

文章编号: 0253-2239(2009)10-2818-04

基于实时小波变换信号处理的相干检测 布里渊光时域反射计

宋牟平 陈翔

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要 布里渊光时域反射计检测信号较微弱的自发布里渊散射光,其布里渊频移只有 11 GHz 左右。相干检测是一较好的方法,但其接收信号是一宽带的幅度调制信号,难以直接解调。采用实时小波变换对传感信号进行处理,设计了布里渊光时域反射计传感器实验系统,实现了 25 km 的分布式温度传感,在 5 m 的空间分辨率和 1 min 的响应时间下,达到 $40 \mu\epsilon$ 的应变分辨率。

关键词 分布式光纤传感器;布里渊光时域反射计;小波变换;实时;相干检测

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092910.2818

Real-time Wavelet Transform Based Coherent detecting Brillouin Optical Time Domain Reflectometer

Song Muping Chen Xiang

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

Abstract In Brillouin optical time domain reflectometer, the detected spontaneous Brillouin scattering light is very weak, and the Brillouin frequency shift is only about 11 GHz. The coherent detect is a good method, but the detected signal is a wideband amplitude-modulated signal, which is hard to demodulate. The real-time Morlet wavelet transform is adopted to overcome this problem. The experimental procedures and results are presented in the text. A laboratorial system of 25 km distributed Brillouin optical time domain refractor is achieved, with the stress resolution of $40 \mu\epsilon$, the spatial resolution of 5m and the system response time of 1 minute.

Key words distributed optic-fiber sensor; Brillouin optical time domain reflectometer; wavelet transform; real-time; coherent detect

1 引 言

分布式光纤传感器(DOFS)^[1~3]可以沿光纤同时得到被测量场在时间和空间上的连续分布信息。其中布里渊(Brillouin)散射 DOFS^[2~7]分析从传感光纤的布里渊散射光的频移或强度,得到沿光纤分布的温度和应变。长距离布里渊散射 DOFS 主要有布里渊光时域分析(BOTDA)^[2]和布里渊光时域反射计(BOTDR)^[3]两种结构。BOTDR 结构的布里渊散射 DOFS 只对一端传感光纤进行光信号处理,但 BOTDR 接收的是自发光布里渊散射光,光功

率较弱,且布里渊频移只有 11 GHz 左右。光相干检测是一较好的解决方法,但光相干检测 BOTDR^[4]接收的是带宽为几十兆赫兹的幅度调制信号,难以直接解调得到散射光幅度信息,需要合适的光信号处理。

在以前工作中已实现基于实时希尔伯特(Hilbert)变换的相干检测布里渊光时域反射计^[5]。但考虑到 Hilbert 变换的窄带特性,会产生信号的畸变,于是提出了采用小波变换^[6]来改善传感信号的处理,但由于小波变换的复杂性,未能实现实时信

收稿日期: 2008-10-12; 收到修改稿日期: 2008-11-30

基金项目: 国家自然科学基金(60507002)资助课题。

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

E-mail: songmp@zju.edu.cn

号处理。本文实现了基于莫莱特(Morlet)小波变换的实时传感信号处理,完成了 25 km 的布里渊光时域反射计分布式光纤传感器。在 5 m 的空间分辨率和 1 min 的响应时间下,达到 $40 \mu\epsilon$ 的应变分辨率。并实验验证了对于 BOTDR 实时小波变换具有比 Hilbert 变换更好的性能。

2 传感原理和系统

图 1 是 BOTDR 结构布里渊散射 DOFS 的系统原理图^[4]。1.55 μm 分布反馈(DFB)激光器为光源,经耦合器分为两路光。一路光作为激励光,被调制成光脉冲(脉冲宽度为 50 ns),经掺铒光纤放大器(EDFA)放大,由耦合器注入 25 km 普通单模光纤;另一路光是参考光,由微波电光调制器调制成频移光(频移可调以实现完整布里渊频谱的检测)^[4],并进行偏振控制^[7]。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,经混频滤波后采用基于 Morlet 小波变换的数字信号处理(DSP),再由数字 BOXCAR 进行累加平均,得到信噪比改善的检测信号,最后由计算机处理、显示,得到分布式光纤传感信息。

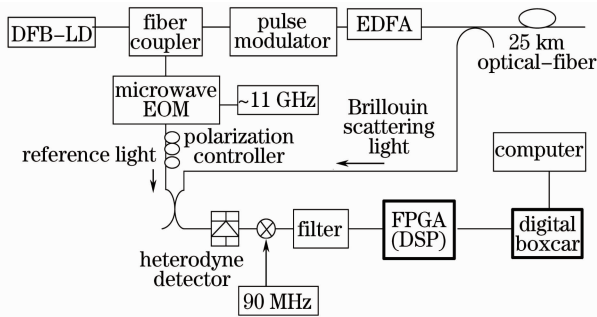


图 1 数字信号处理的光相干检测 BOTDR 实验系统
Fig. 1 Experimental arrangements of coherent detecting BOTDR with digital signal processing

图 1 中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),如图 2 所示。由于自发布里渊散射光信号具有几十兆带宽,并包含有大量噪声,如对该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。这里采用实时 Morlet 小波变换^[6]来处理检测光信号。

Morlet 小波^[6]是一个复数小波,其对应的变换是一个复数滤波器。设 $w_t(x, t)$ 为信号 $x(t)$ 经过 Morlet 小波变换后变换得到的结果,则其实部 $\text{Re}[w_t(x, t)]$ 和虚部系数 $\text{Im}[w_t(x, t)]$ 的相位差为

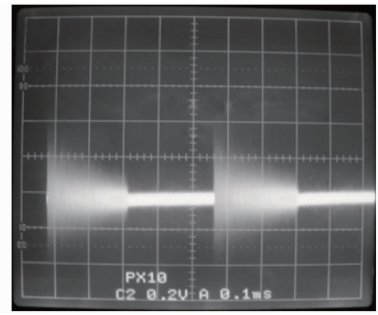


图 2 光相干检测产生的光电信号原始波形(2 周期)
Fig. 2 Original wave of heterodyne detecting photoelectric signal (2 periods)

$$u(x, t) = \sqrt{\text{Re}[w_t(x, t)]^2 + \text{Im}[w_t(x, t)]^2}, \quad (1)$$

因此,可利用 Morlet 小波变换处理 BOTDR 信号,从中取得信号的幅度(包络)信息,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 是实现 Morlet 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(FFT)得到频域信号,然后在不同尺度下乘以 Morlet 小波的频域函数,再进行快速逆傅里叶变换(IFFT)得到小波变换后的时域函数,最后提取不同尺度(s_j)下的包络分量,并进行重组得到最终的信号包络。尺度的定义为

$$s_j = s_0 2^{j-1} \quad j = 1, 2, \dots, J. \quad (2)$$

式中 s_0 为最小尺度, a 用来设定尺度间距(0.314),且 $s_0 = 2dt$, 其中 dt 是信号的采样间隔(12.5 ns, 这里采用的 80 MHz 采样速率)。 s_j 是最大尺度,此最大尺度不能超过信号长度的一半。考虑到硬件芯片的速度要求,这里应用 4 点一组的快速逆傅里叶变换,并只采用两个尺度(s_0 和 s_1)的小波变换,如图 3 所示。

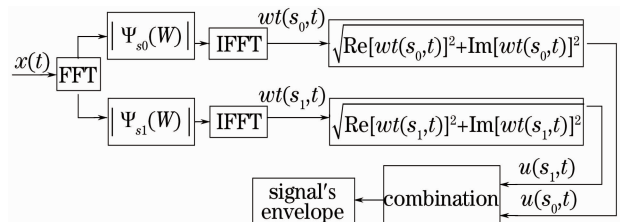


图 3 Morlet 小波变换信号处理的原理图
Fig. 3 Processing of Morlet Wavelet transform

把以上的小波变换转换成图 1 中的现场可编程逻辑(FPGA)集成电路的 DSP 代码,即可完成对传感信号的实时处理。对图 2 所示的信号进行 DSP 处理,并累加平均 8000 次,得到了如图 4 所示的

25 km 散射光信号幅度曲线,这是一典型的指数衰减分布式光纤传感信号曲线。

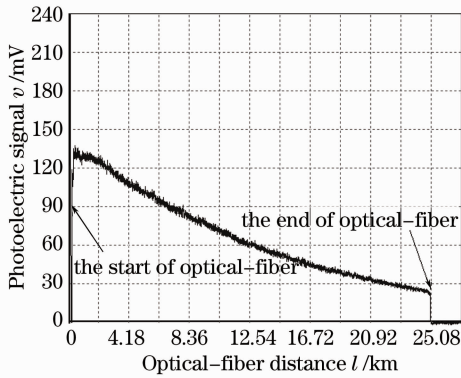


图 4 经过 Morlet 小波变换和平均累加处理的图 2 所示的布里渊散射光电检测信号

Fig. 4 Brillouin scattering signal of Fig. 2 processed by Morlet wavelet transform and BOXCAR

3 实验结果

首先进行查看 Morlet 小波变换对 BOTDR 分布式光纤传感信号的作用,固定图 1 中的参考光频率,分别在不采用 DSP,应用 Hilbert,和采用 Morlet 小波变换等 3 种情况下,得到如图 5 所示的布里渊散射光信号幅度曲线。

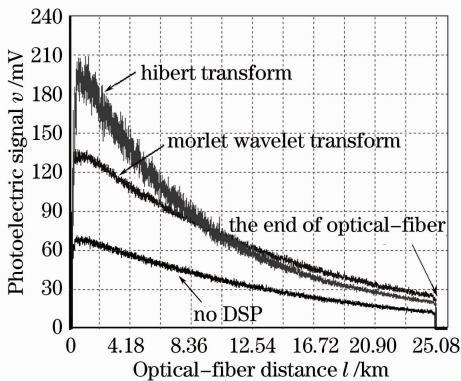


图 5 比较没有 DSP 处理, Hilbert 变换, 和经过 Morlet 小波变换处理的布里渊散射光电检测信号

Fig. 5 Comparison of the Brillouin scattering signals processed by no DSP, Hilbert, and Morlet wavelet transform, respectively

由图 5 可看出,不应用 DSP 处理时,检测信号最小。应用 Hilbert 变换可以使检测信号幅度变大,但由于 Hilbert 变换进行幅度解调的窄带特性,使得其处理宽带的布里渊散射信号时产生‘畸变’:光纤开始端的信号是没有 DSP 的 2 倍多,但光纤尾端的信号只是没有 DSP 的 1 倍多;另外,在光纤的前半部分,‘起伏’明显增加了。而 Morlet 小波变换

处理后的信号,在整段传感光纤中,都是没有 DSP 处理的 2 倍左右,而且噪声没有明显的增加。因此, Morlet 小波变换对传感信号的处理的结果较好,其信噪比约为 DSP 处理前的 2 倍。对于分布式光纤传感器,好的检测信噪比意味着高的分辨率,或较短的系统响应时间。

下面应用 Morlet 小波变换对完整布里渊散射信号进行处理。通过电光调制^[4]改变图 1 所示的 BOTDR 分布式光纤传感器的参考光频率,可得到传感光纤各处的布里渊散射光谱,如图 6 所示。这是由不同频移下的一组散射光信号幅度曲线组成,从中可得到布里渊散射光的中心频移,即布里渊频移,再由布里渊频移可计算得到传感器的被测量^[4]。

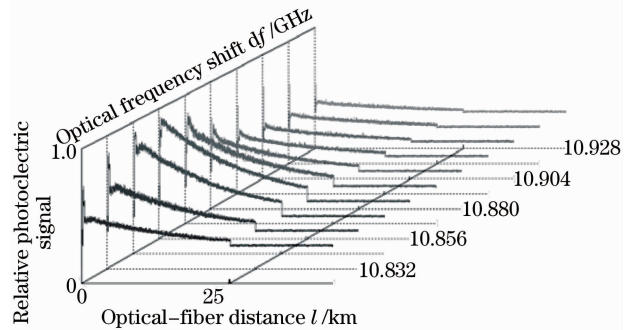


图 6 传感光纤各处的布里渊散射光谱

Fig. 6 ‘Panorama’ of Brillouin scattering signal

采用图 7 的 BOTDR 应力测试系统,把 25 km 光纤在接近尾部的一段 5 m 光纤段绕在两个滑轮之间,并进行拉伸,产生所需的应变。实验中累加平均次数为 8000 次,系统在 1 min 内完成一次完整的测试。图 8(a)是采用实时 Morlet 小波变换得到的应变曲线,图中的小图显示的是光纤末端附近的测试应变。为了比较,我们给出了在同样情况下,经过 Hilbert 变换处理得到的应变曲线,如图 8(b)所示。从图 8 可看出, Morlet 小波变换可得到比 Hilbert 变换更好的分辨率。这是由于前述的 Hilbert 变换处理‘宽带’信号引起的‘畸变’。因此,实时 Morlet 小波变换更有利于提高 BOTDR 分布式光纤传感器

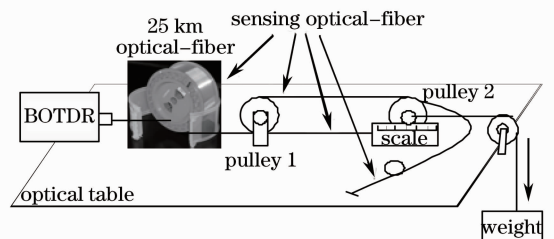


图 7 BOTDR 的应力测试实验系统

Fig. 7 Stress experimental system for BOTDR

的性能。

从图 8(a)可看出 5 m 光纤段的应变为 $410 \mu\epsilon$, 其余光纤为 0, 这和由拉伸刻度读出的实际应变 ($400 \mu\epsilon$) 相符合。图 8 的测试应变曲线在整体上有小起伏, 特别在光纤的开始段有明显的起伏, 这是由于光纤盘绕产生的固有应力引起的。图 8(a) 中曲线的“本底噪声”(取决于传感光纤的固有布里渊频

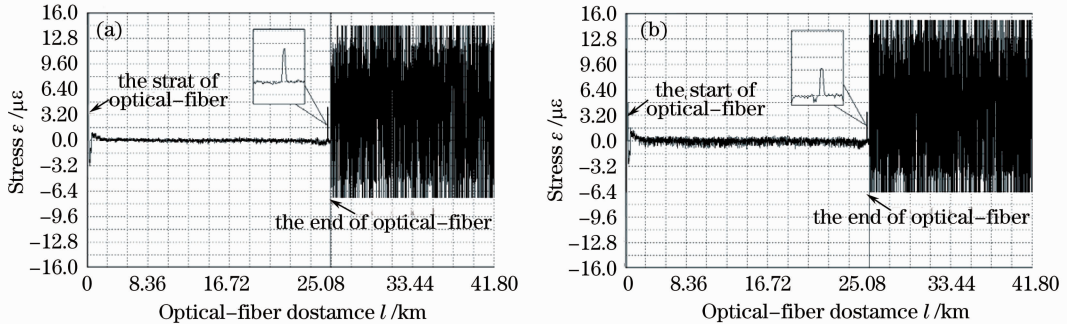


图 8 通过分析布里渊信号得到的应变曲线。(a)采用 Morlet 小波变换; (b)采用 Hilbert 变换

Fig. 8 Stress curve after analyzing the Brillouin signal. (a) using Morlet wavelet transform; (b) using Hilbert transform

4 结 论

对于相干检测布里渊光时域反射计, 采用实时 Morlet 小波变换对自发布里渊散射信号进行处理, 构成了 25 km 布里渊光分布式光纤传感器。实验结果表明, 对于布里渊光时域反射计的信号处理, 实时 Morlet 小波变换具有比 Hilbert 变换更好的性能。实验系统达到 5 m 空间分辨率、 $40 \mu\epsilon$ 应变分辨率和 1 min 系统响应时间。如采用高速偏振控制器和更长的累加时间, 可实现更好的性能指标。

参 考 文 献

- 1 Wang Wei, Zhou Bangquan, Zhang Zaixuan *et al.*. Temperature measurement accuracy of the distributed optical fiber raman photons temperature sensor system [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(1): 100~105
王 玮, 周邦全, 张在宜 等. 分布型光纤拉曼光子温度传感器系统的测温精度[J]. *光学学报*, 1999, **19**(1): 100~105
- 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 T. Kurashima, M. Tateda, T. Horiguchi *et al.*. Performance improvement of a combined OTDR for distributed strain and loss

移起伏、偏振干扰和系统噪声等, 难以用具体公式表示)决定了应变分辨率约为 $40 \mu\epsilon$ 。可采用以下措施来改进: 选用物理参数均匀的光纤来减少固有布里渊频移起伏; 采用更高速偏振控制器来减少偏振相关性干扰^[7]; 增加累加平均次数可改善信噪比和测量精度, 但会增加累加处理时间使传感器丧失实用性。

- measurement by randomizing the reference light polarization state [J]. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1997, **9**(3): 360~362
- 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
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. Study on the technique of brillouin scattering distributed optical fiber sensing based on hilbert transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1053~1056
宋牟平, 赵 斌. 希尔伯特变换处理的布里渊散射 DOFS 的研究 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(9): 1328~1331
- 6 Song Muping, Ma Zhigang. Optical signal processing in brillouin optical time domain reflector based morlet wavelet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 819~823
宋牟平, 马志刚. 基于经典小波变换的布里渊光时域反射计光信号处理[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 819~823
- 7 Liu Diren, Song Muping, Zhang Xianmin *et al.*. Polarization-induced fading eliminated technique for coherent detection of brillouin scattering spectrum [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1191~1194
刘迪仁, 宋牟平, 章献民 等. 布里渊散射谱相干检测的消偏振衰落技术[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1191~1194
- 8 He Lingsong, Li Weihua. Morlet wavelet and its application in Enveloping [J]. *J. Vibration Engineering China*, 2002, **15**(1): 119~122
何岭松, 李巍华. 用 Morlet 小波进行包络检波分析[J]. *振动工程学报*, 2002, **15**(1): 119~122