

基于人工神经网络的大量程光纤实时距离干涉测量仪

李代林 王向朝 刘英明

(中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学研究实验室, 上海 201800)

摘 要 提出了一种基于神经网络的全光纤化大量程实时距离干涉测量仪。采用双正弦相位调制方法, 即通过同时调制半导体激光器的波长和干涉仪的光程差实现外差测量。为了扩大干涉仪的测量范围和消除输出信号中的交叉敏感, 采用神经网络进行信号处理, 把两路经过初步解调的干涉信号作为输入样本, 物体距离的实际值作为输出样本, 对神经网络进行训练, 以使其具有良好的推广能力。实验结果表明神经网络的使用不仅扩大了距离的测量范围而且提高了测量精度。

关键词 干涉仪; 神经网络; 距离测量

中图分类号 TH744.3 **文献标识码** A

0 引言

高精度距离测量技术已广泛应用于现代精密机械、仪表、兵器和宇航等产业, 同时也是制约上述产业产品及技术发展的一个主要因素。传统的机械或光学方法已不能满足高精度、自动化测量的要求。而全光纤干涉仪具有体积小、精度高、抗电磁干扰等特点, 在生产工艺监控和自动化领域获得了较为普遍的应用。线性调频半导体激光干涉测量技术具有结构简单、精度高等优点, 已经用来测量物体微位移和微振动^[1~6], 其中同时调制半导体激光器的波长和干涉仪的光程差的双正弦相位调制技术已经用来测量物体的绝对距离^[6], 但是它的量程受到贝塞尔函数的单值区间的限制, 测量范围相对较小。本文提出了一种新的双调制光纤距离实时干涉测量仪, 采用神经网络(Artificial Neural Network, ANN)来处理经过初步解调的干涉信号, 扩大了干涉仪的测量范围并消除了因调制引起的信号的交叉敏感。由于信号处理系统基本由电路组成, 可以实现对物体距离的实时测量。

1 原理

实验装置如图 1, 其光路部分是一个泰曼-格林干涉仪。

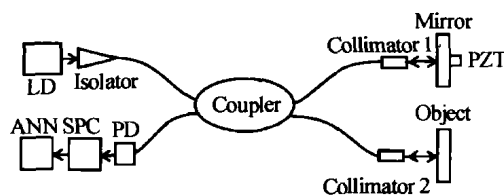


图 1 基于神经网络的大量程光纤实时距离干涉测量仪
Fig. 1 Fiber optic interferometer for real-time distance measurements with ANN

半导体激光器驱动电流由直流电流 i 和正弦调制电流 $i(t) = a \cos(\omega_m t + \theta)$ 组成, 激光器的输出波长和光强分别为

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \Delta\lambda(t) = \lambda_0 + \beta_1 a \cos(\omega_m t + \theta) \quad (1)$$

$$g(t) = g_0 + \Delta g(t) = g_0 + \beta_2 a \cos(\omega_m t + \theta) \quad (2)$$

式中 ω_m 和 a 分别是正弦调制电流的角频率和振幅, β_1 和 β_2 分别为 LD 的波长调制系数和光强调制系数, λ_0 是激光器的中心波长。激光器发出的光经过光隔离器后由 3 dB 耦合器分成两路, 其中一路经过准直器 1 出射后以平行光照射到参考反射镜上, 参考反射镜粘在一个压电陶瓷(PZT)上, PZT 在正弦驱动信号的作用下产生振幅和角频率分别是 L_p 、 ω_p 的微小位移 $L_p \sin \omega_p t$ 。另一路光经过准直器 2 准直后照射到被测物体上, 经被测物体垂直反射后, 通过光纤准直器返回光纤。被参考反射镜反射回去的参考光与物体反射的物体光经过耦合器后产生干涉, 干涉信号由在另一端的光电探测器 PD 检测。探测器接收到的干涉信号的交流分量为

$$S(t) = S_1(t) \cos [z \cos \omega_m t + \phi] = S_1(t) [z \cos \omega_m t + (4\pi/\lambda_0)L] \quad (3)$$

式中 $z = 4\pi\alpha\beta L/\lambda_0^2$ 是相位调制深度, $L = L_0 + L_p \sin \omega_p t$ 是干涉仪两臂间的总光程差, L_0 是静态光程差。式(3)可以展开为

$$S(t) = S_1(t) \{ \cos \phi [J_0(z) - 2J_2(z) \cos 2\omega_m t + \dots] - \sin \phi [2J_1(z) \cos \omega_m t - 2J_3(z) \cos 3\omega_m t + \dots] \} \quad (4)$$

其中 $J_n(z)$ 是 n 阶贝塞尔函数。

将干涉信号送入由鉴相电路、带通滤波器和锁相环电路共同组成的信号处理电路(SPC)进行解调。其中鉴相电路由乘法器和低通滤波器组成, 低通滤波器的截止频率为 $\omega_m/10$ 。带通滤波器的中心频率是 $3\omega_m$ 。干涉信号分别经鉴相电路和带通滤波器后, 得到两路输出信号 P_1 和 P_2

$$P_1 = K_s S_1(t) J_1[z_0] \sin [4\pi(L_0 + L_p \sin \omega_p t)/\lambda_0] \quad (5)$$

$$P_2 = K_1 S_1(t) J_3[z_0] \sin [4\pi(L_0 + L_p \sin \omega_p t) / \lambda_0] \quad (6)$$

其中 $z_0 = 4\pi\alpha\beta L_0 / \lambda_0^2$, K_s 与 K_1 分别为鉴相电路和带通滤波器的增益. 然后将 P_1 和 P_2 和 PZT 驱动信号同时输入到锁相环电路中, 分别得到两路信号的振幅

$$P'_1 = K_s S_1(t) J_1[z_0] \quad (7)$$

$$P'_2 = K_1 S_1(t) J_3[z_0] \quad (8)$$

图 2 给出了信号处理电路的两路输出. 从图中可以看出, 两路信号是分别带有被高频调制的 1 阶和 3 阶贝塞尔函数的 P'_1 和 P'_2 . 如果仅由其中一路输出信号求解物体的距离, 测量系统的量程受到输出函数的单值区间限制, 难以满足较大量程测量的要求. 若同时利用两路信号, 就会较大幅度地提高系统的测量范围. 因为从图中可以看出, 在两路信号的交点 A 以前, P'_1 大于 P'_2 , 在交点 A 处, 它们相等, 在交点 A、B 之间的函数区域, 情况正好相反. 总之, 在交点 B 之前, 若同时利用两路信号作为输出信息, 则每一个确定的物体距离都存在两个相应的函数值与之对应, 这时该测量系统的输出和输入是一一对应的. 即干涉仪的逆向模型为

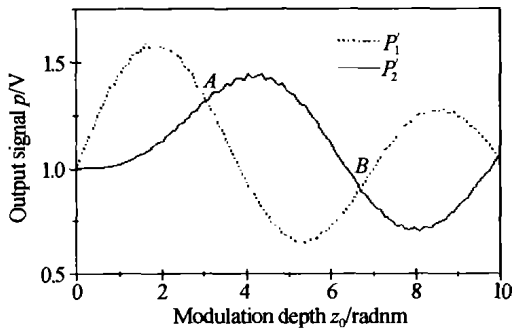


图 2 信号处理电路输出的信号
Fig. 2 Output signals of the SPC

$$d = f(P'_1, P'_2) \quad (9)$$

因为前向神经网络具有很强的非线性映射能力, 由科尔莫戈罗夫定理可知, 三层结构的神经网络能以任意精度模拟任何连续函数^[7]. 利用这一特点, 我们建立了干涉仪的神经网络逆向模型. 它是一个包含两个输入和一个输出的 3 层前馈型神经网络模型, 其中由 15 个双曲正切激活函数神经元构成隐含层, 由一个线性激活函数神经元构成输出层. 神经网络模型如图 3.

网络中第 k 层第 j 个神经元的输入输出关系为

$$I_j^k = \sum_{i=1}^N w_{ij}^k x_i^{k-1} - \theta_j^k \quad (10)$$

$$y_j^k = f(I_j^k) \quad (11)$$

式中 y_j^k 是第 k 层第 j 个神经元的输出, w_{ij}^k 是从第 $(k-1)$ 层第 i 个神经元到第 k 层第 j 个神经元之间的连接权值, θ_j^k 为阈值, $f(I)$ 是激活函数.

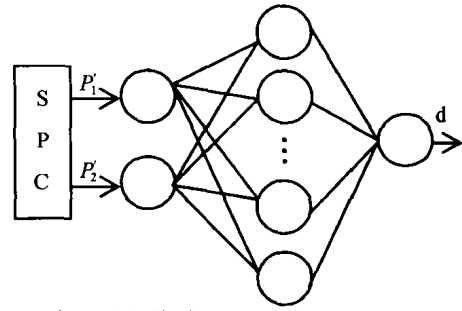


图 3 神经网络模型
Fig. 3 Model of the neural network architecture

在应用神经网络之前, 首先要进行人工神经网络的训练. 其目的是根据一定数量的样本, 通过一定的学习算法, 获得能够反映被测对象实际的网络权重, 从而进行应用与推广. 前向神经网络在实用中存在两个主要缺点, 一是收敛速度慢, 二是目标函数存在局部最小点. 为避免上述问题, 网络学习算法采用的是带动量的批处理梯度下降法. 训练时先从输入层开始正向计算各层神经元的输入和输出. 当输出层节点的实际输出 $d(i)$ 与事先给定的信号 $d^*(i)$ 不一致或误差不满足时, 则执行误差前馈传播, 逐层修改网络的连接权值, 直至误差平方和满足

$$F = \sum_{i=1}^m [d(i) - d^*(i)]^2 \leq \epsilon \quad (12)$$

或训练达到预先给定的循环次数. 式(12)中, m 为训练样本数, ϵ 为预先给定的误差平方和指标.

2 仿真与实验

我们利用式(7)和式(8)得到曲线交点 B 点对应的 Z 值, 从而由本系统所用激光器参数和调制电流的大小就可以得到系统最大测量距离. 两路信号随时间和物体距离变化情况分别如图 4(a)、(b).

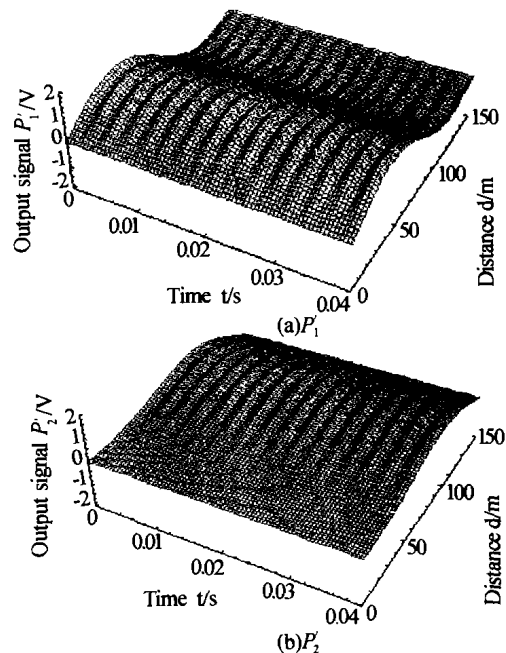


图 4 不同物体距离和时间下的输出信号
Fig. 4 Output signals versus different time and distances

从图中可以看出,经解调后的两路干涉信号的振幅都存在着交叉敏感现象,即 P_1' 和 P_2' 的输出对时间和物体距离都是敏感的,而采用神经网络就可以很好的解决这个问题,提高测量精度.

我们保持参考镜和准直器 1 的位置不变,移动被测物体,在不同的位置处记录下两路信号 P_1' 和 P_2' ,得到一组样本数据. 将获得的 150 组目标序列和对应的输入向量序列送入到神经网络中进行 900 次循环训练,训练结束时误差平方和指标为 4.18526×10^{-6} . 训练收敛情况如图 5.

为了验证网络具有良好的泛化能力,需要使用经验数据对其性能进行检验,其结果符合要求后才能投入使用. 检测数据与训练数据的选择方式应该相同,并且是训练时没有使用过的数据,并且还

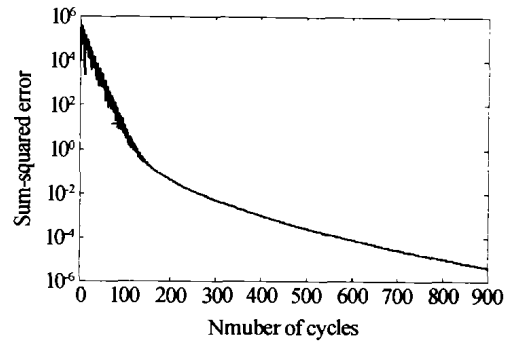


图 5 神经网络收敛曲线

Fig. 5 Neural network convergence curve

包含网络设计要求的全部模式,才能保证全面检验网络性能. 我们移动被测物体,分别取了 10 个不同位置检验神经网络. 表 1 中给出了检验数据和神经网络的比较.

表 1 光纤干涉仪的检验结果

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p_1'/V	2.1408	4.2803	4.7721	3.5469	1.1223	-1.6016	-3.6790	-4.4607	-3.8117	-2.1292
p_2'/V	-0.9406	-0.5634	0.2772	1.4587	2.6186	3.2951	3.1255	2.0173	0.2170	-1.7556
Distance d/mm	15.000	30.000	45.000	60.000	75.000	90.000	105.000	120.000	135.000	150.000
ANN output d'/mm	15.006	29.996	45.000	59.998	74.996	90.002	104.999	120.002	134.999	150.002

从表 1 的实验数据可以看出,采用神经网络消除了因调制光源波长引起的干涉信号的交叉敏感,提高了测量精度,神经网络的输出与实际距离呈线性关系. 并且在干涉仪的整个量程中,干涉测量始终保持了较高的精度. 我们所用实验装置如图 1,光源的中心波长为 1305 nm,最大光纤输出功率为 3 mW,波长的电流调制系数为 0.02 nm/mA. 隔离器的隔离度大于 40 dB. 光纤准直器是节距 0.25、直径 1.8 mm,数值孔径 0.46 的自聚焦透镜,它的输出光束直径为 0.2 mm. 光源波长的正弦调制频率是 5 kHz, PZT 调制电流的频率是 100 Hz. 被测物体放在微动平台上可以沿光轴方向移动,物体与准直器间的距离用光栅尺测量. 因为物体最大可测距离与激光器调制电流振幅成反比,因此在实验许可的条件下,调制电流的振幅要尽可能的小. 本实验中调制电流振幅为 0.3 mA,可测物体最大距离为 15 cm,远大于参考文献[6]中的 4.196 cm;干涉仪的最小可测距离由 PZT 引起的调制位移决定,约为 200 nm. 若进一步降低调制电流振幅,测量范围会进一步扩大. 在实验中暂时采用计算机实现神经网络应用,但因为建立的神经网络结构简单,运算量小,可以将训练后的网络参数固化到单片机中,与 SPC 一起实现实时测量.

3 结论

提出了一种基于神经网络的大量程全光纤距离

测量干涉仪. 利用 ANN 的自适应、自学习及联想记忆能力,建立高精度的干涉测量系统逆模型,从而实现物体距离的较大范围测量.

参考文献

- 1 Wang X Z, Sasaki O, Suzuki T, *et al.* Measurement of small vibration amplitudes of a rough surface by an interferometer with a self-pumped phase-conjugate mirror. *Appl Opt*, 2000, **39**(25): 4593~4597
- 2 Wang X F, Wang X Z, Lu H B, *et al.* Laser diode interferometer used for measuring displacements in large range with a nanometer accuracy. *Optics & Laser Technology*, 2001, **33**(4): 219~223
- 3 Sasaki O, Akiyama K, Suzuki T. Sinusoidal-wavelength-scanning interferometer with double feedback control for real-time distance measurement. *Appl Opt*, 2002, **41**(19): 3906~3910
- 4 Wang Xuefeng, Wang Xiangzhao, Liu Yingming, *et al.* A sinusoidal phase-modulating fiber-optic interferometer insensitive to the intensity change of the light source. *Optics & Laser Technology*, 2003, **35**(3): 219~222
- 5 Li Dailin, Wang Xiangzhao. Composite-light-source interferometer for real-time micro-vibration measurements, in: Proceedings of the 8th Optoelectronics and Communication Conference (COEE' 2003), Shanghai, 2003, 841~842
- 6 马军山, 杨永才, 杨锡富. 线性调频半导体激光器自混频干涉理论模型. *光子学报*, 2001, **31**(5): 553~556
Ma J S, Yang Y C, qiang X F. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **31**(5): 553~556

- 7 Chang Linwu , Chien Pieyau , Lee Chingting. Measurement of absolute displacement by a double-modulation technique based on a Michelson interferometer. *Appl Opt*, 1999, **38**(13):2843~2847
- 8 Norega R, Wang Hong. A direct adaptive neural network control for unknown nonlinear systems and its application. *IEEE Trans Neural Networks*, 1998, **19**(1):27~34

Fiber Optic Interferometer for Real-time Wide-range Distance Measurements with ANN

Li Dailin, Wang Xiangzhao, Liu Yingming

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

Received date:2004-03-25

Abstract A novel optic fiber interferometer for distance measurements over a wide measurement range using an artificial neural network is designed. The optical phase of the interferometer is simultaneously modulated with a frequency modulated laser diode and optical path-length difference. To enlarge the measurement range and eliminate the influence of the cross-sensitivity, the interferometer readings are used as input data and the actual sensed measuring value as desired output data during the training process of the network model. The principle and signal processing system containing the ANN are described. The experimental results show the use of ANN could widen the measurement range and enhance the measurement accuracy.

Keywords Interferometer; ANN; Distance measurements



Li Dailin was born in 1973. He received his M. S. degree from Qufu Normal University in 2001 and received his Ph. D. degree from Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanic, The Chinese Academy of Sciences in 2004. His main research interests include the optical measuring system and optical information processing.