

波长扫描光纤干涉仪扫描模型的建立及分析

王勇¹⁾ 廖延彪¹⁾ 田芋²⁾

(¹⁾清华大学电子工程系, (²⁾清华大学精密仪器系, 北京, 100084)

TH 744.301

摘要 介绍了一种新的可用于绝对距离测量的波长扫描光纤干涉仪, 建立了测量系统及波长扫描的模型, 分析了波长扫描的随机漂移对测量的影响, 提出了对光源扫描性能的要求, 实验结果表明, 测量系统的精度可达到 0.05 μm.

关键词 光纤干涉仪, 波长扫描, 距离, 扫描模型.

干涉仪

引言

光纤传感器与其它传统的传感器相比具有体积小、重量轻、耐腐蚀、抗电磁干扰、适用于易燃易爆环境等优点^[1], 而且便于联网和复用. 光学干涉技术是目前最精确的测量手段之一^[2], 其中绝对距离的测量是重要的发展方向而被广泛研究. 新发展的干涉技术, 如白光干涉技术^[3]、线性调频外差干涉技术^[4]、采用小数条纹的双波长干涉技术^[5]等, 使得光纤位移传感器以其广泛的适用性、高灵敏度和大的动态范围更加引人注目. 但是这些方法要求稳定的中心频率或高线性度的调频或高稳定性的机械移动解调信号, 这些是不易实现的, 而且这些方法更适用于相对位移的测量, 如果应用于绝对距离的测量则必须校准作为参考尺度的光源波长.

为克服以往技术的不足, 基于双腔比较的思路^[6], 我们建立了一种新型的可用于绝对距离测量的波长扫描干涉仪^[7], 避免了使用精密的机械移动机构解调信号, 因而较其它技术更易于实用化. 由于光源波长在较大范围内扫描, 其输出信号不同于以往的干涉仪, 为更好地研究输出信号的特性, 本文建立了测量系统的模型和波长扫描的模型, 在此基础上, 详细讨论了波长扫描的性能对输出信号的影响.

1 测量原理与系统结构

波长扫描干涉仪的系统结构如图 1 所示. 采用一个红外波长可连续调谐的外腔激光器作光源, 其出射光同时注入两个低细度的光纤 F-P 干涉仪 (细度小于 2.5), 一个作为传感腔, 其自聚焦透镜端面与可移动反射面之间的距离 l 待测, 另一个作为参考腔, 其腔长 l_0 准确标定并通过选择合适的材料和控制其温度而保持固定. 当光源波长扫描 $\Delta\lambda$ 时, 每个干涉仪输出一组干涉条纹, 在双光束干涉近似下, 条纹数分别为 $2l\Delta\lambda/\lambda^2$ 和 $2l_0\Delta\lambda/\lambda^2$, 其比值等于两个腔长的比

稿件收到日期 1997-11-26, 修改稿收到日期 1998-04-20

值 l/l_0 , 由此获得了待测的绝对距离, 并消除了光源的影响. 这一方案实际上是把波长作为中介去比较传感腔和参考腔的长度, 以获得传感腔的准绝对信息. 采用这种方法, 不但可获得绝对距离, 并可减少系统对光源稳定性、扫描重复性的要求, 系统更易于实用化.

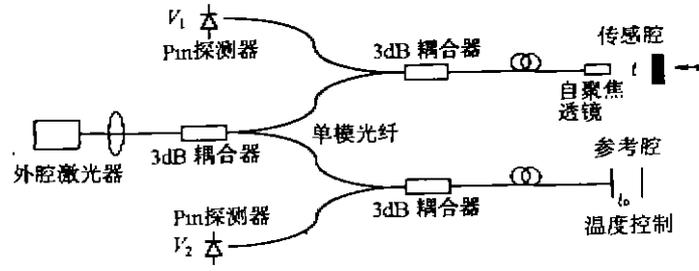


图1 波长扫描干涉仪的系统结构

Fig. 1 The configuration of the wavelength scanning interferometer

2 测量系统的模型

图2为绝对距离测量系统的模型框图. 在一次扫描过程中, 光源的波长从 λ_1 至 λ_2 扫描, 输入光被腔长分别为 l 和 l_0 的 F-P 干涉仪调制后, 产生两组干涉条纹. 信号处理单元利用这两组干涉条纹及已知的腔长 l_0 , 求出待测的腔长 l . 实际上, 由于光源及两个 F-P 干涉仪的性能不完善, 对输出信号产生了一定的影响, 使得求解腔长 l 出现误差. 波长扫描的线性是光源的主要指标. 波长扫描的随机漂移, 形成干涉仪的输入噪声, 再加上干涉自身的干扰和噪声, 造成输出干涉条纹的信噪比恶化, 测量精度下降. 本文通过对扫描模型的分析, 可以定量地研究波长扫描的漂移对输出信号的影响, 为光源的优化设计提供依据.

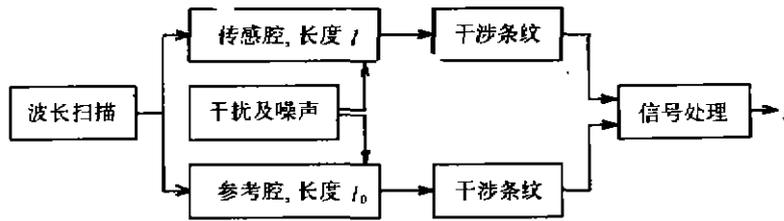


图2 测量系统的模型框图

Fig. 2 Model diagram of measurement system

2.1 波长扫描模型的建立及简化

图3为理想的波长扫描过程示意图. 外腔激光器的转动光栅由电机驱动, 其转动周期为 T_p ^[7], 在此期间光源两次扫描, 即 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 和 $\lambda_2 \sim \lambda_1$, 分别称为正扫描和逆扫描, 其扫描时间为 T_h 和 $T_p - T_h$. 记扫描范围 $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$, F-P 腔规一化的双光束干涉输出为:

$$V(t) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \cos\left(\frac{4\pi l}{\lambda}\right) S(\lambda, \lambda_0(t)) D(\lambda) d\lambda \bigg/ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda, \lambda_0(t)) \cdot D(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

式(1)中 $S(\lambda, \lambda_0(t))$ 是光源的光谱分布, λ_0 是中心波长, 并随时间线性变化, $\delta\lambda$ 为光源谱宽. $D(\lambda)$ 是探测器的光谱响应函数, $4\pi l/\lambda$ 是 F-P 干涉仪双光束干涉的相位差. 在一次扫描过程

中, λ_1, λ_2, l 是输出信号中的未知参数. 因此, 信号处理的关键是设计有效的算法, 滤除干扰和噪声, 并准确地获得未知参数 l .

本文只研究正扫描过程的输出信号, 对逆扫描过程的分析是类似的. 在不影响单周期正扫描过程输出信号分析的前提下, 对图 3 的扫描模型进行简化, 并假设逆扫描与正扫描过程时间相同, 即 $T_p = 2T_h$, 则简化的扫描模型由图 4 所示, 我们将以此为基础, 研究光源的扫描特性与输出信号的关系.

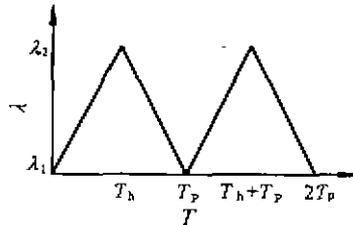


图 3 波长的扫描过程示意图
Fig. 3 The scanning wavelength λ versus time T

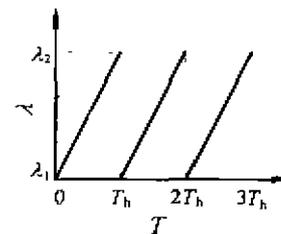


图 4 波长扫描过程的简化模型
Fig. 4 The simplified model of the wavelength scanning

2.2 波长扫描的漂移

定义扫描范围的中点为 $\lambda_c = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$, 设 η 为 λ_0 相对于 λ_c 的偏移, $\eta = \lambda_0(t) - \lambda_c$, $\eta \in [-\Delta\lambda/2, \Delta\lambda/2]$. 在上文中, 认为波长均匀扫描, 无随机漂移, 即 η 随时间 t 线性变化. 但实际上由于机械加工的偏差以及光栅运动时的晃动, 造成 η 偏离直线(见图 5). 由于 η 的随机漂移, 形成输出信号中的随机噪声, 降低了输出的信噪比. 本文通过建立波长扫描过程的数学模型, 研究其随机漂移特性对输出干涉信号信噪比的影响. 文中假设波长扫描过程连续、稳定, A/D 采样均匀.

在图 5 中, 设每次扫描过程的周期为 KT , K 为采样点数, T 为采样周期. 理想情况下输出波长 $\eta'_i = \eta_0 + \alpha iT$, 而实际输出波长 $\eta_i = \eta_0 + \alpha t_i$, 这里 α 为波长扫描速率, t_i 为等效采样时间, 即理想的波长输出线上 η_i 对应的时间, $0 \leq i \leq K-1$. 于是将波长的随机漂移 $(\eta_i - \eta'_i)$ 转化为采用时间的随机偏离 $(iT - t_i)$, 两者相差 α 倍.

在一个扫描周期内, 采样时间序列为 $\{0, T, 2T, \dots, (K-1)T\}$, 对于波长均匀扫描的理想光源, 输出波长应为 $\{\eta'_0, \eta'_1, \eta'_2, \dots, \eta'_{K-1}\}$, 对应的理想输出信号序列为 $\{V(0), V(T), V(2T), \dots, V[(K-1)T]\}$, 设其对应的模拟信号的频谱为 $F(\omega)$, 其带宽小于 $1/2T$. 由于波长扫描的非线性及漂移的影响, 光源实际输出波长为 $\{\eta_0, \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_{K-1}\}$, 等效的采样时间序列为 $\{t_0, t_1, t_2, \dots, t_{K-1}\}$, 其间隔不相同, 并具有一定的随机性, 对应的输出序列为 $\{V(t_0), V(t_1), V(t_2), \dots, V(t_{K-1})\}$. 下面按图 3、图 4 和图 5 所示的模型对非均匀扫描时输出信号序列 $\{V_i\}$ 的频谱进行求解.

设原始输出信号序列为 $S = \{V(t_0), V(t_1), \dots, V(t_1), \dots, V(t_k), \dots\}$, 并假设对于 $0 \leq i \leq K-1$, t_i 与 t_{i+K} 的间隔为常数 KT , 于是序列 S 可分解为如下 K 个序列:

$$S_i = \{V(t_i), V(t_{K-1}), V(t_{2K+1}), \dots\}, \quad (i=0, 1, \dots, K-1)$$

在序列 $S_i (i=0, 1, \dots, K-1)$ 中的每两个点之间插入 $K-1$ 个 0, 再将其右移 i 个点, 得到一新的序列:

$$S_i = [0, 0, \dots, 0, V(t_i), 0, 0, \dots, 0, V(t_{K+i}), 0, 0, \dots, 0, \dots],$$

对序列 \overline{S} 求和即为 S ,由傅里叶变换的特性知波长非均匀扫描时序列 S 的频谱为^[5]:

$$\overline{F(\omega)} = \frac{1}{KT} \sum_{i=0}^{K-1} \left[\sum_{m=-\infty}^{\infty} F(\omega - \frac{2\pi m}{KT}) e^{i\omega t_i - \frac{2\pi m}{KT} t_i} \right] e^{-i\omega t_i} \quad (2)$$

定义扫描时波长的相对漂移为 $e_i = (\eta_i - \eta_0) / \alpha T$,则 $t_i = iT - e_i T$.代入式(2),则有:

$$\overline{F(\omega)} = \frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{K} \sum_{i=0}^{K-1} e^{i(\omega - \frac{2\pi m}{KT}) iT - \frac{2\pi m}{KT} e_i} \right] F(\omega - \frac{2\pi m}{KT}) \quad (3)$$

为研究波长非均匀扫描对测量的影响,忽略系统中其它噪声的影响,假设波长均匀扫描时,输出信号为频率 f_0 的理想余弦波,将其频谱代入式(3),有:

$$\overline{F(\omega)} = \frac{2\pi}{T} \sum_{m=-\infty}^{\infty} A(m) \delta(\omega - \omega_0 - \frac{2\pi m}{KT}) \quad (4)$$

式(4)中 $A(m)$ 为各频率分量的幅度,其表达式为:

$$A(m) = \frac{1}{K} \sum_{i=0}^{K-1} e^{-j2\pi e_i (iT - \frac{2\pi m}{KT})} \quad (5)$$

由于扫描过程中波长的随机摆动,输出信号的频谱以 f_T/K 为间隔在频域上周期展开,如图6所示,每个周期内有 K 条谱线, f_T 为采样频率, $f_T = 1/T$.信号主频位于 f_0 处,幅度为 $|A(0)|$,其余的谱线为噪声.由Parseval定理可知,输出的信噪比为:

$$SNR = 10 \lg \left(\frac{|A(0)|^2}{1 - |A(0)|^2} \right) \text{ (dB)} \quad (6)$$

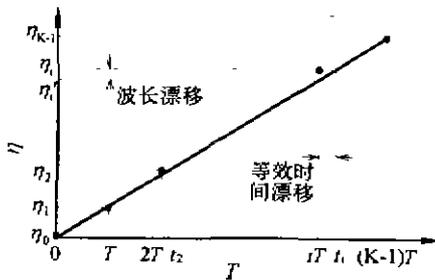


图5 光源实际输出波长与理论值的偏差
Fig. 5 Deviation between practical output wavelengths and theoretical values

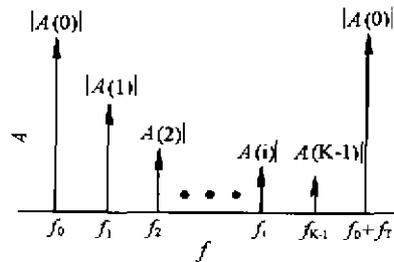


图6 波长非理想扫描时的输出信号频谱
Fig. 6 The output frequency spectrum under a non-ideal wavelength scanning

通过对实际系统结构进行分析,求解 $|A(0)|$,可获得输出的信噪比.

假设波长扫描过程为随机过程,将波长的相对漂移 $[e_0, e_1, \dots, e_{K-1}]$ 看作 K 维的独立同分布的随机变量,定义 $x_i = e_i f_0 / f_T$,则 $[x_0, x_1, \dots, x_{K-1}]$ 为 K 维的独立同分布的随机变量.设其概率密度函数为 $p(x)$,特征函数为 $P(x)$,则有:

$$E[|A(0)|^2] = |P(2\pi)|^2 + [1 - |P(2\pi)|^2]/K. \quad (7)$$

式(7)中, $E[\cdot]$ 为数学期望, 将式(7)代入式(6), 则有:

$$SNR = 10 \lg \frac{(K-1)|P(2\pi)|^2 + 1}{(K-1)(1 - |P(2\pi)|^2)} \text{ (dB)}. \quad (8)$$

对于我们实际制作的可调谐外腔激光器, x 的概率密度可用 Gauss 分布和均匀分布来近似:

(1) 设 x 服从均值为零、方差为 σ 的 Gauss 分布, 将 $|P(2\pi)| = \exp(2\pi^2\sigma^2)$ 代入式(8), 有

$$SNR = -10 \lg \frac{1 - \exp(2\pi^2\sigma^2)}{1/(K-1) + \exp(2\pi^2\sigma^2)} \text{ (dB)}. \quad (9)$$

(2) 设 x 服从 $(-a/2, a/2)$ 上的均匀分布, 将 $|P(2\pi)| = \text{sinc}(\pi a)$ 代入式(8), 有

$$SNR = -10 \lg \frac{1 - \text{sinc}^2(\pi a)}{1/(K-1) + \text{sinc}^2(\pi a)} \text{ (dB)}. \quad (10)$$

式中, 分布参数 σ 和 a 由光源的具体结构、零件加工及安装精度所决定. 设每周期的采样点数 $K=400$, 计算得到, 当 x 为 Gauss 分布和均匀分布时, 输出的信噪比 SNR 与 a 及 σ 的关系如图 7 所示. 可见要保证信噪比不低于 10dB, 应有 $\sigma < 0.05$ 和 $a < 0.12$. 由此可对光源的结构设计与机械加工精度提出要求, 以确保输出信号有较高的信噪比.

以上分析中假设波长均匀扫描时的输出为理想余弦波. 实际上, 只有当信号频谱宽度与谱线间隔 f_T/K 相比足够窄时, 才能这样处理. 当此条件不满足时, 输出信号的频谱连续分布, 须采用数值积分的方法求解信噪比.

在实验系统中, 采用了三个 3dB 单模光纤耦合器, 参考 F-P 腔的长度选择为 0.95mm, 探测器选用 InGaAs 材料的 Pin 二极管. 探测器响应率随波长的变化以及扫描时光源输出功率的变化, 可通过对输出信号规范化处理而消除. 我们所设计的可连续调谐的外腔激光器的中心波长为 1.3 μm , 线宽小于 10MHz, 波长扫描范围可达 40nm, 扫描频率约 50Hz, 所用

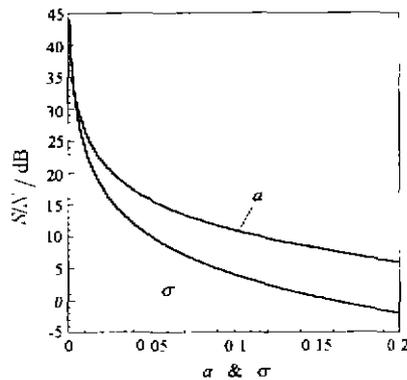


图 7 信噪比 SNR 与分布参数 a 或 σ 的关系
Fig. 7 The relationship between SNR and distribution parameter a or σ

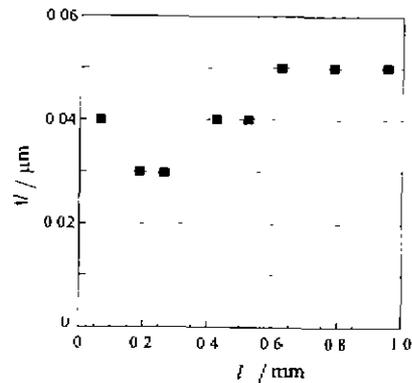


图 8 测量误差的实验结果
Fig. 8 The experiment results of the distance measurement errors

的 12 位的 A/D 芯片采样率为 40kHz. 通过对大量实验数据的频谱计算和分析, 表明本干涉仪的输出信噪比优于 8dB. 在此基础上, 我们采用数字信号处理的有关技术设计了相应的求解算法^[8], 可在一定程度上克服扫描过程中波长随机漂移的影响, 滤除干扰和噪声, 并有效地提高相位的分辨率. 测量结果如图 8 所示, 在 0~1mm 的距离范围内, 测量系统达到了 0.05 μm 的精度.

REFERENCES

- 1 Giallorenzi *et al.* *IEEE J. Quant. Electr.*, 1982, **QE-18**(4), 626~665.
- 2 Hariharan P. *Optical interferometry*, Academic Press Australia, 1985.
- 3 Wang D N. *et al.* *J. Lightwave Tech.*, 1995, **13**(5), 961~966.
- 4 TIAN Qian, *et al.* *Chinese Laser* (田 芊等, *中国激光*), 1992, **19**(9), 668~670.
- 5 Onodera R, ISHII Y. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(22), 4740-4746.
- 6 LI Tian-Chu, May R G, WANG An-Bo, *et al.* *Proceedings of SPIE*, 1996, **2895**, 58~63.
- 7 WANY Yong, LIAO Yan-Biao, TIAN Qian, *et al.* *Laser & Infrared* (王 勇, 廖延彪, 田 芊等, *激光与红外*), 1998, **28**(1), 30~33.
- 8 SHEN Lan-Sun. *Principles and applications of high-speed data acquisition systems*. Beijing: People's Post and Telecommunication Press (沈兰荪. *高速数据采集系统的原理与应用*. 北京: 人民邮电出版社), 1996.

ESTABLISHMENT AND ANALYSIS OF SCANNING MODEL OF A WAVELENGTH SCANNING FIBER-OPTIC INTERFEROMETER

WNAG Yong¹ LIAO Yan-Biao¹ TIAN Qian²

(¹Dept. of E. E., ²Dept of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing, 100084, China)

Abstract A new wavelength scanning fiber-optic interferometer for absolute distance measurement was proposed. The measurement system and scanning model were put forward. Based on these models, the influence on distance measurement of the random drift of the source wavelength was analyzed. The demands for the source were proposed. The measurement precision of 0.05 μm was obtained in this experiment.

Key words fiber-optic interferometer, wavelength scanning, distance, scanning model.