

文章编号 : 0258-7025(2001)03-0232-05

基于神经网络的调频连续波光纤传感器 扫描非线性复原技术

李 阳¹ 冯正和¹ 龚建敏² 肖艳红² 廖延彪²

(清华大学¹ 电子工程系微波与数字通信国家重点实验室,² 电子工程系光电子实验室 北京 100084)

摘要 分析了调频连续波光纤传感器中扫描非线性对距离测量的影响,并提出了一种复原技术。这种技术通过反向传播神经网络的学习来克服扫描非线性,可以在扫描源具有较强的非线性时获得对目标的精确估计。同时也研究了反向传播神经网络在线学习的问题,使这种方法可以适应环境的变化。

关键词 调频连续波光纤传感器,反向传播神经网络,非线性复原

中图分类号 TP 212.14 文献标识码 A

Nonlinear Recovering Technique Based on Neural Network for Frequency Modulated Continuous Wave Optical Fiber Sensors

LI Yang¹ FENG Zheng-he¹ GONG Jian-min² XIAO Yan-hong² LIAO Yan-biao²

(¹ State Key Lab on Microwave and Digital Communications, Department of Electronic Engineering,

² Optoelectronics Lab, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Frequency-scanning non-linearity influences range-detection accuracy of optical fiber sensors. In this paper, the influence is analyzed and a recovering technique is proposed. Non-linearity is recovered through the learning process of backpropagation neural network. Simulation results show that very accurate estimation is achieved even under severe non-linearity of the scanning source. The on-line learning of neural network is also investigated to make this method more practical.

Key words FMCW optical fiber sensor, BP neural network, nonlinear recovering

1 引 言

随着半导体激光调频连续波(FMCW)干涉仪的发展,为检测、分辨小的目标如光波导器件(optical channel waveguide device)和光集成电路(optical IC)的缺陷,扫描的波长范围变得越来越宽,已达到几十纳米^[1,2],而扫描非线性问题则日益严重^[1,3]。

扫描光源的非线性源于驱动电流的非线性和光源本身电流-波长关系不是理想线性,这种与时间相关的扫描非线性导致了频谱的偏移和扩散。Koichi Liyama 用 0.83 μm CSP(Chip Scale Package)的 LD 在以 50 Hz 扫频,扫频范围为 100 GHz 时观察到,由于非线性的影响,一个固定目标引起的干涉信号频率在一个波长扫描周期内由 14 kHz 变到 20 kHz,严重影响了目标距离的测量。在单目标时非线性使

测量结果出现偏差,在多目标时造成目标混叠。

当前克服非线性影响的方法有两类,一类是基于电流畸变的校正方法,通过调制电流预先的非线性使最终光源输出为线性,如 Koichi Liyama 等提出的电流畸变闭环锁相法^[1]。这类方法的成本高,实现难度大,且在非线性太强时锁不上。而且由于光源频率调整本质上是温度的调整,调整延迟时间较长,限制了光源扫描频率提高。另一类是参考技术,如 S. A. Egorov 等提出双 F-P 腔积分曲线法^[3]和参考臂抵消技术^[4],但它们都要求目标是没有干扰的单目标。当非线性较强时,结果对干扰敏感,测量精度不高。

如果能在避免硬件成本增加的情况下,通过数字信号处理的方法来校正这种非线性,并能适用于较强的非线性,将是一个非常有吸引力的解决途径。但对这种非线性调制的复原问题在数学上等价于对信号随机间隔采样的谱分析问题,现今还没有

有效的解决方法。本文提出通过 BP 神经网络的学习使系统克服光源调制的非线性。计算机仿真研究表明,这种方法具有非常好的性能。

2 扫描非线性对目标检测的影响

图 1 是我们采用的 FMCW 干涉仪的结构。由注入调制电流控制的可调谐激光器发出的光经三个耦合器后分为四束,其中两束直接到光电探测器 (PD) 用于监视在波长扫描时光源输出功率的时变特性,以便在信号处理时对这种强度调制进行补偿。另外两束中一束到一个参考目标,参考目标长度 L

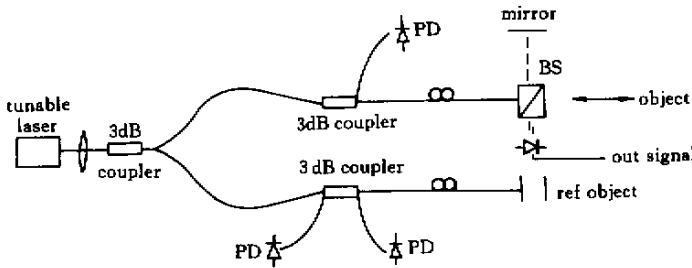


图 1 FMCW 干涉仪结构图

Fig.1 Configuration of a FMCW optical fiber sensor

系统在锯齿波调制下,当存在扫频非线性时,光源的发射信号在一个周期内瞬时频率可表示为:

$$f(t) = f_0 + kt + f_e(t) \quad (k = \frac{\Delta f}{T} = \frac{c\Delta\lambda}{n\lambda^2 T}, 0 \leq t \leq T)$$

这里 f_0 为调制最低频率, $f_e(t)$ 为频率失真, T 为调制周期。设存在 L 个目标,每个目标与镜面反射的距离为 r_i ,则经过功率补偿,干涉后的信号输出为:

$$K(t) = \sum_{i=1}^L a_i \cos\{2\pi[2knr_i/c + f_e(t) - f_e(t - \tau_i)]t + \phi_i\} + n(t) \quad (1)$$

其中 $n(t)$ 为噪声项, ϕ_i 为第 i 个目标引起的相位。设

目标反射延时为 $\tau_i = 2 \frac{nr_i}{c}$,将 $f_e(t)$ 以 T 为周期展

成傅氏级数: $f_e(t) = \sum_{k=0}^{\infty} F_k \sin(\frac{2k\pi}{T}t + \Phi_k)$,其中 F_k, Φ_k 为各次谐波幅度和相位。则

$$f_e(t) - f_e(t - \tau) = \sum_{k=0}^{\infty} F_k 2\cos[\frac{2k\pi}{T}(t - \frac{\tau}{2}) + \Phi_k] \cdot$$

$$\sin \frac{k\pi\tau}{T} \approx \tau \sum \frac{F_k 2k\pi}{T} \cos(\frac{2k\pi}{T}t + \Phi_k) = \tau f_e'(t)$$

这里用到了 $\frac{k\pi\tau}{T} \ll 1$ 的条件。这样目标项可简化为

$$K(t) = \sum_{i=1}^L a_i \cos\{4\pi nr_i/c [k + f_e'(t)]t + \phi_i\} + n(t) \quad (2)$$

已知,参考目标的干涉信号经 3 dB 耦合器后到 PD 变为电信号,它是用来进行光源校正和在线训练的;另一束经半透半反器 (BS) 后一路到目标,另一路到镜面,它们的反射光由于存在光程差而相干涉,再经一个 PD 转换为电信号。四个探测器的输出经放大滤波后到 A/D 进行数据采集送到 DSP 进行信号处理。单模光纤可以取很长,这样就可以实现远程测量,而通过对镜面反射器的距离调整则可获得不同的测量起始点。这种结构不但可以获得目标的绝对距离,消除光源小范围波动对测量的影响,而且适合后面进行信号处理时的在线训练。

可见产生的频率失真表现为调相信号形式,其频带宽度可由卡森公式表示, $B = 2 \left[\frac{k_{pm}}{\omega_{max}} \left| \frac{\tau df_e(t)}{dt} \right|_{max} + 1 \right] f_{e-max}$ 。这导致信号的谱不再是单根谱线,而是以 $2knr_i/c$ 为中心,以 $1/T$ 为间隔的分布宽度为 B 的谱。由于光纤干涉仪检测实际上是检测 (2) 中的频谱,因此当光源非线性增大时或目标距离变远时,将出现谱峰偏移,距离分辨率恶化。

从下面两个例子可以看出扫频非线性的影响。设信噪比为 30 dB, $T = 20$,扫频信号变化关系为:

$$f(t) = 0.05t + 3.75 \times 10^{-4}t^2 + 1.88 \times 10^{-5}t^3 \quad (0 \leq t \leq 20)$$

此时线性度为 2.8%。图 2 是在理想线性扫描下归一化频率(对扫描带宽归一化,即 $\frac{f-f_0}{kT}$) 0.2 的单目标,在非线性的扫描下谱分析的结果,可见非线性导致了目标谱峰的严重偏移和分裂。图 3 为在理想线性扫描下在 $f_0 = 0.156$ 和 $f_1 = 0.246$ 的两个目标,

在非线性的扫描下谱分析的结果。由雷达检测理论可知,检测的空间分辨率极限在 FFT 分析下为: $\delta x = \frac{c}{2nB}$ 。其中 c 为真空中光速, n 为折射率, B 为光源最大扫描频率范围。对这个例子为 0.05,两个目标应

当可以分辨。但扫频中非线性导致两个目标混叠为一个。由此可见,必须对扫频非线性引起的谱分析畸变进行复原。

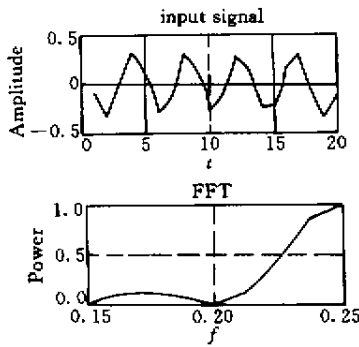


图 2 单目标结果

Fig.2 Resolution result of single object

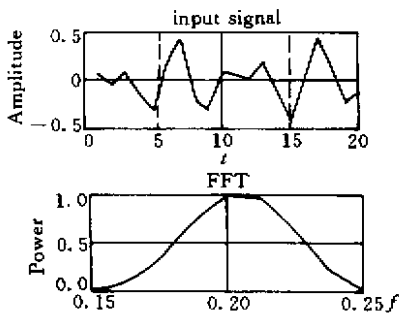


图 3 双目标结果

Fig.3 Resolution result of two object

3 BP 神经网络非线性复原技术

我们采用的基于反向传播(BP—Backpropagation)神经网络的信号处理流程如图 4 所示。

目标干涉信号在采样后首先经过 FFT 变换到频域,基于 FFT 分析结果做粗略的划分,对划分结果用数字滤波的方法进行分离后,送入不同的 BP 子网络。考虑到非线性会引起频谱的分裂与偏移,所以 BP 网络之间的频率范围设置了较大交叠。这样一个划分可能对应两个子网,最后目标属于哪一个将由 BP 分析结果决定。由于采用了子网划分,使每个 BP 子网络规模变小,训练时更易于收敛。BP 网络的输出与参考目标相比较后获得目标的绝对距离。

由于光源的扫频性能可能会随环境温度而变化,使系统性能恶化,我们采用参考校正技术和在线训练技术来解决这个问题。考虑到温度变化为慢变

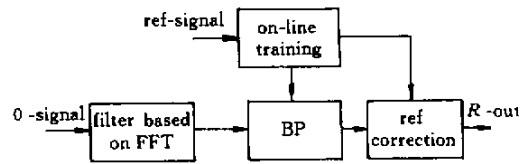


图 4 基于 BP 神经网络的信号处理流程图

Fig.4 Signal processing based on BP neural network

化,因此在较短的时间间隔内(如 4~5 s)可认为扫频特性波动很小,只引起 BP 网络的估计值的轻微偏移。根据(2)式,频谱位置与延迟 $2nr_i/c$ 有比例关系,将通过 BP 网络结果与参考目标结果相除可去除光源波动影响。同时每隔一定时间间隔(如 4~5 s)利用参考目标获得的信号对 BP 网络进行训练获得参数修正,对 BP 网络参数进行更新使它适应这种变化。

3.1 在线训练样本的获得

由于在线训练时一个参考目标仅有一个样本,如果只用它作为样本信号,会导致网络对参考目标距离敏感,而对其他距离的目标性能下降。在线训练需要可以全面反映各种目标信息的样本集。由(2)式可以看到在 r_f 处的单目标引起的干涉信号为 $I_f(t) = a_f \cos\{4\pi nr_f/d [k + f_e'(t)]t + \phi(r_f)\}$,由于 r_f 已知可以得到 $[k + f_e'(t)]t$ 。那么对于任意距离为 r_i 的目标可获得干涉样本信号为 $I_i(t) = a_i \cos\{4\pi nr_i/d [k + f_e'(t)]t + \phi(r_i)\}$ 。由(2)式可看出多目标是单目标的线性叠加,因此各种目标组合情况可方便地获得。这样就可通过一个参考干涉信号获得一个可全面反映各种目标组合的样本集。其基本原因是在一个目标内已完整地包含了非线性信息。

由于系统处于渐变中,新获得的样本集每次替换当前样本总数的 1/3 形成新的样本集。这使训练时有较好的初值,收敛速度加快。

3.2 在线学习算法

我们采用的 BP 神经网络为两层结构,隐层映射函数为 \tan ,输出层映射函数为 \log 。在进行神经

网络训练时,标准 BP 算法中容易出现陷入一个浅的局部极小点的情况,为改善 BP 的性能采用了惯性学习算法,即权值的调整不仅与梯度有关,而且附加上上一次权值的变化。这样相当于将误差曲面的变化趋势也考虑进去了,有利于网络从局部极小点中跳出来。学习步长采用自适应的步长调整策略,以加快网络的收敛。考虑到神经网络修正时的在线训练要求,采用下式进行权值调整: $\Delta w_{ij}^l(k) = (1 - m) \eta S_{ij}^l(k) + m \Delta w_{ij}^l(k - 1)$, 其中

$$m = \begin{cases} 0 & ER(k) > 1.04ER(k - 1) \\ 0.95 & ER(k) < ER(k - 1) \\ m & \text{其他} \end{cases}$$

$$t = \begin{cases} 0.7t & ER(k) > 1.04ER(k - 1) \\ 1.05t & ER(k) < ER(k - 1) \\ t & \text{其他} \end{cases}$$

这里 m 为惯性因子, t 为步长, ER 为网络误差函数, $\Delta w_{ij}^l(k)$ 为第 k 次迭代第 l 层第 i 个神经元和第 $l + 1$ 层第 j 个神经元互联权值变化量。

在训练时将已获得的样本集分为两部分,一部分用于训练,另一部分不参与训练仅用于监测训练误差作为推广能力判据,这样保证网络有较好的推广能力。

由于在学习过程中网络充分利用干涉信号的信息和系统特定的噪声信息,而不象传统的 FFT 分析,假设采样信号在采样带外为零,导致了信息丢失。因此它还可以获得超过 FFT 分辨极限的结果,且具有很强的抗噪声性能。同时这种训练的机制并不要求单模光纤。

4 仿真结果

构建的神经网络输入神经元为 20 个,隐层神经元数为 150。输出神经元为 2 个,训练样本为 320 个。通过 BP 非线性复原技术对图 2、图 3 的信号进行处理,结果如图 5(a)、(b) 所示。

可见 BP 方法获得了非常好的结果。图中的 MUSIC 是当前性能非常优越的信号处理算法,它也不能克服非线性扫频的影响。

BP 方法还具有低信噪比下工作和超分辨的性能。图 6 是信噪比为 15 dB, $f_0 = 0.206$ 和 $f_1 = 0.226$ 时的结果。此时频率间隔为 0.02,远小于 FFT 分辨极限 0.05,用 BP 方法仍获得了满意的结果。

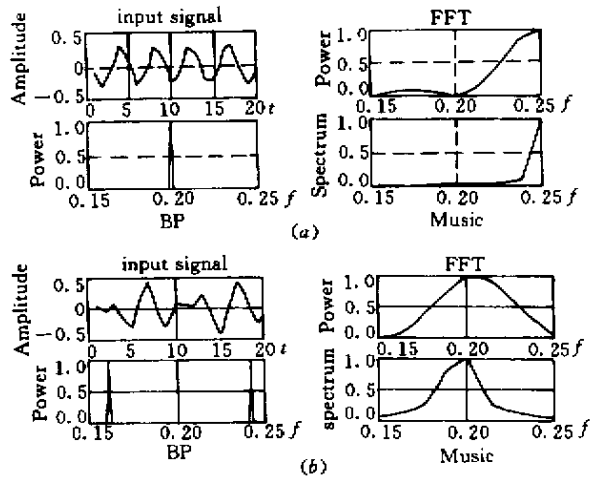


图 5 不同方法的分析结果

条件: (a) SNR = 30 dB, $f_0 = 0.2$;

(b) SNR = 30 dB, $f_0 = 0.156, f_1 = 0.246$

Fig. 5 Comparison results of different signal processing methods

Condition: (a) SNR = 30 dB, $f_0 = 0.2$;

(b) SNR = 30 dB, $f_0 = 0.156, f_1 = 0.246$

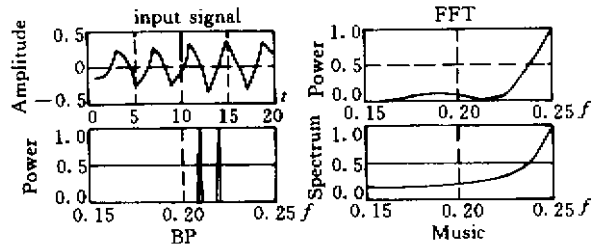


图 6 不同方法的分析结果

条件 SNR = 15 dB, $f_0 = 0.206, f_1 = 0.226$

Fig. 6 Comparison results of different signal processing methods

Condition: SNR = 15 dB, $f_0 = 0.206, f_1 = 0.226$

图 7 和图 8 是应用蒙特卡洛方法获得的 BP 法统计性能,分别为不同信噪比下估计方差曲线和在频率间距为 0.025(实线 1/2FFT 极限)和 0.01(虚线 1/5FFT 极限)的分辨概率曲线。从图 7 可以看到 BP 方法具有很高的估计精度。从图 8 可见在信噪比为 10 dB 以上时,对 1/2FFT 极限的信号可以有大于 80% 的分辨概率,说明了 BP 方法的超分辨性能。当频率间距进一步降低时由于信息的缺失,分辨概率下降。

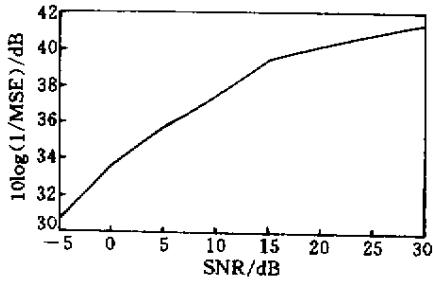


图 7 BP 方法的方差性能与信噪比的关系

Fig.7 Variance property versus SNR for BP method

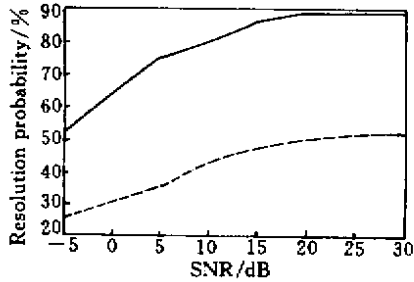


图 8 两种目标分布情况下, BP 分辨概率与信噪比的关系

Fig.8 Resolution probability versus SNR for two object-distribution conditions

5 结 论

本文分析了光纤波长扫描干涉仪非线性扫频的影响,并提出了用基于 BP 神经网络的方法来克服光源非线性引起的谱峰偏移、混叠等问题,并给出了简单的在线训练结构与方法。这种方法虽然增加了系统信号处理的工作量,但可在低信噪比时工作,可以克服扫频非线性,且具有很强的分辨能力。这对于大扫频带宽的干涉仪应用是很有实用价值的。

参 考 文 献

- 1 Koichi Iiyama, Lu-tang Wang, Ken-ichi Hayashi. Linearizing optical frequency-sweep of a laser diode for FMCW reflectometry. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(2):173~178
- 2 Keigo Lizuka, Satoshi Fujii. Neural-network laser radar. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(13):2492~2501
- 3 S. A. Egorov, L. G. Likhachiev, A. N. Mamaev *et al.*. Signal recovering in fiber optic sensors based on nonlinear FMCW technique. *Opt. Comm.*, 1994, **111**(5/6):438~444
- 4 Xiaoming Sun. Theory and Application of Interferometry using Laser Diode. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 15~102 (in Chinese)
- 5 Dexiu Huang, Xuefeng Liu. Semiconductor Laser and Their Applications. Beijing: National Defence Industry Press, 1999. 67~112 (in Chinese)