双踪示波器, PC 为个人计算机. 用它实现时间间隔测量和基频幅值测量.

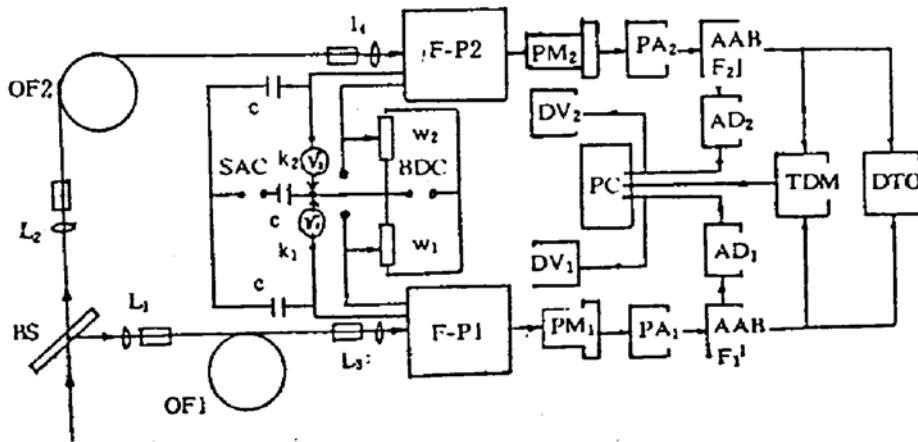


Fig. 1 Schematics of the experimental set-up

3.1 对应初相位  $\theta_1$  和  $\theta_2$  的透射峰调制光强信号  $I(\theta_1)$  和  $I(\theta_2)$  分别如图 2(a) 和图 2(c) 所示. 取样点  $N = 32$ , 快速傅里叶变换给出的谱成分如图 2(b) 和图 2(d) 所示, 其中图 2(b) 对应图 2(a), 图 2(d) 对应图 2(c)

3.2 通过控制压电陶瓷直流偏置电压产生法布里-珀罗干涉腔长的连续变化,由 x-y 记录仪记录两种初相位时光信号  $V_A(\theta)$ . 它表示幅度整流值与相位  $\theta$  的关系,见图 3(a)和图 3(b). 图 3(c)和图 3(d)分别表示图 3(a)和图 3(b)的离散傅里叶变换 DFT 谱( $N = 64$ ),图已表明主要谱成分为包含  $\sin \theta$  因子的基频分量.

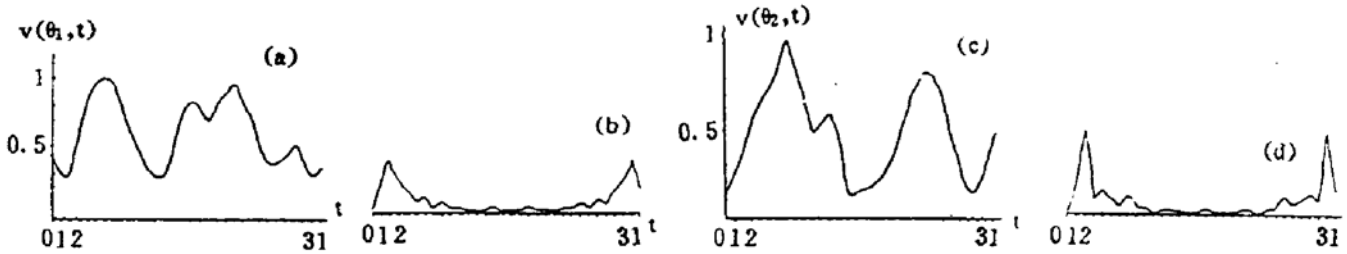


Fig. 2 Intensity curves (before band filter) and the DFT spectrums; (a)、(c) are respectively the signals for different original phases  $\theta_1$  and  $\theta_2$  and (b)、(d) are the DFT spectrums respectively for (a) and (c)

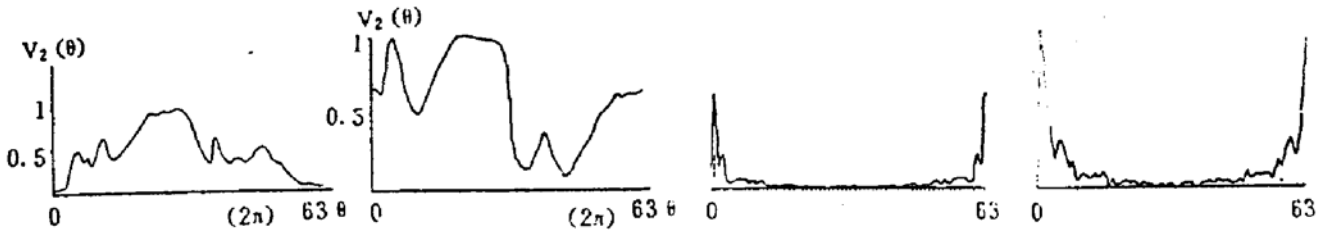


Fig. 3 Signal curves after detectors (before band filter) vs the original phase  $\theta$ ,  $V_A(\theta)$  and the DFT spectrums; (a)、(b) the signals after detectors for two F-P interferometers,  $V_1(\theta)$  and  $V_2(\theta)$  and (c)、(d) the DFT spectrums respective to (a) and (b)

3.3 测量基频分量时间间隔法和幅值测量法的灵敏度阈响应特性.

### 3.3.1 时间间隔测量法

根据(5)式知道测出双通道中两组信号的过零时刻差  $\Delta t$ , 能给出位移量  $\Delta d$ . 实验中由时间间隔测量器 TDM 测出分别经过各自的带通滤波器的测量和参考(或补偿)两组基频信号的  $\Delta t$ . 表 1 给出部分实验数据, 实验条件为光波长  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ , 压电陶瓷半波电压  $V_{\lambda/2} = 140 \text{ V}$ .

Table 1 Part of data with TDM and their approximations

$V_b$ (V)	8.2, 9.4, 9.8, 10.2, 10.5, 11.4, 11.8, 12.2, 13.2, 14, 14.4, 15.2, 15.8, 17.0, 17.6, .....
$\Delta t$ ( $\mu\text{s}$ )	157.2, 159.2, 160.2, 163, 165.2, 170.9, 171.7, 174.4, 180.7, 186.8, 187.2, 190.4, 195.5, 199.4, 204, .....
$A_1$	154.3, 160.3, 162.3, 164.4, 165.9, 170.5, 172.6, 174.7, 180.0, 184.3, 186.5, 190.9, 194.2, 200.9, 204.3, .....

最小二乘法给出的时间间隔拟合值  $A_1$  与压电陶瓷直流偏置电压  $V_b$  的拟合公式

$$A_1 = 116.533 + 4.274 V_b + 0.0406 V_b^2 \quad (6)$$

式中:  $A_1$  单位为  $\mu\text{s}$ ,  $V_b$  单位为  $\text{V}$ .

实测灵敏度阈  $0.26 \text{ nm}/\mu\text{s}$  或  $4.11 \times 10^{-4} \lambda/\mu\text{s}$ . 由于装置目前稳定性限制的时间间隔  $\Delta t$  分辨率为  $1 \mu\text{s}$  (而 TDM 的分辨率达  $1 \text{ ns}$ ), 所以对应的位移变化为  $4.11 \times 10^{-4} \lambda (\lambda = 0.6328 \mu\text{m})$ . (6) 式给出的平均灵敏度为  $0.426 \text{ nm}/\mu\text{s}$ , 或  $6.7310 \times 10^{-4} \lambda/\mu\text{s}$ , 均方差  $\sigma_s = 0.016 \text{ nm}/\mu\text{s}$ .

(5) 式给出近似线性范围内灵敏度为  $5 \times 10^{-4} \lambda/\mu\text{s}$  (已按实验条件取  $T = 1 \text{ ms}$ ,  $\Delta t = 1 \mu\text{s}$ ), 从而证实了工作原理中所作的零级近似处于装置最大灵敏度阈和已超出线性区的拟合平均灵敏之间, 因此是合理的. 另外由于在有限范围内作出拟合和受装置稳定性及测量精度限制, 存在拟合 (6) 式  $A_1$  接近于零值但不等于零这个值得注意的现象.

### 3.3.2 基频幅值测量法

主要步骤同前, 但这时用数字电压表 (可分辨  $0.001 \text{ V}$ ) 测量整流后基频幅值. 表 2 给出部分实验数据, 实验条件同前.

Table 2 Part of data from measuring the amplitude of fundermental wave and their approximations

$V_s \text{ (V)}$		0, 0.28, 0.8, 1.0, 1.6, 2.0, 2.4, 2.8, 3.6, 4.4, 4.7, 5.2, 5.8, 6.4, ……
$\Delta t$ ( $\mu\text{s}$ )	measuring value	5.32, 5.2, 5.0, 4.87, 4.72, 4.44, 4.06, 3.76, 3.12, 2.56, 2.4, 2.36, 2.0, 1.88, ……
	$B_1$	5.53, 5.33, 4.97, 4.84, 4.44, 4.19, 3.94, 3.70, 3.23, 2.79, 2.64, 2.38, 2.09, 1.81, ……

同样由最小二乘法给出基频幅值拟合值  $B_1$  与压电陶瓷直流偏置电压  $V_s$  的拟合式

$$B_1 = 5.53 - 0.71 V_s + 0.02 V_s^2 \quad (7)$$

式中:  $B_1$  和  $V_s$  的单位都是  $V$ .

实测灵敏度阈为  $2.38 \text{ nm}/V$ , 而装置目前由稳定性限制的基频幅值分辨率为  $0.1 \text{ V}$ . 因此, 对应的实测位移灵敏度阈为  $0.238 \text{ nm}/(0.1 \text{ V})$  或  $3.7 \times 10^{-4} \lambda/(0.1 \text{ V})$ . (7) 式给出的平均灵敏度为  $3.87 \text{ nm}/V$  或表示为  $6.2 \times 10^{-4} \lambda/(0.1 \text{ V})$ , 均方差  $\sigma_s = 0.055 \text{ nm}/(0.1 \text{ V})$

## 4 结 论

按现有条件在自己研制的正弦相位调制传光型光纤双法布里-珀罗干涉装置上进行基频时间间隔测量法和幅值测量法的研究. 对应幅值测量法, 装置实现数据自动采集, 微机处理, 实测灵敏度阈为  $3.7 \times 10^{-4} \lambda/(0.1 \text{ V})$ , 而对应时间间隔测量法的实测灵敏度阈为  $4.11 \times 10^{-4} \lambda/\mu\text{s}$ .

应该着重指出: (1) 式表明当  $x < 1$  时, 存在近似线性工作范围, 理论分析和实验证实该范围为  $0 \sim \pm (\lambda/20)$ . 尽管作为线性测量, 工作范围太小, 但是所提出的测试方法对纳米级微位移测量或高精度定位还是可以直接应用的新测试技术. 同时, 也可以通过对比或标定高稳定性微位移补偿器 (包括装置中采用的压电陶瓷) 的位移-电压 (或其它参数) 特性, 然后实现用计算机控制的双法布里-珀罗系统差动或跟踪 (随动) 补偿测量. 从而使提出的测量方法不受线性范围的限制.

装置适用于检定其它工作原理的高精度微位移测量仪器, 几何量计量中定位, 精细加工表面轮廓、及粗糙度测量. 同时, 本文提出的方法也适用于光谱分析、光纤通讯和其它涉及

法布里-珀罗干涉光强信号处理的领域.

### 参 考 文 献

- [1] Osami Sasaki *et al.*, Sinusoidal phase modulating interferometer using the Integrating-Bucket method. *Applied Opt.*, 1987, 26(6): 1089~1093
- [2] S. R. Mullison, Wavelength-selective filter for single-mode fibre WDM system using 法布里-珀罗 interferometers. *Appl. Opt.*, 1987, 26(3): 430~436
- [3] 朱若谷, 测量微小位移的新装置-双平面被动法布里-珀罗干涉仪. *激光杂志*, 1985, 6(2): 91~95
- [4] 朱若谷, 相位调制法布里-珀罗干涉术. 第四届全国高校光学学术与教学会议论文集, 中国计量出版社, 1992, 283~289

## Experimental Research on Sinusoidal Phase Modulating Double F-P Interferometry

Zhu Ruogu

(China Institute of Metrology, Hangzhou 310034)

(Received 31 March 1993; revised 3 September 1993)

**Abstract** Experiment on multi-mode fibre used for light transmitting, sinusoidal phase modulating F-P interferometry has been performed. It has been proved by using Fourier analysis of intensity signal that either fundamental frequency amplitude or phase of intensity imply some information about the change of cavity length (or optical path difference). Therefore a method of time duration measurement for measuring phase or fundamental frequency amplitude has been suggested.

Analyses of the sensitivity thresholds measured with the present set-up show that the method and the set-up could be free of temperature drift and simplify the signal processing, hence be more suitable for the on-line measurement.

**Key words** Sinusoidal phase modulating, double Fabry-Perot interferometry, fundamental frequency amplitude.

\*\*\*\*\*

### 《光学学报》入选“中国自然科学核心期刊”

——名次再次上升 8 位, 名列第 30 名——

中国自然科学核心期刊研究课题组不久前公布了最新的“1992~1993 年中国自然科学核心期刊”300 种。这是根据国家标准“GB/T3745~92”规定的学科分类标准, 优选 30 种中国出版的各学科代表性期刊, 对它们在 92、93 年所发表的论文, 使用“引文法”进行客观统计后得到的结果。在仅占目前期刊总数 4% 比例的 300 种核心期刊中, 综合性期刊及数理科学等学科期刊占 28%, 医药卫生期刊占 28%, 地学天文期刊占 20%, 生物农林类占 24%。全部核心期刊名单及详尽评述将在国际核心期刊研究会的综合性学术期刊《科学技术学报》磁盘周刊上发表。与本刊学科专业相关的核心期刊名单, 按被引用频次从高到低的顺序列于下表, 该表中空缺名次为其它学科核心期刊, 被引用频次相同者名次相同。《光学学报》名列核心期刊第 30 名, 比上次(1990~1991 年)又上升 8 位。

(下接 533 页)