

文章编号: 0253-2239(2006)05-0819-5

基于经典小波变换的布里渊光时域反射计 光信号处理*

宋牟平 马志刚

(浙江大学 信息与电子工程学系, 杭州 310027)

摘要: 布里渊光时域反射计结构的布里渊散射分布式光纤传感器检测的是自发散射光, 信号非常微弱, 而且频带在几十兆赫兹以上, 难以应用普通相干解调方法。针对传感散射光信号特点, 提出基于经典(Morlet)小波变换的光相干检测方法。首先采用微波电光调制产生频移参考光和自发布里渊散射光进行相干检测, 再应用经典小波变换进行散射光信号的幅度解调, 得到信噪比改善的布里渊散射传感光信号。给出了数值模拟和实验数据处理结果, 表明经典小波变换能较好地处理布里渊光时域反射计检测信号。并和基于希尔伯特(Hilbert)变换的传感信号处理方法进行了对比, 发现此方法优于基于希尔伯特变换的信号处理。

关键词: 光信号处理; 分布式光纤传感器; 布里渊散射; 经典小波变换; 相干检测

中图分类号: TN247 文献标识码: A

Optical Signal Processing in Brillouin Optical Time Domain Reflector Based Morlet Wavelet Transform

Song Muping Ma Zhigang

(Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: It is spontaneous scattering light that the optical time domain reflector (OTDR) based on Brillouin scattering distributed optical fiber sensor detects, which is very weak, and has a frequency width of several decades megahertz, so it is difficult to perform traditional coherent demodulation. A novel optical coherent detection based on Morlet wavelet transform is presented according to the signal's characteristic. Firstly, the spontaneous Brillouin back-scattering light is coherently detected with the frequency-shifted light modulated by a microwave electric optical modulator as the reference light. Secondly, the detected photocurrent signal is processed with amplitude demodulation by Morlet wavelet transform. Finally, the distributed sensing signal with improved signal-noise ratio is gained. The simulation and experimental results of the detection method are given, and the proposed method can process the Brillouin optical time domain reflector signal quite well. The methods based on Morlet wavelet transform and Hilbert transform respectively are compared, and it is found that the former is better for Brillouin optical time domain reflector.

Key words: optical signal processing; distributed optical fiber sensor; Brillouin scattering; Morlet wavelet transform; coherent detection

1 引 言

分布式光纤传感器(Distributed optical-fiber sensor, DOFS)可对被测量场的连续空间进行传感, 已成为光纤传感器中引人注目的一项技术。布里渊(Brillouin)散射分布式光纤传感器^[1~3]是各种分布

式光纤传感器中最具实际应用价值的长距离(大于 20 km)分布式传感器。其结构有布里渊光时域反射计(BOTDR)^[1,4]和布里渊光时域分析(BOTDA)^[2,5], 布里渊光时域反射计结构只需在光纤的一端进行激光入纤和光信号处理, 应用范围广。

* 国家自然科学基金(60507002)资助课题。

作者简介: 宋牟平(1971—), 男, 浙江临海人, 副教授, 博士, 主要从事光纤传感和微波光子学方面的研究。

E-mail: songmp@zju.edu.cn

收稿日期: 2006-07-03; 收到修改稿日期: 2006-09-25

但布里渊光时域反射计接收的是自发散射光,功率较弱,需要合适的检测方法。光相干检测^[1,4]是一较好的技术,由于自发布里渊散射光具有几十兆带宽的洛伦兹频谱是带通的幅度调制信号,并包含有大量噪声,难以应用直接检测进行解调。针对散射光信号特点,在以前的研究中^[4~7]已提出基于希尔伯特变换的检测信号处理方法,并得到了较直接检测有更好的信噪比^[6]。本文提出基于经典(Morlet)小波变换的数字信号处理技术(DSP)来处理布里渊光时域反射计的检测信号。

2 原 理

2.1 传感机理和实验系统

光纤的布里渊频移取决于应力和温度^[3],光相干检测布里渊光时域反射计通过检测传感光纤各处的布里渊频移,可得沿光纤一维分布的应力或温度传感信息。图1为采用布里渊光时域反射计结构的布里渊散射分布式光纤传感器系统原理图。1.55 μm 分布式反馈激光器(DFBLD)为光源,经耦合器分为两路光。一路光作为激励光,被调制成光脉冲,由掺铒光纤放大器(EDFA)放大、耦合器注入 25 km 普通单模光纤(脉冲宽度为 50 ns,峰值功率为 22 dBm);另一路光作为参考光,由微波电光调制器调制成频移光(频移量可调以实现完整布里渊频谱的检测)^[4]。激励光在传感光纤中产生后向自发布里渊散射光,与频移参考光进行相干检测得到原始光电信号,经混频滤波后再采用经典小波变换处理此检测光信号,得到信噪比改善的检测信号。

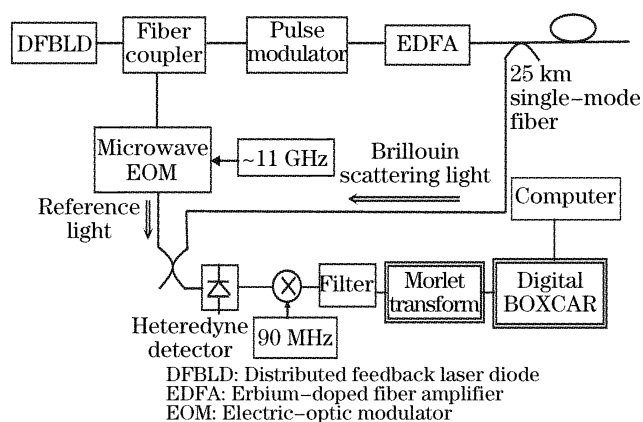


图1 采用经典变换的光相干检测布里渊光时域反射计实验系统

Fig.1 Experimental arrangements of coherent detecting Brillouin optical time domain reflector with Morlet wavelet transform

如图2所示,自发布里渊散射光和本地频移参

考光进行光相干检测,产生的原始光电信号是一带通的幅度调制信号(每一点的幅度对应于传感光纤上某一处的散射光强)。由于自发布里渊散射光信号具有几十兆带宽,包含有大量噪声,如对这样的信号进行直接的相乘解调,会把相位噪声直接转变为检测信号,甚至使得解调失效^[6]。这里采用经典小波变换来处理检测光信号。

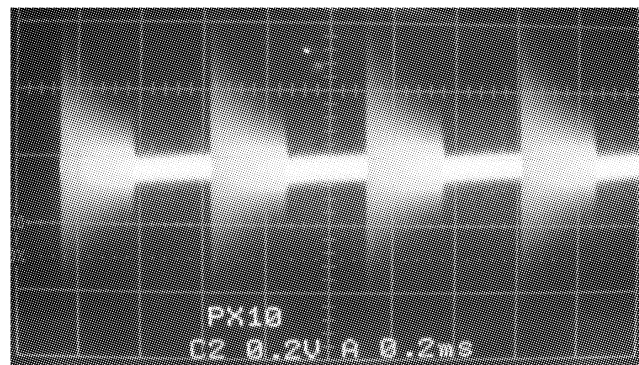


图2 光相干检测产生的光电信号原始波形(4周期)
Fig.2 Original wave form of detecting photoelectric signal produced by coherent detection (4 periods)

2.2 经典小波变换处理检测光信号

信号 $x(t)$ 的小波变换可表示为^[8]

$$WT_x(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \psi\left(\frac{t-a}{b}\right) dt \equiv \int x(t) \psi_{a,b}(t) dt, \quad (1)$$

$WT_x(a,b)$ 为 a 和 b 的函数, b 为时移, a 为尺度因子。 $\psi(t)$ 称为基本小波,或母小波。 $\psi_{a,b}(t)$ 为母小波经移位和伸缩所产生的一族函数,称为小波基函数。

经典小波^[8,9]变换中的母小波(或基本小波)定义为

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \exp(j\omega_0 t), \quad (2)$$

由(2)式可见,经典小波是高斯包络下的复指数函数,其虚部和实部的相位差为 $\pi/2$ 。

从信号处理的角度来看,小波变换其实是一个带通滤波器^[8]。经典小波是一个复数小波,其对应的变换是一个复数滤波器,实部 $\text{Re}[\psi(t)]$ 等价于一个零相移滤波器函数,虚部 $\text{Im}[\psi(t)]$ 等价于一个 $\pi/2$ 相移滤波器函数^[8,9]。设 $w_t(x,t)$ 为信号 $x(t)$ 经过小波变换后变换得到的结果,则用经典小波进行变换后,其实部 $\text{Re}[w_t(x,t)]$ 和 $\text{Im}[w_t(x,t)]$ 虚部的相位差为 $\pi/2$ ^[9]。因此可以提取出信号的幅值(或包络)分量 $u(x,t)$,包络分量表示如下:

$$u(x,t) = \sqrt{\text{Re}^2[w_t(x,t)] + \text{Im}^2[w_t(x,t)]}, \quad (3)$$

利用经典小波变换处理布里渊光时域反射计信号的具体实现过程如图 3 所示,检测信号先进行经典小波变换,从中取得信号的幅度包络信息,再进行采样叠加平均器(BOXCAR)的叠加,最后输出信噪比改善的信号包络,其随时间变化波形对应于传感光纤各点的散射光幅度。

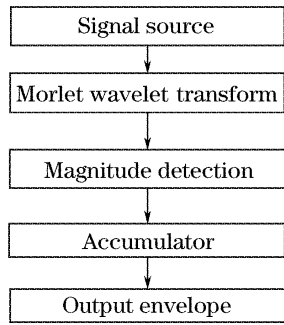


图 3 基于经典小波变换信号处理系统框图

Fig. 3 Block diagram of signal processing system based on Morlet wavelet transform

图 4 是实现经典小波变换和包络检波的原理图,检测信号先进行快速傅里叶变换得到频域信号,然后在不同尺度 a 下乘以经典小波的频域函数,再进行傅里叶反变换得到小波变换后的时域函数,最后提取不同尺度 a 下的包络分量,并进行重组得到最终的信号包络。

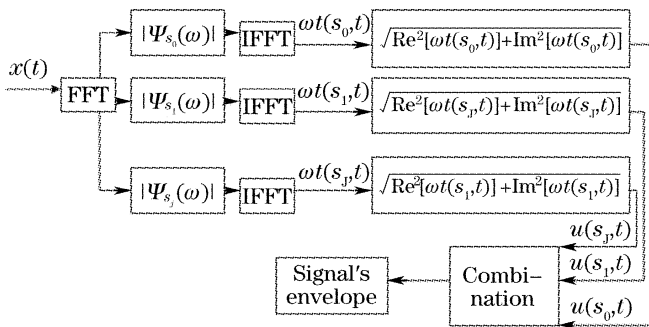


图 4 经典小波变换信号处理的原理图

Fig. 4 Signal processing by Morlet wavelet transform
FFT: Fast Fourier transform

3 模拟仿真分析

按上述原理和处理系统,对基于经典小波变换的布里渊光时域反射计信号处理进行了数值模拟。图 5 是经过基于经典小波变换处理后的信号仿真结果,由左至右,由上至下依次表示:图 5(a)为需要处理的仿真信号源,即模拟的包含有大量噪声的幅度调制的布里渊散射信号;图 5(b)为理想的信号包络,处理得到的结果越接近此信号,说明方法越好;图 5(c)为经过一次处理后的结果,由图可见,在处理一次的时候,信号受噪声干扰比较大,失真明显;

图 5(d)为经过 1000 次处理,再经 BOXCAR 累加平均得到的仿真结果,非常接近理想的信号包络。可见基于经典小波变换的信号处理可实现布里渊光时域反射计信号的幅度解调。

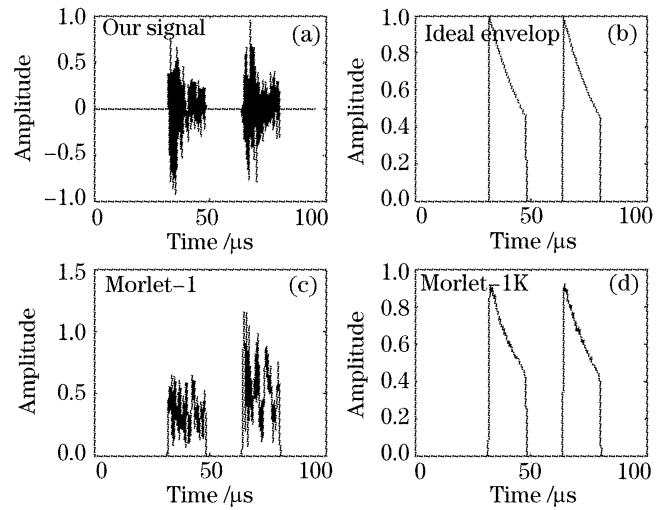


图 5 基于经典小波变换的信号处理仿真结果

Fig. 5 Results of signal processing simulation based on Morlet wavelet transform

为说明所采用的经典小波变换信号处理具有较好的性能,以下对其与以前研究采用的希尔伯特变换信号处理方法^[6]进行比较。首先对完整模拟信号的处理情况进行对比,如图 6 所示(都采用叠加 1000 次后的处理结果)。由图 6 可以看出,基于经典小波变换处理后的信号幅度要比基于希尔伯特变换处理后的信号幅度大 20%左右,并且噪声也有所降低,从而使信噪比更好。这有利于对布里渊散射光信号频谱的判断,从而有利于提高传感器的检测精度^[6]。

在分布式光纤传感器中,常遇到温度或应变的突变,其对应于对传感光信号突然变化的检测。因此再

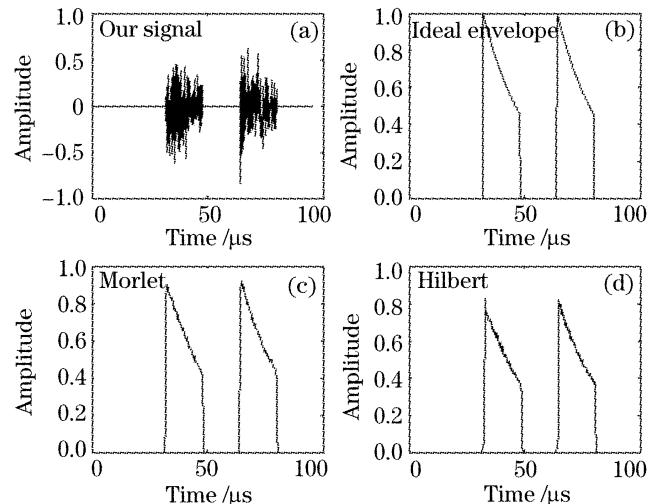


图 6 经典与希尔伯特处理结果的对比

Fig. 6 Comparison between the results by Morlet and by Hilebert methods

对比两种方法对信号上升沿的处理结果,如图 7 所示,将两种方法处理后得到的信号的上升沿放大,可看出,由经典变换处理后的信号在上升沿的斜率非常大,是比较理想的效果。而希尔伯特变换处理后的信号在上升沿处变化缓慢,信号失真较大。

因此对于布里渊光时域反射计传感系统,经典小波变换是一种较好的信号处理方法,可提高检测信号的信噪比和减少波形失真。

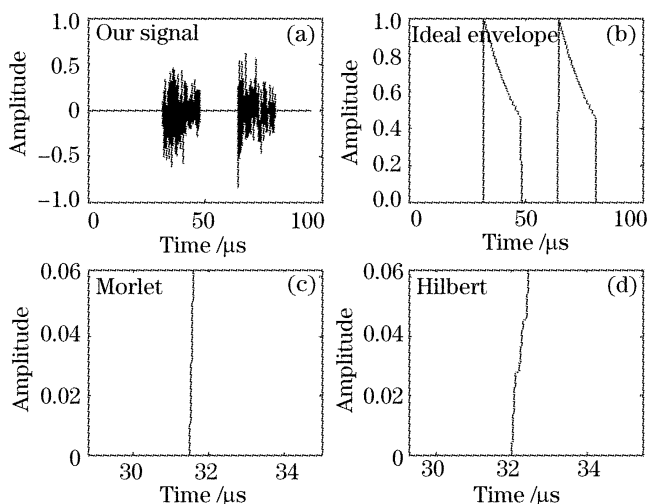


图 7 经典与希尔伯特仿真上升沿对比

Fig. 7 Comparison on ascending edge between Morlet and Hilbert methods

4 实 验

采用图 1 的布里渊光时域反射计实验系统^[4],采集了 32 组光相干检测布里渊光时域反射计的光电检测信号,再应用图 2 和图 3 的经典小波变换进行信号处理,得到如图 8 所示的散射光信号的幅度波形。图中信号仍然包含有一定的噪声,这是 BOXCAR 叠加次数较少和相干检测的偏振相关性引起的^[7]。对同样的检测信号,图 9 给出了希尔伯特变换的处理结果。

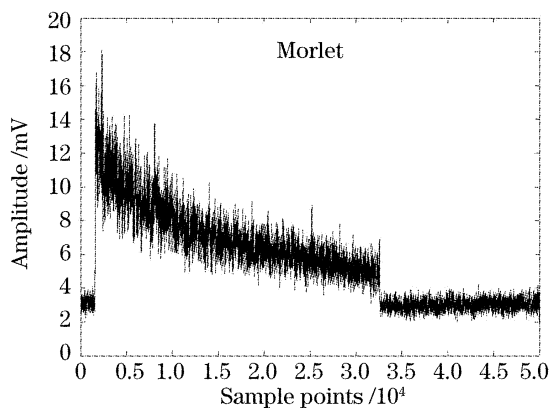


图 8 利用经典小波变换对实际信号的处理结果

Fig. 8 Signal processed with Morlet wavelet transform

对比图 8 和图 9 可以看出,利用经典小波变换对布里渊光时域反射计信号进行处理,可以得到比较理想的包络信号,和基于希尔伯特变换处理的结果比较起来,前者无论是在信号幅度方面,还是在噪声抑制方面,都具有更好的性能,即处理所得信号具有更高的信噪比。较高的信噪比意味着更有利于对传感信息的检测。

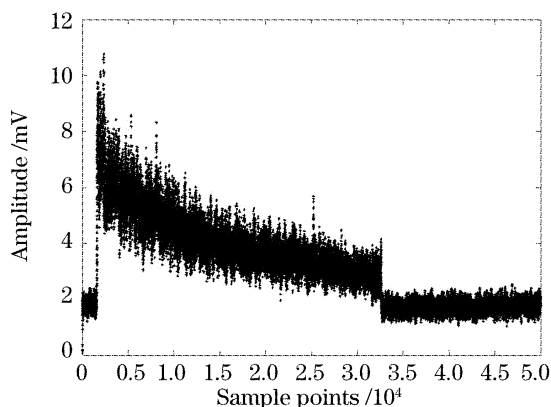


图 9 基于希尔伯特变换处理实际信号的结果

Fig. 9 Signal processed with Hilbert transform

5 结 论

本文针对相干检测布里渊光时域反射计中自发布里渊散射光信号的特点,采用经典小波变换来处理布里渊散射光信号,处理后的信号信噪比得到明显的提高,这有利于对布里渊散射光信号的检测和传感信息的提取。并和基于希尔伯特变换的处理方法进行了比较,得出经典小波变换处理具有更好的信噪比和较少的信号失真。

参 考 文 献

- 1 T. Kurashima, M. Tateda, T. Horiguchi *et al.*. Performance improvement of a combined OTDR for distributed strain and loss measurement by randomizing the reference light polarization state [J]. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1997, **9**(3): 360~362
- 2 X. Bao, J. Dhliwayo, N. Heron *et al.*. Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7): 1340~1348
- 3 H. Naruse, M. Tateda, H. Ohno *et al.*. Linear strain distribution dependence of the Brillouin gain spectrum [C]. *Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, OFS 2002*, 2002, **1**: 309~312
- 4 Song Muping. The technique of Brillouin scattering distributed optical fiber sensing based on microwave electric optical modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1111~1114 (in Chinese)
宋牟平. 微波电光调制的布里渊散射分布式光纤传感技术[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1111~1114
- 5 Song Muping, Zhao Bin, Zhang Xianmin. Brillouin optical time domain analysis distributed optic-fiber sensor based on microwave electrooptical modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8):

