

希尔伯特变换处理的布里渊散射 DOFS 的研究*

宋牟平 赵 斌

(浙江大学 信息与电子工程学系, 杭州 310027)

摘 要 光时域反射结构的布里渊散射分布式光纤传感器所检测的自发布里渊散射光信号非常微弱,且频带宽度在几十兆赫以上,难以应用普通相干解调方法.提出了基于希尔伯特变换的光相干检测方法,具体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得到光电信号,再应用基于希尔伯特变换的数字信号处理技术对光电信号进行幅度解调,得到了信噪比改善的布里渊散射光谱,从而有利于提高传感器的检测性能.

关键词 光纤传感器;布里渊散射;希尔伯特变换;相干检测

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

0 引言

分布式光纤传感器(DOFS)是光纤传感中引人注目的一项技术^[1,2].其中布里渊散射 DOFS 是目前长距离 DOFS 中最具实际应用前景的一种.长距离布里渊散射 DOFS 有两种结构:布里渊时域分析 BOTDA 和布里渊时域反射 BOTDR^[3~10],BOTDR 结构布里渊散射 DOFS 接收的是自发非线性散射光,功率较弱,需要合适的检测方法.光相干检测方法^[9,10]是一较好的检测方法,激励光入射到传感光纤中,产生的散射光(包括布里渊散射光和瑞利散射光)和参考光一起进行相干检测.由于布里渊散射光和瑞利散射光之间存在布里渊频移,通过电路处理可取出布里渊散射光产生的光电信号.由于自发布里渊散射光信号具有几十兆带宽的洛伦兹频谱形状^[11],光相干检测得到的布里渊散射 DOFS 信号具有几十兆的谱宽,可看作是宽带的幅度调制信号,包含有大量噪声.针对散射光信号特点,本文研究采用数字信号处理技术中的希尔伯特(Hilbert)变换来处理 BOTDR 结构布里渊散射 DOFS 的相干检测光电信号.

1 原理

1.1 传感机理和实验系统

光相干检测的 BOTDR 结构布里渊散射 DOFS 利用的是布里渊频移,光纤的布里渊频移 ν_B 和温度 T 、应变 ϵ 的关系为^[3,4]

$$\nu_B(\epsilon) = \nu_B(0)[1 + C_\epsilon \epsilon] \quad (1)$$

$$\nu_B(T) = \nu_B(T_r)[1 + C_T(T - T_r)] \quad (2)$$

式中, T_r 是参考温度, $C_\epsilon = 4.6$, $C_T = 9.4 \times 10^{-5} 1/K$ 分别是应力和温度的比例系数.布里渊频移取决于应力和温度,因此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信息.

图 1 是 BOTDR 结构的布里渊散射 DOFS 实验系统. DFB 激光器作为单一光源,经耦合器分为两路光,一路光作为激励光,被调制成脉冲光,再由 EDFA 放大、耦合器注入 25 km 普通单模光纤(脉冲宽度为 100 ns,峰值功率为 23 dBm);另一路光作为参考光,由微波电光调制器调制成频移光(频移可调,接近布里渊频移),并由光纤偏振控制器进行偏振状态控制.激励光在传感光纤中产生后向的自发布里渊散射光和瑞利散射光,与频移参考光进行相干检测得到原始光电信号.滤波器取出布里渊散射光电信号,再采用希尔伯特变换处理光电信号,数字 BOXCAR 进行累加平均,得到信噪比改善的布里渊散射信号,最后由计算机处理、显示.

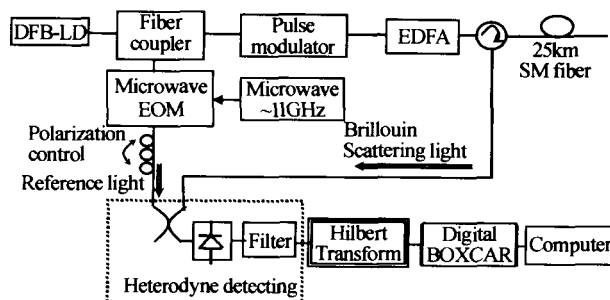


图 1 采用希尔伯特变换的光相干检测 BOTDR 实验系统
Fig. 1 Experimental arrangement of Brillouin scattering optical fiber sensor with Hilbert transformer

布里渊散射光和本地频移参考光进行光相干检测,经过带通滤波器滤出确定频带的布里渊散射信号后,得到如图 2 的光电信号波形.由图中可看出,原始光电信号是一带通的幅度调制信号,每一处的幅度对应于传感光纤上某一处的散射光强,载波频率取决于参考光和自发布里渊散射光的频差.

*国家 863 计划项目(2001AA602022-1)和浙江省自然科学基金(M603127)资助
Tel:0571-87951699 Email:songmp@zju.edu.cn
收稿日期:2004-09-28

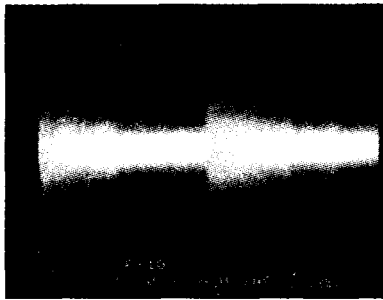


图 2 光相干检测产生的光电信号波形
Fig. 2 The original wave of heterodyne detecting photoelectric signal

1.2 希尔伯特变换处理散射信号

在光相干检测的 BOTDR 结构布里渊散射 DOFS 中,由于自发布里渊散射光信号具有几十兆带宽^[11],因此相干接收得到的光电信号包含有‘丰富’的相位噪声,不是单一载波幅度调制信号. 如对这样的信号进行直接的模拟相乘解调,会把相位噪声直接转变为检测信号,甚至造成幅度解调失败. 为了消除相位噪声对幅度解调的干扰,这里采用希尔伯特变换来处理布里渊散射光的光电信号.

希尔伯特变换可以用于幅度调制信号的解调^[12],其实质是通过希尔伯特变换的 90°移相作用,产生原信号的解析信号,从而完成幅度调制信号和载波信号的分离. 一个实信号 $s_r(t)$ 的希尔伯特变换和解析信号分别为

$$H[s_r(t)] = -\frac{1}{\pi t} * s_r(t) \tag{3}$$

$$z(t) = s_r(t) + jH[s_r(t)] = A(t)e^{j\varphi(t)} \tag{4}$$

对于一个存在相位干扰的幅度调制信号,如自发布里渊散射光的光电检测信号,可表示为 $x(t) = a(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \theta)$ (θ 为相位噪声),根据希尔伯特变换的性质

$$H[\cos \omega t] = \sin \omega t \tag{5}$$

在快变载波、慢变调制信号条件下,可以近似地认为 $x(t)$ 的希尔伯特变换为^[13]

$$H[x(t)] \cong a(t) \sin(\omega_0 t + \theta) \tag{6}$$

从而 $x(t)$ 的解析信号为

$$z(t) = x(t) + jH[x(t)] = a(t)(\cos(\omega_0 t + \theta) + j\sin(\omega_0 t + \theta)) = a(t)e^{j\omega_0 t + \theta} \tag{7}$$

则有

$$a(t) = |z(t)| = \sqrt{x(t)^2 + H[x(t)]^2} \tag{8}$$

因此通过求解析信号的幅度,就可以完成幅度调制信号解调. 另外,通过希尔伯特变换,原始光电信号的相位噪声只影响解析信号的相位,与幅度无关,所以处理后的光电信号不受相位噪声的干扰.

在对相干检测光电信号的具体解调实现过程中,采用了 FIR 结构的希尔伯特变换器来实现希尔

伯特变换^[14]. 图 3 是希尔伯特变换器的示意图,输入信号(原始光电信号)需要经过一系列单位延时器件,延时器件的输出经过组合后再进入乘法器,最后累加所有乘法器的输出得到经过希尔伯特变换处理的信号.

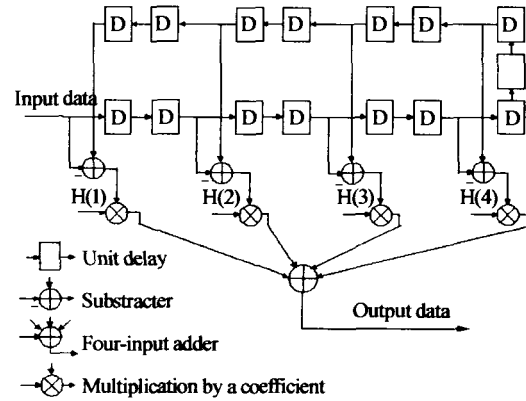


图 3 FIR 结构希尔伯特变换器
Fig. 3 Hilbert transformer of FIR structure

图 3 中 H(1)、H(2)、H(3)、H(4) 为滤波器抽头系数,也就是乘法器的固定输入端,具体的数值可以通过 Parks-McClellan 算法计算得到:

表 1 希尔伯特变换器系数

抽头系数	H(1)	H(2)	H(3)	H(4)
数值	0.0529	0.0882	0.1869	0.6279

利用希尔伯特变换处理布里渊散射光电检测信号,具体的实现过程如图 4. 整个数字信号处理系统由 A/D 转换、希尔伯特变换器、延时器和幅度提取器四部分组成. 高速 A/D 提供散射光检测信号的采样 $x(n)$; 希尔伯特变换器对 $x(n)$ 进行希尔伯特变换,构成解析信号 $z(n)$ 的虚部; 延时器产生解析信号实部. 在得到解析信号的实部和虚部以后,再用幅度提取器计算其幅值,而解析信号的幅值就是散射光信号的幅度包络,从而完成布里渊散射光信号的幅度解调.

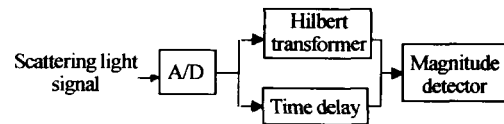


图 4 信号处理系统框图
Fig. 4 Schematic diagram of signal processing system

2 实验结果

采用图 1 的布里渊散射 DOFS 实验系统来进行分布式温度测试实验. 在实验中首先发现如采用一般的模拟相干解调方法,难以得到幅度调制信号,因此这里只采用两种数字信号处理方法:直接数字滤波和希尔伯特变换,来研究希尔伯特变换对传感检测的作用. 图 5(a)是经过希尔伯特变换处理和

BOXCAR 数字累加(2000 次)后,25 km 单模光纤的布里渊散射光信号频谱图.为了比较还给出了相同条件下没有采用希尔伯特变换处理的频谱图,如图 5(b).从图 5 可看出希尔伯特变换处理后的信号幅度约比直接数字滤波的信号提高 1 倍,而噪声幅度基本不变,因此信噪比约改善 1 倍.这有利于对传感光纤各处布里渊散射光信号的频移判断,从而提高了传感器的检测精度.图 5 中各频移下的电噪声幅度已比较小,这从 25 km 光纤后的波形可看出;25 km 光纤内的信号‘随机波动’是由于相干检测的偏振相关性和光纤的固有应变引起的.

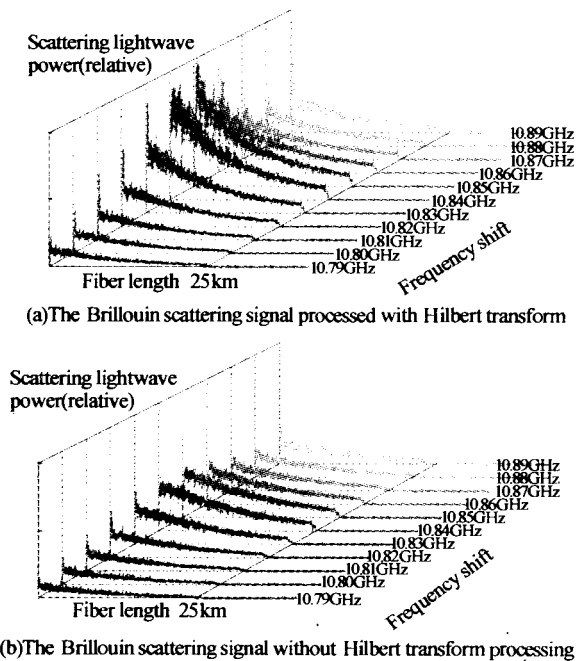


图 5 布里渊散射光谱信号

Fig. 5 The ‘panorama’ of the Brillouin scattering signal

由式(1)、(2)可知,温度和应变对布里渊频移的影响是相似的,在实验中采用改变温度的方式进行测试,具体是把位于 25 km 单模光纤末端附近的三段光纤处于不同温度:10 m 和 40 m 光纤放在 50℃ 温水中,中间的 15 m 光纤处于室温约 20℃.

图 6 是根据布里渊频移与温度的关系,由布里渊散射光信号提取的传感光纤温度曲线,图 6(a)是采用希尔伯特变换处理的结果,图 6(b)是在同样条件下但未采用希尔伯特变换处理的结果.可看出在相同的条件下,经希尔伯特变换处理改善后的散射光信号,可得到较好的检测准确度,图 6(b)在光纤末端附近甚至出现了错误判断.图 6 中的小图是位于光纤末端附近的 3 段测试光纤的放大图,10 m 和 40 m 光纤测得的温度为 50℃ 左右,中间 15 m 光纤的温度约为 20℃,比较图(a)和图(b)可看出:经过希尔伯特变换可得到较好的温度分布曲线,而未经

过希尔伯特变换的温度分布曲线具有较大的‘起伏’.这是由于经过希尔伯特变换处理后,减少了散射光信号中的相位噪声的干扰,提高了检测信噪比,这有利于对光纤各处的布里渊频移判断,从而提高了检测准确度.

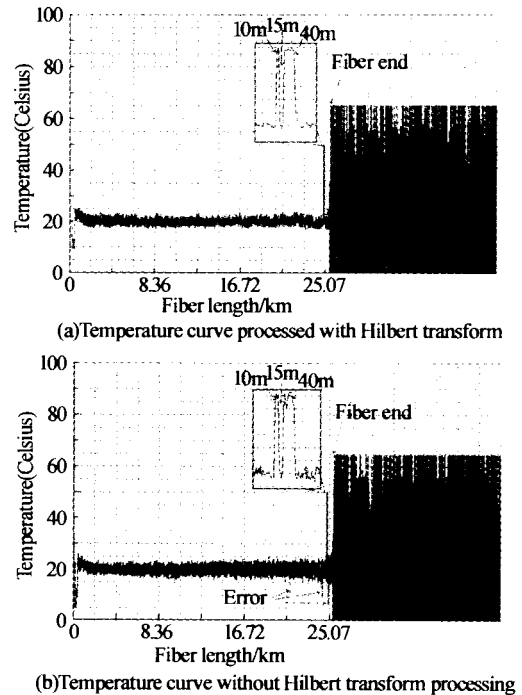


图 6 通过分析散射信号得到的温度曲线

Fig. 6 The temperature curve by analyzing the scattering signal

3 结论

针对 BOTDR 布里渊 DOFS 检测的自发布里渊散射光信号具有宽频谱的特点,采用希尔伯特变换来处理布里渊散射信号.经希尔伯特变换处理后的散射光信号的信噪比得到明显的提高,这有利于对传感光纤各处布里渊散射光信号的频移和传感量的判断,从而提高了系统的检测精度.但由于布里渊散射光信号中相位和幅度噪声同时存在,难以用解析公式表示,现正在这方面开展后续研究.

参考文献

- 1 Rogers A J. Distributed optical-fibre sensing: A Review. *Journal Of Measurement Science and Technology*, 1999, 10(8): 75~99
- 2 耿军平, 许家栋, 李焱, 等. 基于光频域喇曼散射的全分布式光纤温度传感器模型研究. *光子学报*, 2002, 31(10): 1261~1265
Geng J, Xu J D, Li Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(10): 1261~1265
- 3 Kurashima T, Horiguchi T, Ohno H, et al. Starin and Temperature Characteristics of Brillouin Spectra in Optical Fibers For Distributed Sensing Techniques ,

- ECOC'98, Madrid, Spain, 1998. 149~150
- 4 Naruse H, Tateda M, Ohno H, *et al.* Linear strain distribution dependence of the Brillouin gain spectrum. Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 2002. OFS 2002, 15th, 2002, 1: 305~308
 - 5 Bao X, Dhliwayo J, Heron N, *et al.* Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering. *J Lightwave Technol*, 1995, **13**(7): 1340~1348
 - 6 Wait P C, Hartog A H. Spontaneous Brillouin-based distributed temperature sensor utilizing a fiber Bragg grating notch filter for the separation of the Brillouin signal. *IEEE Photonics Tech Lett*, 2001, **13**(5): 508~510
 - 7 何玉钧, 李永倩, 杨志, 等. 全光纤 M-Z 干涉仪及其在光纤自发布里渊散射测量中的应用. *光子学报*, 2002, **31**(7): 865~869
He Y J, Li Y Q, Yang Z, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(7): 865~869
 - 8 杨志, 李永倩, 何玉钧, 等. 分布式光纤布里渊散射温度传感实验系统. *光子学报*, 2003, **32**(1): 14~17
Yang Z, Li Y Q, He Y J, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(1): 14~17
 - 9 Kurashima T, Tateda M, Horiguchi T, *et al.* Performance improvement of a combined OTDR for distributed strain and loss measurement by randomizing the reference light polarization state. *IEEE Photon Tech Lett*, 1997, **9**(3): 360~362
 - 10 Maughan S M. A calibrated 27-km distributed fiber temperature sensor based on microwave heterodyne detection of spontaneous Brillouin backscattered power. *IEEE Photon Lett*, 2001, **13**(5): 511~513
 - 11 Govind P. Agrawal Nonlinear Fiber Optics. San Diego: Academic Press, 1989. 263~288
 - 12 Rice D A, Venkatachalam V, Wegmann M J. A simple envelope detector. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1998, **37**(2): 223~226
 - 13 胡广书. 数字信号处理——理论、算法与实现. 北京: 清华大学出版社, 1997. 126~128
Hu G S. Digital Signal Processing-theory, algorithm and Realization. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. 126~128
 - 14 A. V. 奥本海姆等著, 刘树棠, 黄建国译. 离散时间信号处理. 西安: 西安交通大学出版社, 2001. 639~641
Oppenheim A V. Discrete-time Signal Processing. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001. 639~641

Study on the Technique of Brillouin Scattering Distributed Optical Fiber Sensing Based on Hilbert transform

Song Muping, Zhao Bin

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

Received date: 2004-09-08

Abstract The scattering optical signal of BOTDR based on Brillouin scattering distributed sensor is very weak and have a frequency width of several decades megahertz, so it is hard to perform the traditional coherent demodulation. A optical heterodyne detection based on Hilbert transform is presented here. In detail, Brillouin back-scattering light is heterodyne detected with the reference light which is modulated by microwave electric optical modulator to produce frequency-adjustable light, then the detected photoelectric signal is demodulated using Hilbert transform. At last the distributed sensing signal with better S/N ratio is gained, which can enhance the performance of the sensor.

Keywords Optical fiber sensor; Brillouin scattering; Hilbert transform; Heterodyne detect



Song Muping was born in 1971. He received his B. S. degree and Ph. D. degree in physical electronics from Zhejiang University in 1993 and 1998 respectively. Since 1998, he has been a teacher in Zhejiang University. Now he is an associate professor at the Department of Information and Electronic Engineering. His current R&D areas of interests include optical fiber sensor, optical fiber communication and microwave photonics.