

波长扫描法布里-珀罗干涉仪的优化设计

王 勇¹⁾ 廖延彪¹⁾ 田 芊²⁾

1), 清华大学电子工程系, 北京 100084

2), 清华大学精密仪器系, 北京 100084

摘 要 分析了可用于绝对距离测量的波长扫描法布里-珀罗干涉仪腔内多光束干涉对输出信号的影响, 及由此产生的相位测量误差。研究表明, 通过选择合适的腔端面反射率和参考腔长度可以减小相位测量误差。优化选择的腔面反射率为 0.10~0.15, 参考腔长为 0.95 mm, 在 1 mm 范围内系统可达到 0.05 μm 的测距精度。

关键词 波长扫描, 法布里-珀罗干涉仪, 距离, 优化。

1 引 言

绝对距离的测量是干涉位移/距离测量的难点和重要的发展方向。波长扫描法用于绝对距离测量可望达到更高的分辨率^[1-4], 因而除测距外, 在光学层析及三维表面探测方面也具有广泛的应用前景。我们建立了一种新的用于绝对距离测量的波长扫描干涉仪实验系统, 如图 1 所示。系统中采用了波长扫描光源, 并用了两个准直结构的法布里-珀罗干涉仪, 一个作为参考干涉仪, 另一个作为传感干涉仪。从而实现了较大范围的绝对距离测量, 并放宽了对于光源稳定性、扫描重复性的要求, 使本系统在距离的长期监控测量方面较现有的其它测量方法具有更大的优势^[3]。我们曾对波长扫描干涉信号的时、频域特性进行了分析^[4]。由于法布里-珀罗腔内多光束干涉的影响, 造成波长扫描干涉信号偏离余弦形式, 进而带来系统的测量误差。本文对此作了进一步的讨论, 并围绕着提高距离测量的精度, 对干涉仪的结构采取了相应的优化设计。

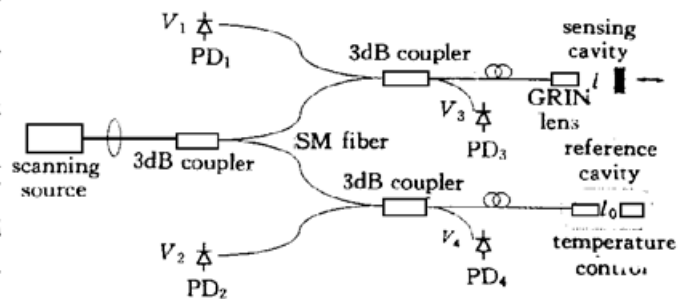


Fig. 1 The configuration of the wavelength scanning interferometer

求, 使本系统在距离的长期监控测量方面较现有的其它测量方法具有更大的优势^[3]。我们曾对波长扫描干涉信号的时、频域特性进行了分析^[4]。由于法布里-珀罗腔内多光束干涉的影响, 造成波长扫描干涉信号偏离余弦形式, 进而带来系统的测量误差。本文对此作了进一步的讨论, 并围绕着提高距离测量的精度, 对干涉仪的结构采取了相应的优化设计。

2 法布里-珀罗腔内多光束干涉对测量的影响

为克服其它干涉仪中光纤受扰动时光程变化所带来的影响, 系统中采用了法布里-珀罗干涉仪, 其反射输出光强为^[5]

$$I_r(\Phi) = I_i \frac{R_1 + R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \Phi}{1 + R_1 R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \Phi} \tag{1}$$

式中, I_i 为入射光强, R_1 、 R_2 为法布里-珀罗腔端面的(有效)反射率。实际上, 它们是端面实际反射率与其反射光耦合效率的乘积。 Φ 为相邻反射光束的相位差

$$\Phi = \frac{4\pi l}{\lambda} \tag{2}$$

由(1)式可见, 输出的干涉光强随相位的关系曲线将偏离余弦形式。为便于分析, 先取 $R = R_1 = R_2$, 则由(1)式可得相对输出光强 V_F

$$V_F(\Phi) = I_r(\Phi)/(2RI_i) = \frac{1 - \cos \Phi}{1 + R^2 - 2R \cos \Phi} \tag{3}$$

对应的双光束干涉近似为

$$V_T(\Phi) = 1 - \cos \Phi \tag{4}$$

图 2 绘出了不同反射率 R 下的 $V_F(\Phi)$ 曲线。随着 R 的增大, $V_F(\Phi)$ 在幅度上偏离 $V_T(\Phi)$ 越大。因此在处理 $V_F(\Phi)$ 时, 将会产生相位的估计误差^[6, 7]。

当波长扫描时, 对应图 2 中两条曲线的频谱如图 3 所示。可见, 随着 R 的增大, 信号的基频位置不变, 但高次谐波成分增大, 从而造成信号畸变。这里主要考虑信号畸变对于相位估计的影响。对法布里-珀罗腔输出的扫描干涉信号直接进行条纹计数(相位估计), 误差来自对条纹数的小数部分的估计^[3]。采用最大似然法^[8]对输出信号 $V_F(\Phi)$ 及双光束近似 $V_T(\Phi)$ 同时进行相位估计, 其结果分别为 Φ_F 和 Φ_r 。对于系统中复用的两个法布里-珀罗腔(传感腔和参考腔), 其反射率分别为 R 和 R_0 , 腔长分别为 l 和 l_0 。波长扫描时, 两腔相位变化的比值(Φ_F/Φ_{r0}) 与双光束近似下两腔相位变化的比值(Φ_r/Φ_{r0}) 的相对误差记为 E_r , 即

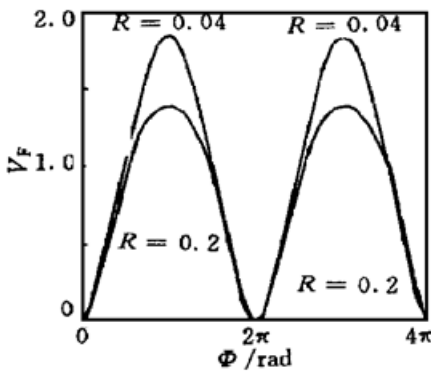


Fig. 2 The output signal from the F-P cavity with two different cavity reflectivities

$$E_r = \left| \frac{\Phi_F/\Phi_{r0} - \Phi_r/\Phi_{r0}}{\Phi_r/\Phi_{r0}} \right| \tag{5}$$

由于被测腔长的估计值等于两腔相位变化的比值 (Φ_F/Φ_{r0}) 与参考腔长 l_0 的乘积, 因此 E_r 直接影响系统的测量精度。设参考腔长 l_0 为 0.95 mm, 传感腔长 l 可在 1 mm 范围内变化。

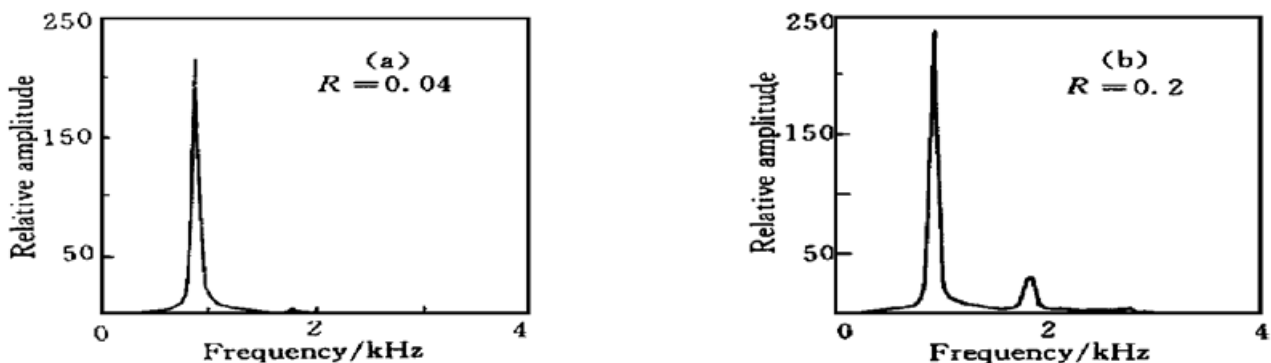


Fig. 3 The frequency spectrum of the output signal from F-P cavity with different reflectivities

当波长扫描 40 nm 时, E_r 与两个法布里-珀罗腔反射率 R 和 R_0 的关系如图 4 所示。总体上, E_r 随 R 和 R_0 的增加而增大。就 R 和 R_0 对 E_r 的作用来看, R 的影响更大, 特别是当 R 超

过 0.15 以后, 即使 R_0 很小, E_r 几乎不随之变化, 这是非常不利的情况, 因此须控制 R 不能超过 0.15。在此条件下, R_0 的选择比较灵活, 在较宽的范围内(0.04 ~ 0.20) 均可保证 E_r 不超过 0.5×10^{-4} , 对应距离测量误差不得超过 $0.05 \mu\text{m}$ 。

以上分析中, 认为任意一个法布里-珀罗腔的两个端面的反射率均相同, 即 $R = R_1 = R_2$ 。当其不同时, 根据(1) 式可以近似认为 $R = (R_1R_2)^{1/2}$, 本文称其为平均反射率。计算表明, 以上结论仍适用于端面反射率不同的情况。

3 法布里-珀罗腔结构的优化设计

本系统中采用了两个准直结构的法布里-珀罗干涉仪, 一个作为参考干涉仪, 其腔长固定, 另一个作为传感干涉仪(探头)。它们的结构及性能与距离测量有密切关系, 本文将对此进行详细的分析。干涉仪结构的优化主要在于选择最佳的腔端面反射率及参考腔长度, 并通过设计合理的参考腔结构, 使其长度易于维持。

图 5 为参考法布里-珀罗干涉仪结构。单模光纤的输出光经自聚焦透镜准直为平行光, 法布里-珀罗腔的 A 、 B 端面相互平行, 其反射率分别为 R_{C1} 和 R_{C2} 。传感法布里-珀罗干涉仪(探头) 的结构与参考法布里-珀罗干涉仪不同。如图 6 所示, 自聚焦透镜的端面 P 作为法布里-珀罗腔的一个端面(基准面), 另一个端面 Q 紧贴于被测物表面, 或者直接将被测物表面作为法布里-珀罗腔的端面。两端面的反射率分别为 R_{S1} 和 R_{S2} 。由于腔面 Q 倾斜及表面散射等原因, 其有效反射率 R_{S2} 较小。研究表明, 自聚焦透镜经过良好的准直调整, 其发散光线的影响可以忽略, 主要考虑平行光束的干涉。

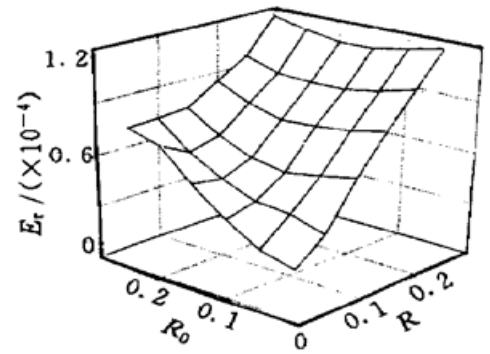


Fig. 4 The relation between the phase error and the reflectivities of two cavities

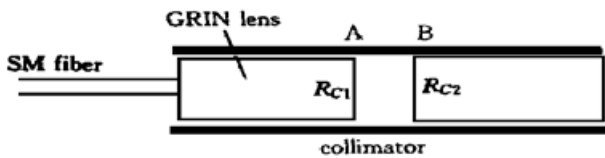


Fig. 5 The configuration of the reference cavity

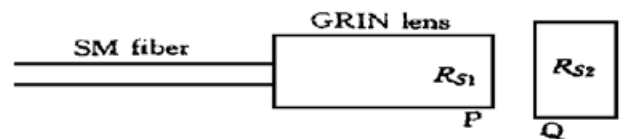


Fig. 6 The configuration of the sensing cavity

3.1 法布里-珀罗腔端面反射率的选择

在上文中, 基于相位估计的精度考虑, 对腔面反射率进行了初步的分析, 得到了平均反射率的范围。本节将基于干涉信号的频谱分析, 选择腔面的反射率。为此将(1) 式展开为三角级数形式^[9]:

$$I_r = I_d + \sum_{k=1}^{\infty} I_k \cos(k\Phi + \pi) \tag{6}$$

其中, I_d 表示信号的直流部分, 求和号内为交流分量, I_k 对应 k 次谐波, 并有

$$I_d = \frac{R_1 + R_2 - 2R_1R_2}{1 - R_1R_2} I_i \tag{7}$$

$$I_k = \frac{2(1 - R_1)(1 - R_2)}{1 - R_1R_2} (R_1R_2)^{k/2} I_i, \quad k = 1, 2, \dots \tag{8}$$

这里, R_1 和 R_2 分别为参考腔(或传感腔)两端面的反射率 R_{c1} 和 R_{c2} (或 R_{s1} 和 R_{s2}) 的简化表示。 I_1 对应双光束干涉项, 是系统要提取的测量信号, 其余多次反射所形成的干涉项则作为干扰。为得到最佳的反射率, 定义如下三个函数:

$$Y_1 = I_1/I_i \quad (9)$$

$$Y_2 = I_1^2 / \sum_{k=2}^{\infty} I_k^2 \quad (10)$$

$$Y_3 = I_1/I_d \quad (11)$$

显然, Y_1 反映了干涉信号的强度; Y_2 反映了干涉信号的信噪比, 即频谱中 useful 信号与干扰的功率比值; Y_3 则对应了干涉信号的条纹可见度。这里, 忽略了光源波长非理想扫描所产生的干扰和噪声。对 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 的分析是确定腔面反射率的主要依据。在图 7~ 图 9 中, 分别绘出了函数 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 与两端面反射率 R_1 和 R_2 的关系。希望 Y_1 、 Y_2 和 Y_3 越大越好, 但由图可见 Y_1 、 Y_2 和 Y_3 不能同时取得最大, 因而端面反射率 R_1 和 R_2 的选取需根据实际情况折中考虑。在优化这三个函数时, 有两个限制条件必须考虑, 一是上文得到的平均反射率 $(R_1 R_2)^{1/2}$ 的范围, 二是测量系统所要求的最小探测信号功率。

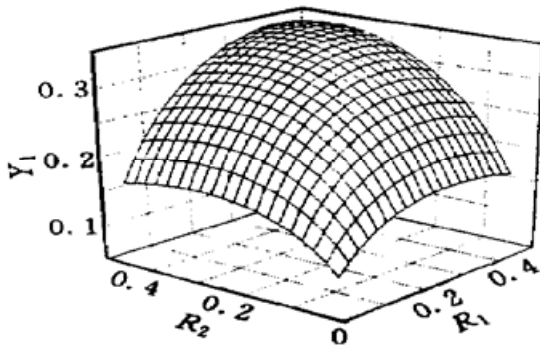


Fig. 7 Y_1 varies with R_1 and R_2

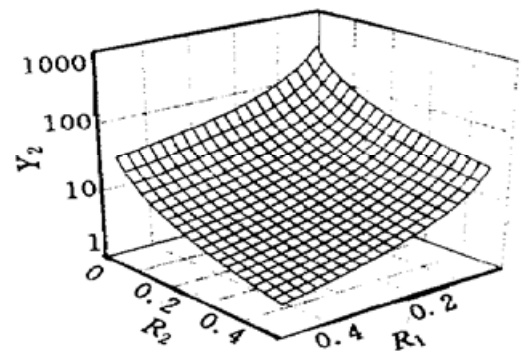


Fig. 8 Y_2 varies with R_1 and R_2

由图 7 可见, 反射率 R_1 或 R_2 越小, 则 Y_1 越小, 根据探测信号功率的要求可确定出 R_1 和 R_2 的最小值。由图 8 可见, 反射率 R_1 或 R_2 越小, 则 Y_2 越大, 即信噪比越高。根据平均反射率 $(R_1 R_2)^{1/2}$ 的范围以及信噪比的要求可确定出 R_1 和 R_2 的最大值。

图 9 反映了干涉条纹的可见度, 其值越大越有利于后续电路的放大及数据采集。 Y_3 与 R_1 和 R_2 的关系比较复杂。除非 R_1 和 R_2 均很小, 否则当其中一个减小时, Y_3 并不会随另一个的减小而增大, 而是存在一个极大值, 极大值的分布形成与 $R_1 = R_2$ 对称的两条“脊”, 这与 Y_2 有很大的不同。一条“脊”的位置由图 10 给出, 其含义是: 当 R_2 给定时, 图中曲线所对应的 R_1

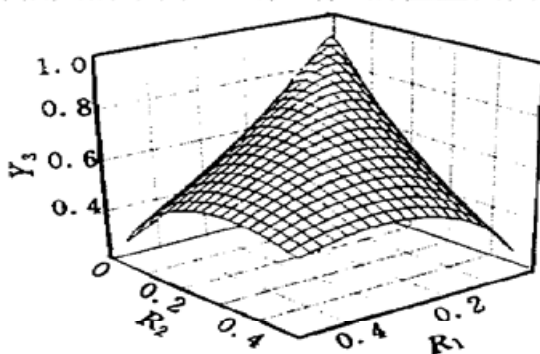


Fig. 9 Y_3 varies with R_1 and R_2

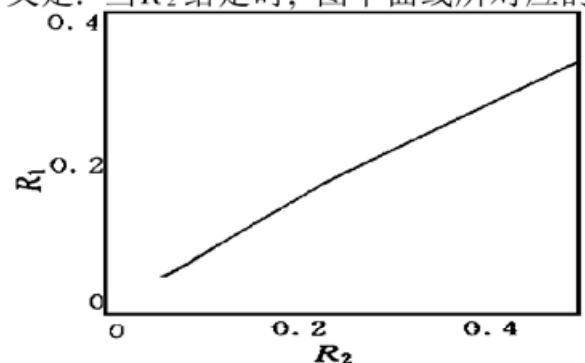


Fig. 10 The optimal values of R_1 and R_2

为最佳取值, Y_3 在此点上为极大值(沿 R_1 方向); 当 R_2 减小时(相应的 R_1 亦减小), 则此极大值逐渐增大。同样, 当 R_1 给定时, 可利用图 10 确定出 R_2 的最佳取值, 只需将图中的两个坐标互换即可。

根据以上的分析, 选择的端面反射率为 0.10~ 0.15。

3.2 参考腔长的选择

参考腔作为系统中距离测量的“尺度”, 其长度的选择及稳定性直接影响测量精度。在统计意义上, 从腔长与测量误差的关系出发, 选择合适的腔长。

待测距离 l 的测量值(估计值)可写为

$$l' = \frac{l_0 \Phi'}{\Phi_0} \quad (12)$$

这里, l_0 为固定腔长, 忽略其误差, Φ' 和 Φ_0 分别为传感腔和参考腔相位变化的测量值。 Φ' 和 Φ_0 的测量误差引起的 l' 估计误差为

$$\Delta l = l' - l = \frac{\lambda_0^2}{\Delta \lambda} (\delta \Phi - \frac{l}{l_0} \delta \Phi_0) \quad (13)$$

其中, $\delta \Phi$ 和 $\delta \Phi_0$ 为相位测量的误差。在统计意义上, Δl 、 $\delta \Phi$ 和 $\delta \Phi_0$ 均为随机变量, 模拟结果显示 $\delta \Phi$ 和 $\delta \Phi_0$ 可看作独立的随机变量。对上式两边分别取方差, 有

$$F^2(l, l_0) = \text{Var}(\Delta l) = \left(\frac{\lambda_0^2}{\Delta \lambda}\right)^2 [\text{Var}(\delta \Phi) + \frac{l^2}{l_0^2} \text{Var}(\delta \Phi_0)] \quad (14)$$

待测距离 l 的测量方差与待测腔长 l 及固定腔长 l_0 均有关。其标准差 F 是 l 和 l_0 的函数。因而, 可在方差最小意义下, 选择合理的 l_0 。由于采用了最大似然法估计干涉信号的相位, 这里, 估计方差可取 Cramer-Rao 下限^[8]。分析表明, 在系统信噪比确定的情况下, 相位估计方差与腔长近似成正比, 于是(14)式可简化为

$$F^2(l, l_0) = B(l + \frac{l^2}{l_0}) \quad (15)$$

(15) 式中, B 为与距离无关的常数。可见, 对任一待测距离, l_0 越大则 F 越小; 反之, 对于固定的腔长 l_0 , F 随待测距离的增加而增大。因此, 在测量范围内, 应当选择尽可能大的固定腔长 l_0 值。

图 11 表示信噪比为 10 dB 时, 根据系统实际参数, 按(15)式计算得到的标准差 F 与腔长 l 及 l_0 的关系。同时, 采用模拟方法, 得到了不同信噪比条件下标准差 F 与腔长 l 及 l_0 的关系, 如图 12 所示。理论分析的结论与模拟结果较好地吻合。

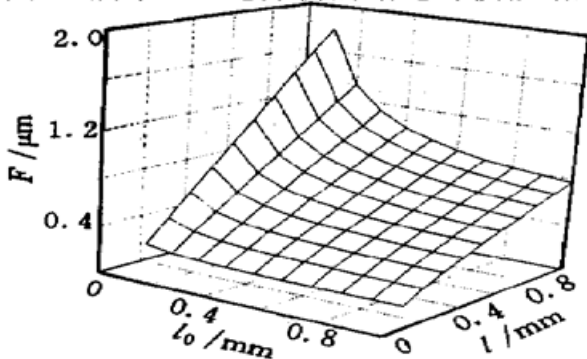


Fig. 11 The calculated F as the function of cavity lengths l and l_0

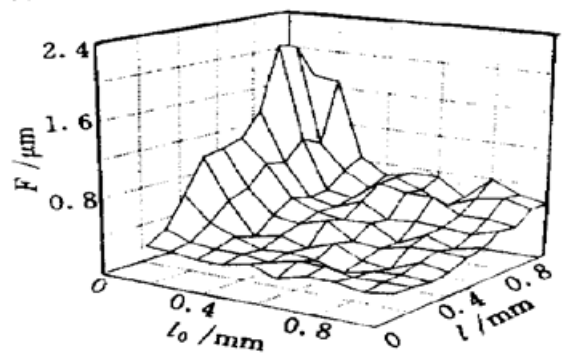


Fig. 12 The simulated F as the function of cavity lengths l and l_0

综上所述,针对测量范围 1 mm,应选择参考腔长范围为 0.9~1 mm,实际制作的腔长为 0.95 mm。

3.3 参考腔的稳定性

关于参考法布里-珀罗腔的稳定性,主要考虑环境温度的变化对腔长的影响。通过设计合理的结构及选择合适的材料可以提高参考腔的稳定性。当环境温度变化较大时需采用相应的温控措施。对实际制作的参考腔的温度特性进行了测试。实验装置如图 13 所示。采用一个波长 1.3 μm 、谱宽 50 nm 的发光二极管作为光源,出射光通过 3 dB 的单模光纤耦合器注入参考腔,其反射输出光由光谱仪接收,输出数据由计算机进行处理。自制的加热装置用于改变参考腔的温度。温度值由精度 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 的热电偶读出。当光谱仪扫描时,一个腔长对应一组干涉条纹。温度变化致使法布里-珀罗腔长改变,将引起输出干涉条纹的移动。在图 14 中给出了不同温度下的输出条纹。通过检测干涉条纹的移动可知腔长变化,进而获知其温度系数。本实验测得的腔长温度系数约 $1.2 \times 10^{-5} \mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ 。由(12)式可知,在 1 mm 测量范围内,参考腔温度变化 1 $^{\circ}\text{C}$ 引起的距离测量误差最大不超过 0.012 μm 。因而对参考腔温控在 1 $^{\circ}\text{C}$ 以内可满足要求,并且易于实现。

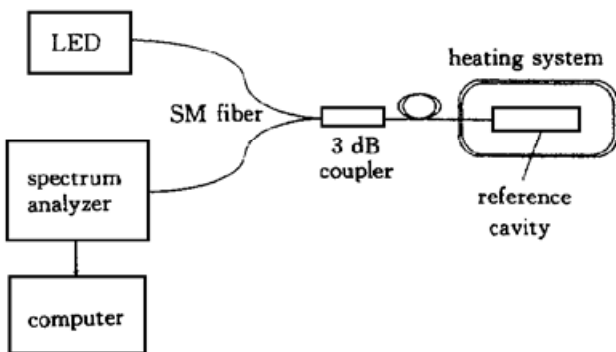


Fig. 13 Experiment system for measuring the temperature characteristics of the reference cavity

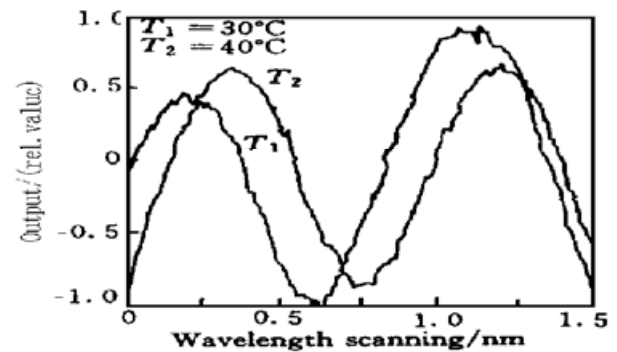


Fig. 14 The fringe move of the reference cavity with the temperature change of 10 $^{\circ}\text{C}$

利用本实验系统,在 1 mm 距离测量范围内,可达到 0.05 μm 的精度和 0.01 μm 的分辨力。

结 论 提出了一种新的可用于绝对距离测量的波长扫描光纤干涉仪实验系统。为克服其它干涉仪中光纤受扰动时光程变化所带来的影响,系统中采用了法布里-珀罗干涉仪。文中着重讨论了系统中两个法布里-珀罗腔输出干涉信号的时域及频域特性。由于腔内多光束干涉对输出信号的影响,产生了相位测量误差。研究表明,通过选择合适的腔端面反射率和参考腔长度可以减小相位测量误差。通过定义三个优化函数来确定腔面反射率的选择范围,并在统计意义上确定参考腔的长度。实际选择的腔面反射率为 0.10~0.15,参考腔长为 0.95 mm。实验结果表明在 1 mm 范围内可达到 0.05 μm 的测距精度。

参 考 文 献

- [1] Chinn S R, Swanson E A, Fujimoto J G. Optical coherence tomography using a frequency-tunable optical source. *Opt. Lett.*, 1997, 22(5): 340~342
- [2] Li T, May R G, Wang A *et al.*. Optical scanning extrinsic Fabry-Perot interferometer for absolute mi-

- crodisplacement measurement. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(34) : 8858~ 8861
- [3] 王 勇, 廖延彪, 田 芊等. 可调外腔半导体激光器的绝对距离测量. *激光与红外*, 1998, **28**(1) : 30~ 33
- [4] 王 勇, 廖延彪, 田 芊. 用于绝对距离测量的波长扫描干涉仪信号分析. *光学学报*, 1999, **19**(4) : 544~ 551
- [5] Hariharan P. *Optical Interferometry*. Sydney Australia: Academic Press, 1985. 151~ 163
- [6] Ezbiri A, Tatam R P. Five wavelength interrogation technique for miniature fiber optic Fabry-Perot sensors. *Opt. Commun.*, 1997, **133**(1) : 62~ 66
- [7] Santos J L, Leite A P, Jackson D A. Optical fiber sensing with a low-finesse Fabry-Perot cavity. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(34) : 7361~ 7366
- [8] 向敬成, 王意青, 毛自灿等. *信号检测与估计*. 北京: 电子工业出版社, 1994. 115~ 154
- [9] Chang C C, Sirkis J. Multiplexed optical fiber sensors using a single Fabry-Perot Resonator for phase modulation. *J. Lightwave Tech.*, 1996, **14**(7) : 1653~ 1663

Optimization of the Wavelength Scanning F-P Interferometer

Wang Yong¹⁾ Liao Yanbiao¹⁾ Tian Qian²⁾

1), *Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084*
2) *Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084*

(Received 22 June 1998; revised 24 August 1998)

Abstract The phase errors, resulting from the multi-beam interference in the Fabry-Perot cavities of the wavelength scanning fiber-optic interferometer for absolute distance measurement, are analyzed. It's proved that selecting the suitable reflectivities of two F-P cavities and the length of the reference cavity can reduce the phase errors. In authors' system, the optimal cavity reflectivity is in the range of 0.10~ 0.15 and the reference cavity length is about 0.95 mm, the accuracy of 0.05 μm can be obtained in the range of 1 mm.

Key words wavelength scanning, F-P interferometer, distance, optimization.