

# 基于广义谐波小波变换的布里渊光时域反射计的 数字包络解调技术

杨 巍 杨远洪

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院 光电工程系, 北京 100191)

**摘要** 分析了相干探测型布里渊光时域反射计(BOTDR)的信号特征及信号包络对其空间分辨率和布里渊频移测量精度等参数的影响,总结了幅度调制信号的数字包络解调算法模型和理想的数字包络解调算法的特性。根据广义谐波小波(GHW)的零相移理想带通滤波特性及通带参数可灵活设计的特点,提出了一种基于广义谐波小波变换(GHWT)的 BOTDR 的数字包络解调技术,设计了解调方案并进行了参数优化和实验研究。结果表明,与现有 BOTDR 数字包络解调技术相比,所提出的新技术能够无失真地提取 BOTDR 的信号包络并具有较强的噪声抑制能力,从而在不影响 BOTDR 的空间分辨率的情况下提高布里渊频移测量精度。最后,还根据解调算法的频域特性对实验结果进行了分析。

**关键词** 传感器;光纤传感;布里渊光时域反射计;广义谐波小波变换;包络解调

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0506004

## Digital Envelope Detection Technique for Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry Based on Generalized Harmonic Wavelet Transform

Yang Wei Yang Yuanhong

(Department of Opto-Electronics Engineering, School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract** The signal characteristics of the coherent heterodyne Brillouin optical time-domain reflectometry (BOTDR), as well as the impacts of the signal envelope on the spatial resolution and Brillouin frequency shift (BFS) measurement accuracy of the BOTDR are analyzed, respectively. A general algorithm model for the digital envelope detection of an amplitude-modulated (AM) signal and the features of an ideal digital envelope detection algorithm are summarized, respectively. According to the zero phase shift ideal bandpass filtering features and passband designing flexibility of the generalized harmonic wavelet (GHW), a digital BOTDR envelope detection technique based on the generalized harmonic wavelet transform (GHWT) is proposed, and the envelope demodulation scheme is designed. The parameters optimization and experiments are made. The results show that, compared with the existing techniques, an undistorted signal envelope with a higher signal-to-noise ratio can be obtained by the proposed method, resulting in an undegraded spatial resolution and a higher BFS measurement accuracy for the BOTDR system. The experimental results are also analyzed according to the frequency domain characteristics of the algorithms.

**Key words** sensor; fiber optic sensing; Brillouin optical time-domain reflectometry; generalized harmonic wavelet transform; envelope detection

**OCIS codes** 060.2370; 290.5830; 280.4788

收稿日期: 2012-11-26; 收到修改稿日期: 2013-01-26

基金项目: 国家 863 计划(2006AA06Z216)资助课题。

作者简介: 杨 巍(1985—),男,博士研究生,主要从事分布式光纤传感技术方面的研究。

E-mail: haoweiwei168@163.com

导师简介: 杨远洪(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术及激光技术等方面的研究。

E-mail: yhyang@buaa.edu.cn(通信联系人)(中国光学学会会员号:S040420656S)

# 1 引 言

布里渊光时域反射计(BOTDR)是一种基于光纤中自发布里渊散射效应的分布式光纤传感系统,可获得光纤上的温度和应力的空间分布信息,采用单端测量方式,不受光纤断点的影响。因此 BOTDR 具有广阔的应用前景和重要的应用价值,得到了国内外相关领域研究人员的广泛关注和深入研究<sup>[1~7]</sup>。

BOTDR 通常采用相干探测技术<sup>[8~10]</sup>来检测自发布里渊散射信号。在光路中将后向自发布里渊散射信号和移频(约 11 GHz)的参考光进行光外差,用以提高信噪比并降低探测系统的带宽。然后在信号处理系统中采用电外差接收技术,在一定范围扫描光路中参考光频移或电外差接收机中本振信号频率来测量宽带布里渊功率谱并提取其峰值频率(即布里渊频移),进而获得传感光纤上被测物理量的分布信息。在这种信号检测方式中,电外差接收机输出的信号为一系列与不同扫描频率对应的幅度调制(AM)信号,需要提取其信号包络才能实现布里渊功率谱的重构和布里渊频移的提取。信号包络的带宽和信噪比对 BOTDR 系统的空间分辨率和测量精度等性能指标有直接影响,因此包络解调技术是 BOTDR 信号处理系统的一项关键技术。

包络解调技术可以通过模拟或数字方式实现。模拟包络解调技术主要采用二极管包络检波器来实现。虽然解调速度快,但是参数设置不灵活,容易产生非线性失真,从而使信号包络失真进而降低 BOTDR 的空间分辨率。数字包络解调技术通过在

软件或嵌入式系统中设计解调算法来实现,参数灵活可调,但需要根据信号特征来选择合适的包络解调算法才能获得理想的信号包络。目前报道的用于 BOTDR 的数字包络解调技术有基于 Hilbert 变换<sup>[11,12]</sup>、基于 Morlet 小波变换<sup>[13,14]</sup>和基于广义 S 变换<sup>[15,16]</sup>的包络解调技术,但是相关研究局限在对算法的实现方式和实验结果,并没有分析所采用的包络解调算法对信号包络及 BOTDR 性能参数的影响。

本文分析了相干探测型 BOTDR 系统的信号特征及信号包络对 BOTDR 的空间分辨率和布里渊频移测量精度等参数的影响,总结了幅度调制信号的数字包络解调算法模型和理想数字包络解调算法的特性。在此基础上,基于广义谐波小波(GHW)的零相移理想带通滤波特性和通带参数可灵活设计的特点,提出了一种基于广义谐波小波变换(GHWT)的 BOTDR 的数字包络解调技术,通过对电外差接收机输出的中频(IF)幅度调制信号进行全数字上、下变频形成两个信号通道,在两个通道中分别提取信号包络,再将两个信号包络的累加平均结果作为输出,从而实现信号包络解调。对方案进行了参数优化和实验对比研究,并根据解调算法的频域特性对实验结果进行了分析。

## 2 原 理

### 2.1 相干探测型 BOTDR 的工作原理及信号特征

相干探测型 BOTDR 信号处理系统的工作原理如图 1 所示。宽带布里渊散射信号(增益谱带宽为

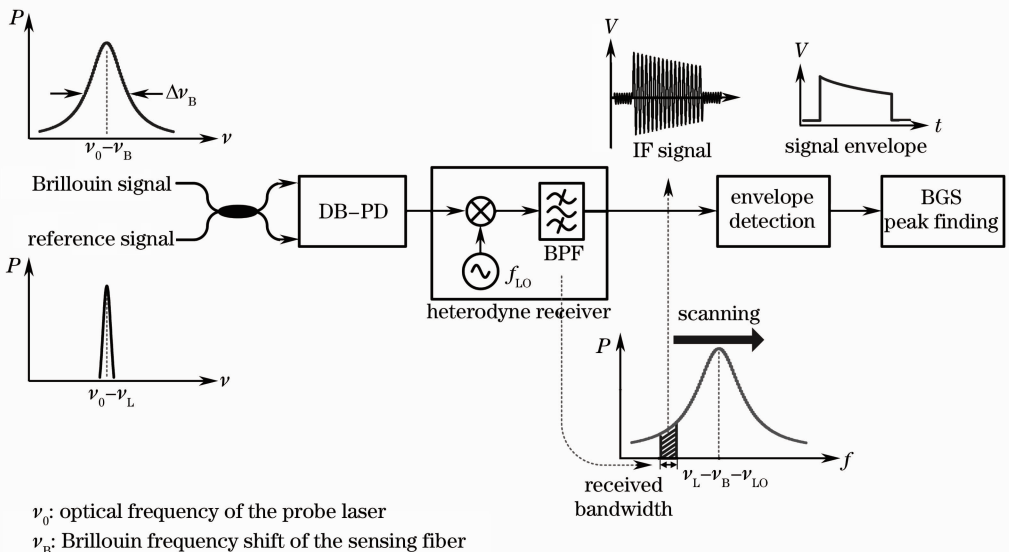


图 1 相干探测型 BOTDR 信号处理系统的工作原理

Fig. 1 Principle of the signal processing system in the coherent heterodyne BOTDR

$\Delta\nu_B$ )和经过移频的参考光进行相干检测并由双平衡光电探测器(DB-PD)转换为原始光电信号。将该信号输入电外差接收机进行处理,通过在一定范围扫描参考光频移 $\nu_L$ 或电外差接收机中本振信号频率 $f_{L0}$ ,可以将宽带布里渊功率谱中的不同频率分量经电外差接收机中的带通滤波器(BPF)提取出来。电外差接收机输出的信号为一组与不同扫描频率对应的IF带通幅度调制信号,可以表示为

$$S_{IF}(t) = a(t) \cos[2\pi f_{IF}t + \varphi(t)], \quad (1)$$

式中 $f_{IF}$ 为载波信号频率, $\varphi(t)$ 为相位, $a(t)$ 为信号包络,其中包含了被测物理量的信息。需要解调出信号包络才能实现布里渊功率谱的重构和布里渊频移的提取。图1中, $P$ 表示信号功率, $V$ 表示电信号的幅度, $f$ 表示电信号的频率, $\nu$ 表示光频率, $t$ 表示时间。

空间分辨率 $\Delta Z$ 和布里渊频移测量精度 $\delta\nu_B$ 是BOTDR系统的两个重要性能指标,与BOTDR的系统参数有关,可分别表示为

$$\Delta Z = \max\left(\frac{cW}{2n}, \frac{ct_r}{2n}, \frac{c}{2nf_s}, \Delta Z_{DSP}\right), \quad (2)$$

$$\delta\nu_B = \frac{\Delta\nu_B}{\sqrt{2}R_{SN}^{1/4}}, \quad (3)$$

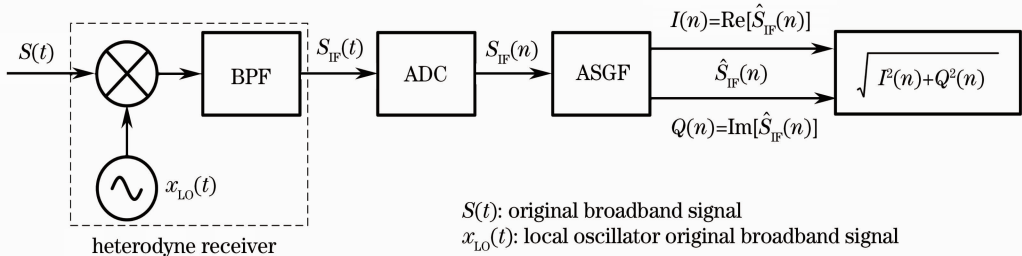


图2 幅度调制信号的包络解调算法模型

Fig. 2 General algorithm model for the digital envelope detection of an amplitude modulation signal

模拟数字转换器(ADC)采样电外差接收机输出的中频调制信号 $S_{IF}(t)$ 后输出信号 $S_{IF}(n)$ 。解析信号发生滤波器(ASGF)是算法模型中的关键环节,其功能是产生信号 $S_{IF}(n)$ 的解析信号 $\hat{S}_{IF}(n)$ ,并将 $\hat{S}_{IF}(n)$ 分解为两个相位正交的信号 $I(n)$ 和 $Q(n)$ ,获得解调输出的信号包络 $a(n)$ :

$$a(n) = \sqrt{I^2(n) + Q^2(n)}. \quad (4)$$

在频域中,信号 $S_{IF}(n)$ 输入ASGF处理的过程等效于使用ASGF对 $S_{IF}(n)$ 进行滤波。为了无失真地提取信号包络并提高信号包络的信噪比,理想的数字包络解调算法应具备的特征是:ASGF在频域具有理想带通滤波特性,即

1) 具有平坦的通带,以保证对通带内的各个频

式中 $c$ 为真空中的光速, $n$ 为光纤纤芯的折射率, $W$ 为探测光脉冲的宽度, $t_r$ 为光电探测器的响应时间, $f_s$ 为数据采集卡的采样速率, $\Delta Z_{DSP}$ 为由数字信号处理系统确定的空间分辨率; $\Delta\nu_B$ 为布里渊功率谱带宽, $R_{SN}$ 为信号包络的信噪比(SNR)。

由(2)式可知,当脉冲宽度、光电探测器的响应时间和数据采集卡的采样速率确定并满足设计要求时,BOTDR的空间分辨率主要取决于由数字信号处理系统确定的空间分辨率 $\Delta Z_{DSP}$ ,而 $\Delta Z_{DSP}$ 取决于信号包络的带宽。由(3)式可知,在布里渊功率谱带宽确定时,布里渊频移的测量精度主要取决于信号包络的信噪比。为了不影响BOTDR的空间分辨率并提高布里渊频移的测量精度,BOTDR的包络解调技术应具有无失真地解调信号包络的能力和较强的噪声抑制能力。

## 2.2 幅度调制信号包络解调算法模型

与模拟包络解调技术相比,数字包络解调技术因其参数设置灵活、实现方法简单而得到了广泛应用。幅度调制信号的包络解调算法模型可通过图2来描述。

率分量具有相同的幅频响应;

2) 具有零相移特性或线性相位,以保持各个频率分量之间的相对相位关系;

3) 具有迅速衰减的阻带,以保证对通带之外的噪声具有较强的抑制能力。

## 2.3 基于GHWT的BOTDR信号包络解调方案

GHWT是由Newland等<sup>[17~21]</sup>提出的,它在时域和频域均有解析表达式:

$$\psi_{p,q}(t) = \frac{\exp(i2\pi qt) - \exp(i2\pi pt)}{i2\pi(q-p)t}, \quad (5)$$

$$\Psi_{p,q}(2\pi f) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi(q-p)}, & p \leq f < q, \\ 0, & \text{others} \end{cases}, \quad (6)$$

式中实数 $p$ 和 $q$ 分别对应于分析频带的上限和下限

截止频率。

根据(5)和(6)式可以获得 GHW 的时域特性和

频域特性,分别如图 3(a)和图 3(b)所示。

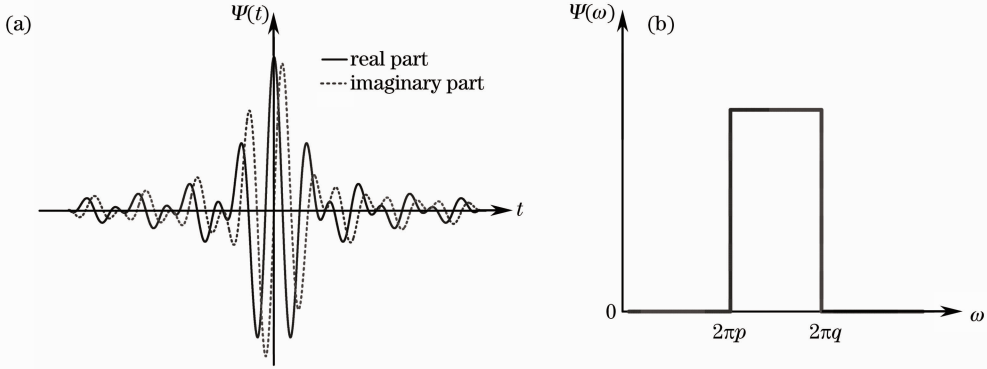


图 3 GHW 的特性。(a)时域特性;(b)频域特性

Fig. 3 Features of GHW. (a) Time-domain feature; (b) frequency-domain feature

由图 3 可知,GHW 的实部和虚部相位正交,且只包含正的频率成分,因此 GHW 是一种解析小波。GHW 在频域上具有理想带通滤波特性,通带平坦、阻带迅速衰减,且具有保持信号相位的功能。其通带带宽为  $B_{\text{GHW}} = q - p$ ,由于  $p$  和  $q$  ( $p < q$ ) 在实数范围内可以任意取值,因此其通带参数可灵活设计,适用于对窄带或宽带信号进行处理。

实信号  $x(t)$  的 GHWT 可表示为

$$W_{\text{GHWT}}(p, q, t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \Psi_{p,q}(t - \tau) d\tau. \quad (7)$$

由(7)式可知,对  $x(t)$  进行 GHWT 等效于使用 GHW 滤波器对  $x(t)$  进行带通滤波。由于 GHW 是一种解析小波,小波变换系数  $W_{\text{GHWT}}(p, q, t)$  也为复数,实部和虚部相位正交,且在频域具有零相理想带通滤波特性。因此 GHW 是一类 ASGF,并符合理想数字包络解调算法特征,可用于图 2 所示的包络解调算法模型中,能够无失真地提取信号包络,并对通带之外的噪声也具有较强的抑制能力。

GHWT 可以利用快速傅里叶变换(FFT)实现,其算法流程如图 4 所示<sup>[20~22]</sup>。

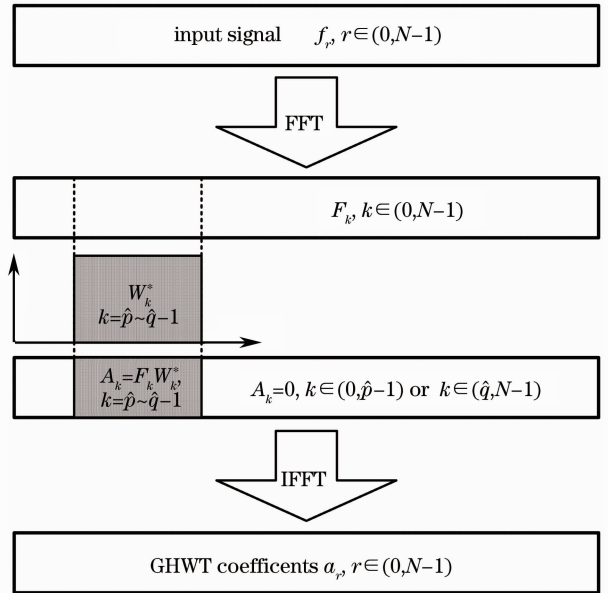


图 4 GHWT 的快速算法流程

Fig. 4 Flow chart of the fast algorithm for GHWT

先对离散信号  $f_r$  进行 FFT,获得 FFT 系数  $F_k$  ( $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ );再根据信号特点,确定通带参数并设计 GHW 滤波器  $W_k$ :

$$W_k = \begin{cases} \frac{1}{2\pi(\hat{q} - \hat{p})}, & (k \in \hat{p}, \hat{q} - 1) \\ 0, & k \in (0, \hat{p} - 1) \text{ and } k \in (\hat{q}, N - 1) \end{cases}, \quad (8)$$

式中  $\hat{p} = \frac{pN}{f_s}$ ,  $\hat{q} = \frac{qN}{f_s}$ ,  $f_s$  和  $N$  分别为数据采集系统的采样速率和采样深度。再计算:

$$A_k = \begin{cases} F_k W_k^*, & k \in (\hat{p}, \hat{q} - 1) \\ 0 & k \in (0, \hat{p} - 1) \text{ and } k \in (\hat{q}, N - 1) \end{cases}. \quad (9)$$

并对  $A_k, k = 0, 1, 2, \dots, N-1$  做快速傅里叶逆变换 (IFFT), 就可获得 GHWT 系数  $a_r (r = 0, 1, 2, \dots, N-1)$ 。

根据 BOTDR 信号特征及 GHW 的特点, 设计了基于 GHWT 的 BOTDR 数字包络解调方案, 其原理如图 5 所示。其中  $T_s, T_D$  和  $T_U$  分别为电外差接收机输出的中频带通调幅信号、混频后低频段和高频段信号通道中的带通调幅信号的载波周期。整个方案在计算机中采用全数字方式实现。将电外差接收机输出的中频带通调幅信号进行数字化处理后

与数字本振信号进行混频, 由于混频的频谱搬移作用, 数字中频带通幅度调制信号的频谱会被同时搬移到低频段和高频段, 形成中心频率分别为  $f_{IF} - f_{LO}$  和  $f_{IF} + f_{LO}$  的两个信号通道。两个通道中信号包含的有用信息相同, 区别仅在于具有不同的中心频率。根据 GHW 的通带参数可以灵活设置的特点, 设计两个 GHW-ASGF 分别与这两个信号通道相匹配, 在两个信号通道中提取信号包络, 再将两个信号包络的累加平均结果作为输出, 即可实现信号包络解调。

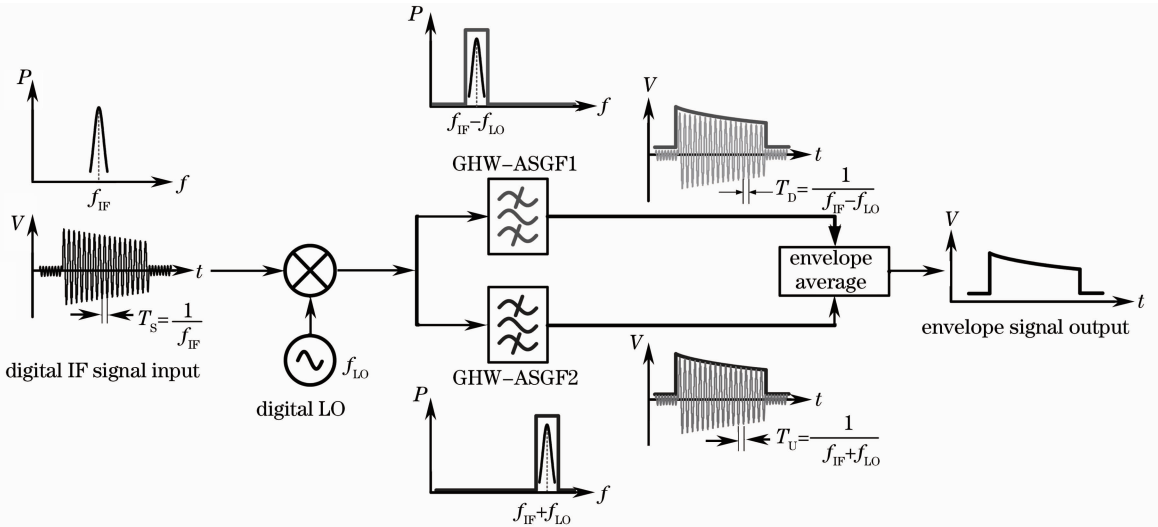


图 5 基于 GHWT 的 BOTDR 数字包络解调方案原理

Fig. 5 Schematic diagram of the BOTDR envelope detection scheme based on GHWT

### 3 实 验

#### 3.1 实验装置

为了研究基于 GHWT 的 BOTDR 数字包络解调方案的特性, 搭建了图 6 所示的相干探测 BOTDR 实验系统。分布反馈式半导体激光器 (DFB-LD) 输出激光经耦合器 (PM-C1) 被分成两路光。一路光作为探测光, 被调制成脉冲光并由掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大后, 经环行器 (PM-CIR) 注入 5 km 的传感光纤; 另一路光作为参考光, 采用微波光电调制技术产生频移调谐范围为 10~12 GHz 的调制边带; 后向散射光经 EDFA 放大后与参考光在耦合器 (PM-C2) 中耦合, 由平衡光电探测器接收转换为电信号, 经过电外差接收机处理后, 输出的中频信号再由采样速率为 150 MS/s 的数据采集 (DAQ) 卡数字化处理并传输到计算机中。在计算机中设计数字包络解调算法和频谱寻峰算法来分别提取信号包络和布里渊频移, 再经过信号解算, 即可获得传感光纤上的温度或应变的分布信息。

图 7 所示为实验获得 BOTDR 的信号特征。其中图 7(a) 中 CH1 通道为系统的同步信号 (SYNC), CH2 通道为电外差接收机输出的中频幅度调制时域信号, 图 7(b) 和图 7(c) 分别为中频幅度调制信号的幅频特性和相频特性。中频幅度调制信号具有带通特性, 中心频率为 47 MHz, 带宽约为 4 MHz, 且包含了大量的随机相位噪声。

#### 3.2 参数优化

GHW-ASGF 的带宽是滤波器的关键参数, 为了无失真提取信号包络并对噪声具有一定的抑制能力, 需要对其进行优化设计。在 BOTDR 实验系统中, 将传感光纤前段 100 m 光纤放置在恒温水浴中并加热到 40 °C, 设置图 5 中 GHW-ASGF1 和 GHW-ASGF2 的带宽同时从 1 MHz 增加到 10 MHz, 步进为 1 MHz。在每个设定带宽下根据加温段曲线的上升沿来计算 BOTDR 的空间分辨率, 同时计算原始的未经累加平均的信号包络中的噪声均方根电压 (该参数用于表征原始信号的噪声大小)。BOTDR 空

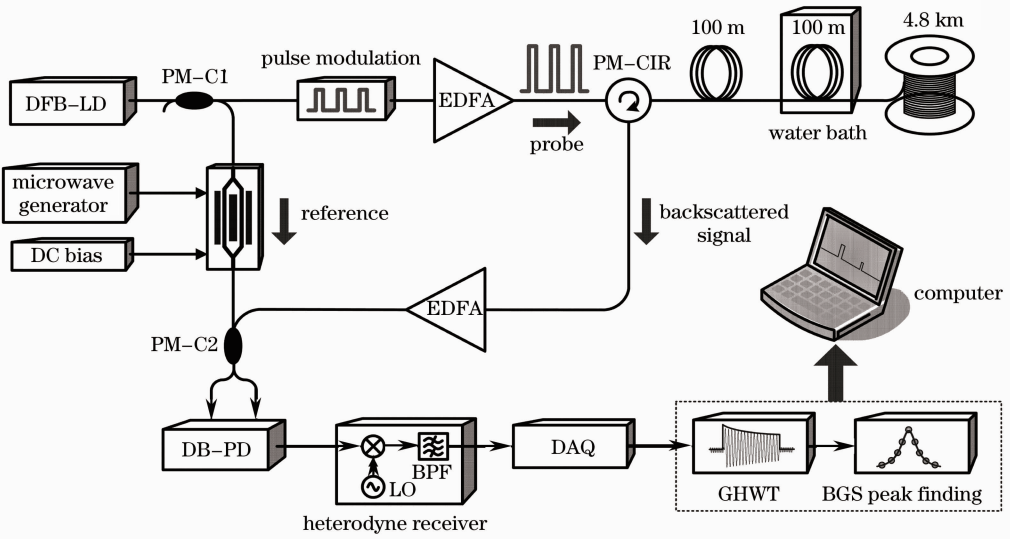


图 6 基于相干探测的 BOTDR 实验系统

Fig. 6 Experimental setup of the coherent heterodyne BOTDR

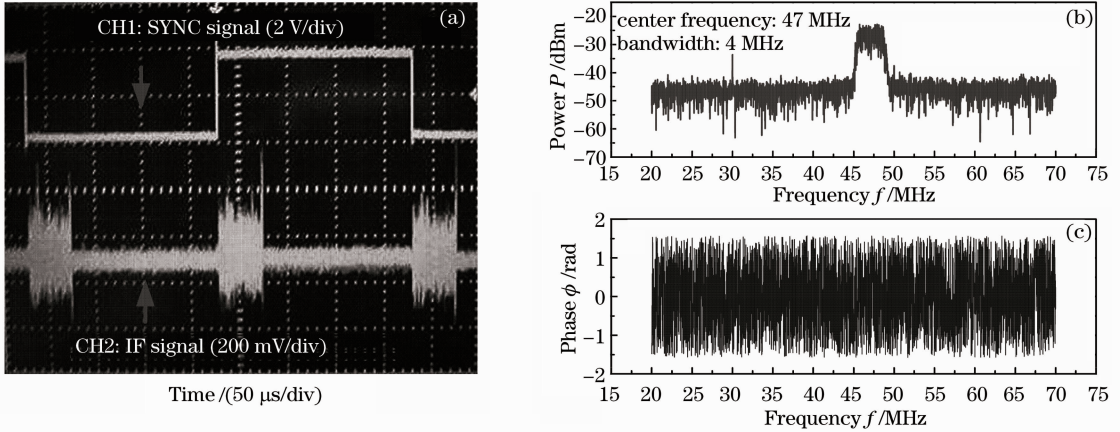


图 7 BOTDR 的信号特征。(a) 时域信号；(b) 幅频特性；(c) 相频特性

Fig. 7 BOTDR signal characteristics. (a) Time-domain signal; (b) magnitude-frequency feature; (c) phase-frequency feature

间分辨率和信号包络噪声均方根电压与 GHW-ASGF 带宽的关系如图 8 所示。

当 GHW-ASGF 的带宽从 1 MHz 变化到 5 MHz 时, BOTDR 的空间分辨率由 58 m 变为 16.6 m, 带宽继续增加时, BOTDR 的空间分辨率基本不变。这是因为当 GHW-ASGF 带宽较窄时, 中频带通幅度调制信号中包含的一些频率分量由于在通带之外而被滤除, 导致提取出的信号包络失真, 从而降低了 BOTDR 的空间分辨率。当 GHW-ASGF 的带宽较宽时, 中频带通幅度调制信号中所有频率成分均位于通带之内, 由于 GHW-ASGF 在频域具有零相移理想带通滤波特性, 能够保持信号相位并且对通带内信号的所有频率成分具有平坦的幅频响应, 提取出的信号包络不会失真, 因此 BOTDR 的空间分辨

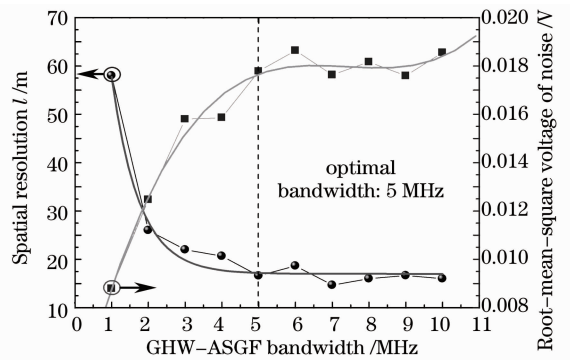


图 8 BOTDR 空间分辨率和信号包络噪声均方根电压随 GHW-ASGF 带宽的变化

Fig. 8 Spatial resolution of BOTDR and the root-mean-square voltage of noise in the signal envelope versus the GHW-ASGF bandwidth

率基本不变。

当 GHW-ASGF 的带宽从 1 MHz 变化到 10 MHz 时,信号包络噪声的均方根(RMS)电压逐渐增大,信噪比逐渐降低。这是由于包含在其带宽范围内的噪声也被提取出来并叠加在信号包络上,带宽越宽,信号包络中包含的噪声越大。因此根据图 8 所示的实验结果并综合 BOTDR 的空间分辨率和包络信号信噪比这两个参数,可知 GHW-ASGF 的带宽存在一个最优值 5 MHz,在不降低 BOTDR 空间分辨率的条件下,对噪声具有较强的抑制能力。

### 3.3 对比实验研究

由图 2 可知,现有的基于 Hilbert 变换、基于 Morlet 小波变换和基于广义 S 变换的 BOTDR 包络解调技术分别等效于用 Hilbert-ASGF、Morlet-ASGF 和 S-ASGF 对信号进行滤波。Morlet-ASGF

和 S-ASGF 在频域都具有高斯型带通滤波特性,而 Hilbert-ASGF 在频域上为全通滤波特性,为了对比不同 ASGF 对 BOTDR 信号的影响,选择具有代表性的 Hilbert-ASGF 和 Morlet-ASGF 来提取 BOTDR 信号包络,并与采用 GHW-ASGF 的处理结果进行对比,主要对比不同 ASGF 对 BOTDR 的布里渊频移测量精度和空间分辨率的影响。

根据参数优化结果,将 Morlet-ASGF 的带宽设置为 5 MHz;图 5 所示的方案中,数字本振频率设置为 10 MHz,GHW-ASGF1 和 GHW-ASGF2 的中心频率分别设置为 37 MHz 和 57 MHz,带宽均设置为 5 MHz。Morlet-ASGF、Hilbert-ASGF、GHW-ASGF1 和 GHW-ASGF2 的幅频特性分别如图 9(a)~(c)所示。

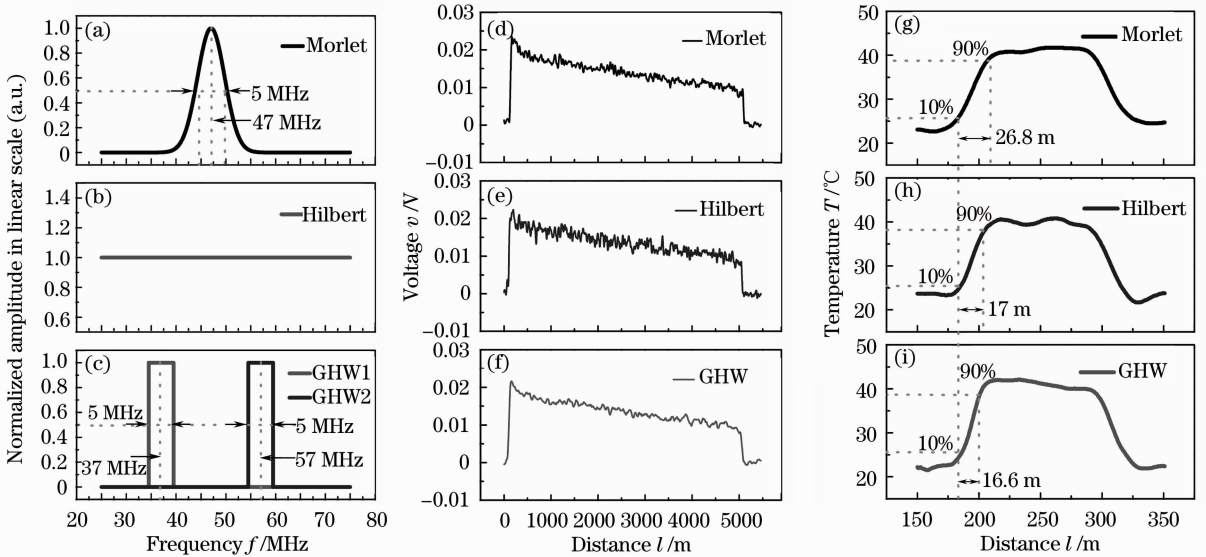


图 9 不同 ASGF 的频域特性及其对 BOTDR 信号的影响。(a)~(c)幅频响应;(d)~(f)信号包络;(g)~(i)加温段光纤温度分布

Fig. 9 Frequency domain features of different ASGFs and their impacts on BOTDR signal. (a)~(c) Magnitude-frequency response; (d)~(f) signal envelope; (g)~(i) temperature distribution in the heated fiber section

#### 3.3.1 不同算法对 BOTDR 信号包络信噪比和布里渊频移测量精度的影响

为了对比不同的 ASGF 对信号包络的信噪比及布里渊频移测量精度的影响,将 5 km 的传感光纤都放置在 25 °C 的室温环境中,该室温下传感光纤的布里渊频移为 10.39 GHz。设置电外差接收机本振频率为 50 MHz,微波信号源的频率扫描范围为 10.4~10.6 GHz,步长为 10 MHz,信号包络累加平均次数为 512 次。对扫描频率为 10.44 GHz(对应布里渊功率谱峰值频率)时输出的中频带通幅度调制信号进行处理, Morlet-ASGF、Hilbert-ASGF 和

GHW-ASGF 的信号包络解调结果分别如图 9(d)~(f)所示。

采用三种 ASGF 均可以提取出包络信号。由于 Hilbert-ASGF 在频域具有全通滤波特性,对信号频率没有选择性,在提取信号包络的同时也会将噪声提取出来并叠加在信号包络上,其抗噪声能力较差;而 Morlet-ASGF 和 GHW-ASGF 在频域上都具有带通滤波特性,能够有效地抑制通带之外的噪声,因此其抗噪声能力优于 Hilbert-ASGF。另外,由于图 5 所示的方案在输出信号包络前已经完成了包络信号的一次累加平均,因此其实际等效累加平

均次数为 1024 次,理论上其信噪比较 Morlet-ASGF 处理结果可提高 $\sqrt{2}$ 倍。

根据(3)式可推导出采用不同方法进行处理时,信噪比改善与布里渊频移测量精度之间的关系为

$$R_{\text{SNIR}12} = \frac{R_{\text{SN}_1}}{R_{\text{SN}_2}} = \left( \frac{\delta\nu_{\text{B2}}}{\delta\nu_{\text{B1}}} \right)^4, \quad (10)$$

式中 $R_{\text{SN}_1}$ 和 $R_{\text{SN}_2}$ 分别为采用算法 1 和算法 2 获得的信号包络信噪比(线性比例), $\delta\nu_{\text{B1}}$ 和 $\delta\nu_{\text{B2}}$ 分别为采用算法 1 和算法 2 获得的布里渊频移的测量精度, $R_{\text{SNIR}12}$ 为算法 1 相对于算法 2 的信噪比改善。

根据解调出的传感光纤上的布里渊频移分布曲线,可以计算出采用上述三种 ASGF 处理时获得的布里渊频移精度分别为 1.31、1.46、1.21 MHz。由(10)式可计算出,采用 GHW-ASGF 处理的信噪比比使用 Morlet-ASGF 时提高了 1.373 倍,与理论值 $\sqrt{2}$ 相符合;Morlet-GHWT 处理时的信噪比比 Hilbert-ASGF 处理时提高了 1.543 倍。实验结果表明,采用 GHW-ASGF 和 Morlet-ASGF 处理获得的信号包络信噪比都优于 Hilbert-ASGF 的处理结果;由于基于 GHW-ASGF 的方案本身具有包络一次累加平均功能,因此在设定相同的累加平均次数时,该方案在改善信号包络信噪比、提高布里渊频移测量精度方面更具有优势。

### 3.3.2 不同算法对 BOTDR 空间分辨率的影响

为了对比不同的 ASGF 对 BOTDR 空间分辨率的影响,将传感光纤前段 100 m 无应力地放置到恒温水浴加热到 40 °C,其余光纤无应力地放置在常温环境中。分别采用 Morlet-ASGF、Hilbert-ASGF 和 GHW-ASGF 进行信号处理,获得的加温段光纤的温度分布如图 9(g)~(i)所示。根据加温段的上升沿对 BOTDR 的空间分辨率进行估计,三种方法获得的 BOTDR 的空间分辨率分别为 26.8、17、16.6 m。

采用三种 ASGF 处理获得 BOTDR 空间分辨率的差异源于三种 ASGF 具有不同的频域特性。Hilbert-ASGF 在频域上为全通滤波器,对信号频率无选择性,允许所有频率的信号通过,因此提取出的信号包络无失真,不会降低 BOTDR 的空间分辨率。GHW-ASGF 在频域上具有零相移理想带通滤波特性,在通带内对所有频率的信号具有平坦的幅频响应,且具有保持输入信号相位的能力,因此信号包络可以被无失真提取,BOTDR 的空间分辨率也不会降低。而 Morlet-ASGF 在频域上具有高斯型带通滤波特性,虽然在通带内具有线性相频特性,但是对

通带内不同频率的信号具有不同的幅频响应,不满足理想数字包络解调算法的特征,会使信号包络失真,从而降低了 BOTDR 的空间分辨率。

## 4 结 论

分析了相干探测型 BOTDR 系统的信号特征及信号包络对 BOTDR 空间分辨率和布里渊频移测量精度等参数的影响,总结了幅度调制信号的数字包络解调算法模型和理想数字包络解调算法的基本特性。基于 GHW 的理想带通滤波特性和通带可灵活设计的特点,提出了一种基于 GHWT 的 BOTDR 的数字包络解调技术,并进行参数优化和实验对比研究。结果表明,在软件设定 512 次累加平均时,基于 GHWT 的 BOTDR 数字包络解调技术的实际等效累加平均次数为 1024 次,其信号包络的信噪比分别基于 Morlet 小波变换和 Hilbert 变换的结果分别提高了 1.373 倍和 2.12 倍。采用基于 GHWT 的包络解调技术获得的 BOTDR 空间分辨率为 16.6 m,与采用具有全通滤波特性的 Hilbert 变换获得的 17 m 的空间分辨率相符合,没有降低 BOTDR 的空间分辨率。而采用 Morlet 小波变换处理时,空间分辨率降低为 26.8 m。与现有的技术相比,基于 GHWT 的 BOTDR 的数字包络解调技术能无失真地解调出信号包络并具有较强的噪声抑制能力,不影响 BOTDR 空间分辨率并提高布里渊频移测量精度。因此,基于 GHWT 的包络解调技术一种较为理想的 BOTDR 包络解调技术。

## 参 考 文 献

- 1 S. Adachi. Distributed optical fiber sensors and their applications [C]. SICE Annual Conference, 2008. 329~333
- 2 X. P. Zhang, Y. G. Lu, F. Wang *et al.*. Development of fully-distributed fiber sensors based on Brillouin scattering [J]. *Photonic Sensors*, 2011, **1**(1): 54~61
- 3 X. Y. Bao, L. Chen. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensor [J]. *Sensors*, 2011, **11**(4): 4152~4187
- 4 Song Muping, Bao Chong, Qiu Chao *et al.*. A distributed optical-fiber sensor combined Brillouin optical time-domain analyzer with Brillouin optical time-domain reflectometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 650~654  
宋牟平, 鲍 翀, 裘 超等. 结合布里渊光时域分析和光时域反射计的分布式光纤传感器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 650~654
- 5 Song Muping, Qiu Chao. Long-distance Brillouin optical time domain reflectometer with two-parameter sensing for standard single-mode optical fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 954~958  
宋牟平, 裘 超. 普通单模光纤的长距离双参量传感布里渊光时域反射计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 954~958
- 6 Zhao Xiaodong, Lu Yuangang, Hu Junhui *et al.*. A wavelength-scanning Brillouin optical time domain reflectometer [J]. *Chinese*



- J. Lasers*, 2012, **39**(8): 0805003
- 赵晓东, 路元刚, 胡君辉 等. 波长扫描型布里渊光时域反射仪 [J]. *中国激光*, 2012, **39**(8): 0805003
- 7 Chen Fuchang, Hu Jiacheng, Zhang Chengtao *et al.*. Distributed Brillouin optical fiber temperature sensor based on high frequency microwave technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(6): 0605009
- 陈福昌, 胡佳成, 张承涛 等. 基于高频微波技术的分布式布里渊光纤温度传感器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(6): 0605009
- 8 K. Shimizu, T. Horiguchi, Y. Koyamada *et al.*. Coherent self-heterodyne detection of spontaneously Brillouin-scattered light waves in a single-mode fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(3): 185~187
- 9 K. Shimizu, T. Horiguchi, Y. Koyamada *et al.*. Coherent self-heterodyne Brillouin OTDR for measurement of Brillouin frequency shift distribution in optical fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(5): 730~736
- 10 H. Ohno, H. Naruse, N. Yasue *et al.*. Development of highly stable BOTDR strain sensor employing microwave heterodyne detection and tunable electric oscillator [C]. *SPIE*, 2001, **4596**: 74~85
- 11 Muping Song, Bin Zhao. Accuracy enhancement in Brillouin scattering distributed temperature sensor based on Hilbert transform [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **250**(4-6): 252~257
- 12 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): 1328~1331
- 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
- 13 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
- 14 Song Muping, Chen Xiang. Real-time wavelet transform based coherent detecting Brillouin optical time domain reflectometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2818~2821
- 宋牟平, 陈 翔. 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[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2818~2821
- 15 Chen Xiang, Song Muping. Envelope demodulation of BOTDR signal based on generalized S transform[J]. *Chinese J. Sensors and Actuators*, 2009, **22**(4): 476~479
- 陈 翔, 宋牟平. 基于广义 S 变换的 BOTDR 信号包络解调[J]. *传感技术学报*, 2009, **22**(4): 476~479
- 16 Chen Xiang. The Envelope Algorithm Research of BOTDR Signal [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. 28~42
- 陈 翔. BOTDR 信号包络解调算法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009. 28~42
- 17 D. E. Newland. Harmonic wavelet analysis [J]. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 1993, **443**(1917): 203~225
- 18 D. E. Newland. Wavelet analysis of vibration I: theory [J]. *J. Vibration and Acoustics*, 1994, **116**(4): 409~416
- 19 D. E. Newland. Wavelet analysis of vibration II: wavelet maps [J]. *J. Vibration and Acoustics*, 1994, **116**(4): 417~425
- 20 D. E. Newland. Harmonic wavelets in vibrations and acoustics [J]. *Phil. Tran. R. Soc. Lond. A*, 1999, **357**(1760): 2607~2625
- 21 D. E. Newland. Ridge and phase identification in the frequency analysis of transient signals by harmonic wavelets [J]. *J. Vibration and Acoustics-Transactions of the ASME*, 1999, **121**(21): 149~155
- 22 C. Cattani, A. Kudreyko. On the discrete harmonic wavelet transform [J]. *Mathematical Problem in Engineering*, 2008, **2008**: 687318

栏目编辑: 张 腾