

基于布里渊光时域分析传感系统的格雷-差分脉冲混合编码技术

罗 源 闫连山 邵理阳 李宗雷 潘 炜 罗 斌

西南交通大学信息光子与通信研究中心, 四川 成都 611756

摘要 鉴于布里渊光时域分析(BOTDA)传感系统中空间分辨率和传感距离存在相互制约的关系,提出了一种结合格雷(Golay)编码技术与差分脉冲对(DPP)技术的混合编码方法。该方法结合了 Golay 编码可提高系统信噪比以及 DPP 可改善系统空间分辨率的优点,相对于 Golay-BOTDA 的 DPP 方法能进一步提高系统信噪比,理论上在相同采样次数下信噪比可提升 6 dB。实验结果表明,采用改进的混合编码可以在 25 km 光纤末端获得 1.6 m 的空间分辨率。同时,与基于 Golay-BOTDA 的 DPP 方法相比,在相同的采样次数下系统信噪比提升了 4.08 dB。

关键词 光通信; 布里渊光时域分析; 差分脉冲对; Golay 编码; 光脉冲编码

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0806002

Golay-Differential Pulse Hybrid Coding Technology Based on Brillouin Optical Time Domain Analysis Sensors

Luo Yuan Yan Lianshan Shao Liyang Li Zonglei Pan Wei Luo Bin

Center for Information Science and Communications, Southwest Jiaotong University,
Chengdu, Sichuan 611756, China

Abstract In Brillouinoptical time domain analysis (BOTDA) sensing system, spatial resolution and sensing distance are restricted by each other. So a novel hybrid pulse coding technology which combines Golay code with differential pulse-width pair (DPP) is proposed. Compared with DPP based on Golay-BOTDA, this method shows a 6 dB enhancement of signal-to-noise ratio (SNR) in theory at the same sample times, as the Golay code can improve the SNR of the system and the DPP technology can ameliorate the spatial resolution. The experimental results indicate that 1.6 m spatial resolution could be achieved at the end of the fiber with the length of 25 km by using the hybrid coding technology, while the hybrid coding technology can get 4.08 dB enhancement of SNR compared with DPP based on Golay-BOTDA.

Key words optical communications; Brillouin optical time domain analysis; differential pulse-width pair; Golay coding; optical pulse coding

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 280.4788

1 引 言

布里渊光时域分析(BOTDA)是一种基于受激布里渊散射的分布式光纤传感技术,它可以通过光纤中的布里渊频移来实现对温度和应力的传感^[1-2]。经过近几年不断的发展^[3-5],该技术在铁路、油气管道、大坝等大型结构的健康监测中被广泛应用^[6-9]。为了得到更高的空间分辨率,光脉冲的宽度要尽可能窄,这会导致接收端的信噪比降低。另一方面,由于脉冲的宽度不能短于声子弛豫时间,BOTDA 系统存在 1 m 的空间分辨率极限^[7]。针对系统信噪比的降低问题,Chai 等^[6-14]提出了将脉冲调制成序列的方法。其中,Mao

收稿日期: 2016-03-10; **收到修改稿日期:** 2016-03-29

基金项目: 国家国际合作专项(2014DFA11170)、国家杰出青年基金(61325023)

作者简介: 罗 源(1992—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: 15608229659@163.com

导师简介: 闫连山(1971—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光子学与通信、光纤传感与检测等方面的研究。

E-mail: lsyan@home.swjtu.edu.cn(通信联系人)

等^[14]提出的 Golay 编码由于其码字组数少且固定,在各种序列中具有一定的优势。差分脉冲对(DPP)技术可以使 BOTDA 不受声子弛豫时间的限制,从而大大提高系统的分辨率^[7]。两种技术的结合可以同时提高信噪比和空间分辨率^[9-11]。

然而,简单将 Golay 码与 DPP 相结合的 BOTDA 系统存在信噪比降低和采样时间变长的问题^[10]。本文通过分析 Golay 编码和 DPP 技术对布里渊系统的信噪比和空间分辨率的影响,提出一种混合编码的方式。理论上证明,相对基于 Golay-BOTDA 的 DPP 方法,混合编码方式可将信噪比提升 6 dB。同时,实验验证了此方法的正确性与有效性。实验结果表明,该方法使信噪比提升了 4.08 dB,空间分辨率达到 1.6 m。

2 混合编码原理

2.1 混合编码方法

简单将 Golay 码^[14]与 DPP^[7]相结合的 BOTDA 的解码先用 Golay-BOTDA^[14]获得两组不同脉冲宽度的解码单脉冲,然后将还原后脉宽不同的两组时域信号作差以获得基于 Golay-BOTDA 的 DPP 结果,整个过程要采集 8 组时域信号。为了解决直接结合方式采集时间长、获得一组 DPP 信号需要用两组 Golay-BOTDA 解码结果的问题,本文提出一种新的混合编码方法。

如图 1 所示,以 8 位 Golay 码序列为例描述直接结合方式与混合序列的不同,基于 Golay-BOTDA 的 DPP 方法,需要对两组 Golay 解码信号作差,以获得 DPP 结果。基于混合序列的 BOTDA 系统,解调方法与 Golay-BOTDA 相同,但由于一组序列包含了两种脉宽,可以省略 DPP 运算。因此混合编码相比基于 Golay-BOTDA 的 DPP 方法可节省一半时间。

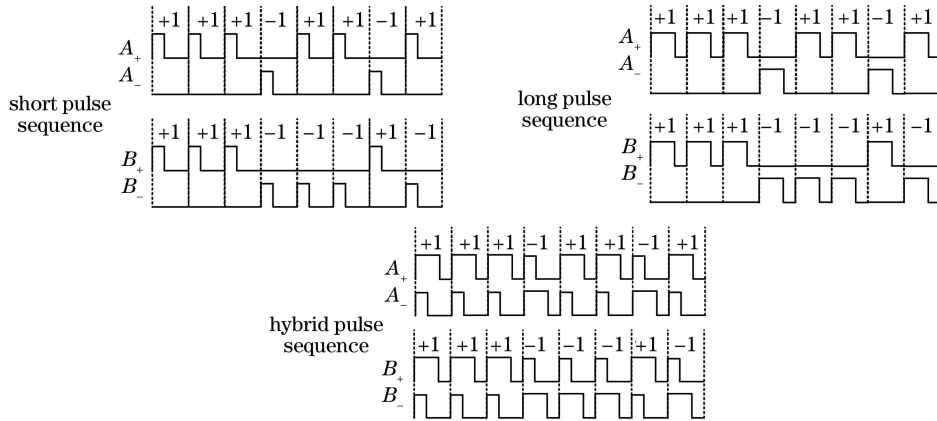


图 1 常规序列及混合序列示意图

Fig. 1 Schematic diagram of conventional sequences and hybrid sequences

2.2 信噪比分析

在线性系统中,假设单脉冲的响应为 $\eta(t)$, Golay 序列脉冲 A_+ 、 A_- 、 B_+ 及 B_- 的系统响应分别为 Ψ_{A_+} 、 Ψ_{A_-} 、 Ψ_{B_+} 和 Ψ_{B_-} ; 则 A 、 B 的估计信号 Ψ'_A 、 Ψ'_B 可表示为

$$\Psi'_A(t) = A \times \eta(t) + [e_{A_+}(t) - e_{A_-}(t)]; \Psi'_B(t) = B \times \eta(t) + [e_{B_+}(t) - e_{B_-}(t)], \quad (1)$$

式中 $e_{A_+}(t)$ 、 $e_{A_-}(t)$ 、 $e_{B_+}(t)$ 、 $e_{B_-}(t)$ 分别为脉冲 A_+ 、 A_- 、 B_+ 、 B_- 的噪声, 噪声 $e(t)$ 满足^[10]

$$\begin{cases} E[e(t)] = 0 \\ E[e(t)^2] = \sigma^2 \\ E[e_i(t)e_j(t)] = 0, i \neq j \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $E(\cdot)$ 表示取平均。通过 Golay 解码算法得到单脉冲的估计信号

$$\hat{\eta}(t) = \frac{1}{2L} (A \oplus \hat{\Psi}_A + B \oplus \hat{\Psi}_B) = \eta(t) + \frac{1}{2L} \sum_{i=1}^L \{A_i \cdot \{e_{A_+}[t + (i-1)\tau] - e_{A_-}[t + (i-1)\tau]\} + B_i \cdot \{e_{B_+}[t + (i-1)\tau] - e_{B_-}[t + (i-1)\tau]\}\}, \quad (3)$$

式中 L 为格雷码序列长度, τ 为序列中的一个脉冲所对应的时隙, 即脉冲与脉冲之间的间隔。信号的噪声为

$$N_G = E \{ [\hat{\eta}(t) - \eta(t)]^2 \} = E \left\{ \left\{ \frac{1}{2L} \sum_{i=1}^L \{ A_i \cdot \{ e_{A_+} [t + (i-1)\tau] - e_{A_-} [t + (i-1)\tau] \} + B_i \cdot \{ e_{B_+} [t + (i-1)\tau] - e_{B_-} [t + (i-1)\tau] \} \} \right\}^2 \right\}, \quad (4)$$

由(2)式和(4)式可得

$$N_G = \frac{1}{L} \sigma^2, \quad (5)$$

$$\hat{\eta}_D(t) = \eta_D(t) + \frac{1}{2L} \sum_{i=1}^L \{ A_i \cdot \{ e_{DA_+} [t + (i-1)\tau] - e_{DA_-} [t + (i-1)\tau] \} + B_i \cdot \{ e_{DB_+} [t + (i-1)\tau] - e_{DB_-} [t + (i-1)\tau] \} \}, \quad (6)$$

$$\hat{\eta}_d(t) = \eta_d(t) + \frac{1}{2L} \sum_{i=1}^L \{ A_i \cdot \{ e_{dA_+} [t + (i-1)\tau] - e_{dA_-} [t + (i-1)\tau] \} + B_i \cdot \{ e_{dB_+} [t + (i-1)\tau] - e_{dB_-} [t + (i-1)\tau] \} \}, \quad (7)$$

式中 $\eta_D(t)$ 与 $\eta_d(t)$ 分别为宽脉冲与窄脉冲对应的 Golay-BOTDA 解码估计信号,二者作差即为基于 Golay-BOTDA 的 DPP 解码结果, $e_{DA_+}(t)$ 、 $e_{DA_-}(t)$ 、 $e_{DB_+}(t)$ 、 $e_{DB_-}(t)$ 分别为宽脉冲序列 A_+ 、 A_- 、 B_+ 、 B_- 的噪声, $e_{dA_+}(t)$ 、 $e_{dA_-}(t)$ 、 $e_{dB_+}(t)$ 、 $e_{dB_-}(t)$ 分别为窄脉冲序列 A_+ 、 A_- 、 B_+ 、 B_- 的噪声。注意到混合编码实质上只进行了一次 Golay 解码过程,所以噪声与 Golay 编码的噪声相同。

假设有两组经 Golay 解码的估计信号,可用(6)式减(7)式推出 DPP 的信号表达式为

$$\hat{\eta}_{DPP}(t) = \hat{\eta}_D(t) - \hat{\eta}_d(t) = \eta_{DPP}(t) + \frac{1}{2L} \times \sum_{i=1}^L \{ A_i \cdot \{ e_{DA_+} [t + (i-1)\tau] - e_{DA_-} [t + (i-1)\tau] - e_{dA_+} [t + (i-1)\tau] + e_{dA_-} [t + (i-1)\tau] \} + B_i \cdot \{ e_{DB_+} [t + (i-1)\tau] - e_{DB_-} [t + (i-1)\tau] - e_{dB_+} [t + (i-1)\tau] + e_{dB_-} [t + (i-1)\tau] \} \}. \quad (8)$$

由(2)式和(8)式可得

$$N_{DPP} = \frac{2}{L} \sigma^2. \quad (9)$$

比较(5)式与(9)式可知,混合编码的信噪比相比直接结合的 BOTDA 信噪比提高 2 倍。同时,由于混合编码更加节省时间,在同样的采样时间下可以采样 2 倍的数据用来平均;理论上在相同的采集次数下,由于混合编码方法可以比基于 Golay-BOTDA 的 DPP 方法还原出 2 倍数量的混合编码还原信号用于平均,所以信噪比提升 4 倍。

3 实验装置及结果分析

图 2 为实验装置图。光源为可调谐分布式反馈(DFB)激光器,其输出功率为 10 dBm,工作波长为 1549 nm;激光器输出接一个 3 dB 耦合器,将光源分成两部分,一部分用作脉冲抽运光,另一部分用作连续

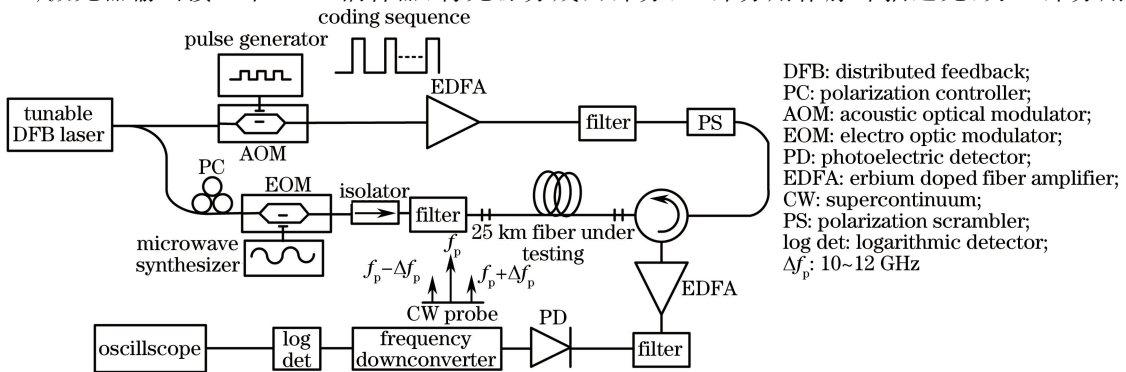


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experiment configuration

探测光。

耦合器的一端接声光调制器(AOM),其消光比为 50 dB,通过控制脉冲生成器发出脉冲信号,得到调制光脉冲序列。生成的脉冲光通过掺铒光纤放大器(EDFA)后,脉冲光峰值功率为 18 dBm,再经过滤波器和起偏器以消除外界干扰对实验结果的影响。

被耦合器分出的另一束光经由电光调制器(EOM),被微波源发出的正弦信号调制,通过控制微波源发出的频率 f_p 来对光纤的布里渊增益区间进行扫描。微波源的扫描频率区间为 10.57~10.73 GHz。为了保护电光调制器,将一个隔离器置于调制器的输出端。在连续光进入测试光纤前,通过滤波器得到调制信号的上边带信号。

在接收端,斯托克斯光会被一个光电探测器转换为电信号,频率为 10.57~10.73 GHz。为了方便采集电信号,对电信号进行 9.8 GHz 下变频,得到电信号的频率范围为 770~1130 MHz。通过对数检波,最后用示波器采集。

实验采样率为 250 MSa/s,编码序列为 256 bit Golay 互补序列,测试光纤长度为 25 km,在光纤尾部取一段,并均匀加热到 70 °C。实验中,分别把脉宽为 40 ns 和 30 ns 的混合编码光脉冲、脉宽为 40 ns 的 Golay 编码光脉冲和脉宽为 30 ns 的 Golay 编码光脉冲注入到测试光纤中。室温下光纤的布里渊频移为 10.62 GHz,70 °C 时光纤的布里渊频移为 10.68 GHz。

图 3 为测试光纤-混合编码的布里渊增益谱分布,被加热的光纤的布里渊频移发生了改变,从三维(3D)布里渊图中可以看到明显的频率漂移。

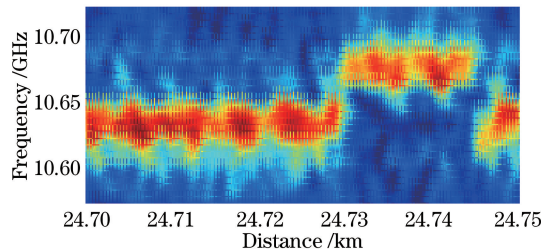


图 3 加温局部三维布里渊增益谱

Fig. 3 Local 3D Brillouin gain spectrum under heating condition

为了观察混合序列信号相比于直接结合序列信号是否有更好的信噪比,在实验中向光纤注入 3 组不同的 Golay 脉冲,分别为脉宽为 40 ns 和 30 ns 的混合序列、40 ns 的 Golay 序列以及 30 ns 的 Golay 序列。对混合序列采样 1000 次,而对 Golay 序列分别采样 1000 次和 500 次,以便观察在相同采样次数下信噪比提升效果以及在相同采样时间下的信噪比提升效果。

图 4 为抽运光与探测光频差为 10.62 GHz 时,采用不同编码方式得到的单脉冲时域信号。从图中可以看出混合编码优于其他两种结果,尤其是加热的部分。混合编码在加热部分可以看到明显的功率变化,而另外两组的变化则不明显。图 5 为混合脉冲与传统脉冲的布里渊增益谱分布,从图中可以看出混合脉冲的信噪比比其他两组高。为得到更精确的信噪比,本文借用 BOTDA 系统信噪比计算方法^[15]:

$$R_{SN} = \frac{V_{BOTDA}^2}{\sigma_v^2}, \quad (10)$$

式中 V_{BOTDA} 为 BOTDA 的尾部信号电压, σ_v 为噪底的标准差。根据(10)式,对扫描频率为 10.62 GHz 的 BOTDA 信号求解,并得到 3 种情况的信噪比分别为 16.5238 dB, 14.7853 dB, 12.4396 dB。可以看出用混合编码时,在相同的平均次数下,信噪比比直接结合方法提高 1.74 dB,在相同采样次数下可提高 4.08 dB。

如图 6 所示,对时域信号进行洛伦兹拟合^[16]以获得布里渊频移并分析系统的空间分辨率。理论上 40 ns 和 30 ns 的混合脉冲方法的空间分辨率可达到 1 m。由图 6 中布里渊频移的下降沿可以看出,从 10.68 GHz 下降到 10.62 GHz 所用空间距离为 1.2 m;而由上升沿可见,从 10.62 GHz 上升到 10.68 GHz 所用空间距离为 2 m。对二者取平均得到空间分辨率为 1.6 m。

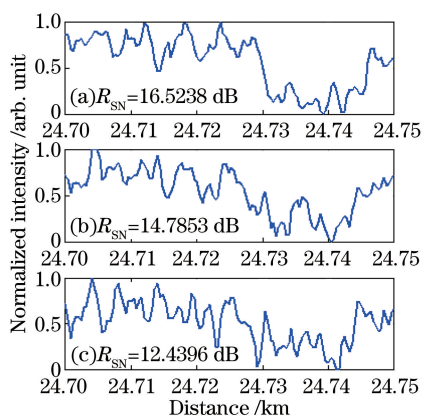


图 4 24 km 至 24.75 km 信号的时域分布。

- (a)混合编码 1000 次平均结果；
- (b)直接结合方法 1000 次平均结果；
- (c)直接结合方法 500 次平均结果

Fig. 4 Distribution of signal in time domain from 24 km to 24.75 km.

- (a) 1000 times average results of hybrid sequence;
- (b) 1000 times average results of conventional sequence;
- (c) 500 times average results of conventional sequence

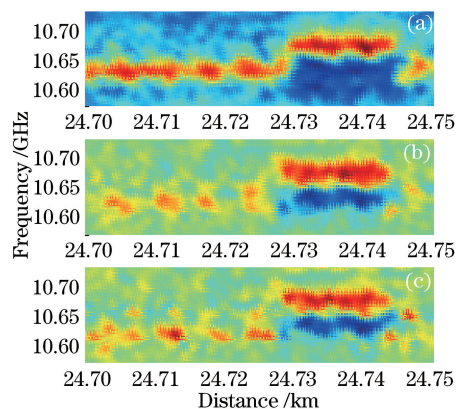


图 5 24 km 至 24.75 km 信号的布里渊增益谱。

- (a)混合编码 1000 次平均结果
- (b)直接结合方法 1000 次平均结果；
- (c)直接结合方法 500 次平均结果

Fig. 5 Brillouin gain spectrum of signal from 24 km to 24.75 km.

- (a) 1000 times average results of hybrid sequence;
- (b) 1000 times average results of conventional sequence;
- (c) 500 times average results of conventional sequence

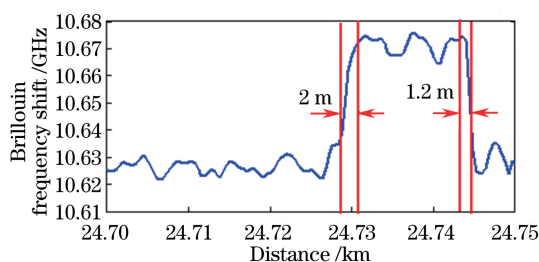


图 6 布里渊频移

Fig. 6 Brillouin frequency shift

4 结 论

详细分析了 Golay 码和 DPP 技术对 BOTDA 系统的影响。针对直接结合两种技术的 BOTDA 系统所存在的信噪比降低和采样时间变长问题,提出了一种混合编码方法,并从理论上证明了其优越性。实验中采用单位脉冲宽度为 40 ns 和 30 ns 的混合脉冲对 25 km 的光纤进行测试,在光纤末端获得了空间分辨率为 1.6 m、信噪比为 16.52 dB 的信号,相比直接结合的方法信噪比提高了 4.08 dB。实验结果证明了混合编码脉冲技术可以避免 DPP 与 Golay 方法结合带来的信噪比降低、采样时间变长的问题,是一种有效可靠的序列脉冲 BOTDA 编解码方法。该方法有望结合其他双极性编码(如 Hadamard 编码),使 BOTDA 系统获得更远的传感距离。

参 考 文 献

- 1 Li Z, Yan L, Shao L, *et al.* Enhanced performance in coherent BOTDA sensor with reduced effect of chromatic dispersion [J]. Optics Express, 2015, 23(23): 30483-30490.
- 2 Liu R M, Babanajad S K, Taylor T, *et al.* Experimental study on structural defect detection by monitoring distributed dynamic strain[J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(11): 115038.
- 3 Zhao Shiqi, Pang Fufei, He Mengting, *et al.* Research on the signal processing in optical fiber coherent optical time domain reflectometer based on grey scale image[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0305001.

- 赵世琦, 庞拂飞, 贺梦婷, 等. 基于灰度图像的光纤相干光时域反射计信号处理研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0305001.
- 4 Li Yongqian, Li Xiaojuan, An Qi. New method to improve the performance of Brillouin optical time domain reflectometer system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0106003.
李永倩, 李晓娟, 安琪. 提高布里渊光时域反射系统传感性能的方法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0106003.
- 5 Feng Kaibin, Song Muping, Xia Qiaolan, *et al.* High-resolution distributed optical-fiber sensing technology based on direct-detecting coherent optical time-domain reflectometer[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0106002.
冯凯滨, 宋牟平, 夏俏兰, 等. 基于直接检测相干光时域反射计的高分辨率分布式光纤传感技术[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0106002.
- 6 Chai J, Zhang M, Liu Y, *et al.* Distributed fiber temperature sensor using a laser diode modulated by a pseudo-random bit sequence[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(8): 080604.
- 7 Li W, Bao X, Li Y, *et al.* Differential pulse-width pair BOTDA for high spatial resolution sensing[J]. Optics Express, 2008, 16(26): 21616-21625.
- 8 Horiguchi T, Tateda M. BOTDA-non destructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: Theory[J]. Journal of Lightwave Technology, 1989, 7(8): 1170-1176.
- 9 Liang H, Li W, Linze N, *et al.* High-resolution DPP-BOTDA over 50 km LEAF using return-to-zero coded pulses[J]. Optics Letters, 2010, 35(10): 1503-1505.
- 10 Liang Hao. Research of Brillouin distributed optical fiber sensor based on coded pulses[D]. Nanjing: Nanjing University, 2011.
梁浩. 基于序列编码探测脉冲的布里渊光纤传感器的研究[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- 11 Soto M A, Taki M, Bolognini G, *et al.* Optimization of a DPP-BOTDA sensor with 25 cm spatial resolution over 60 km standard single-mode fiber using simplex codes and optical pre-amplification[J]. Optics Express, 2012, 20(7): 6860-6869.
- 12 Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F. Analysis of pulse modulation format in coded BOTDA sensors[J]. Optics Express, 2010, 18(14): 14878-14892.
- 13 Minardo A, Bernini R, Zeni L. Numerical analysis of single pulse and differential pulse-width pair BOTDA systems in the high spatial resolution regime[J]. Optics Express, 2011, 19(20): 19233-19244.
- 14 Mao Y, Guo N, Yu K L, *et al.* 1-cm-spatial-resolution Brillouin optical time-domain analysis based on bright pulse Brillouin gain and complementary code[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(6): 2243-2248.
- 15 Zornoza A, Sagues M, Loayssa A. Self-heterodyne detection for SNR improvement and distributed phase-shift measurements in BOTDA[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(8): 1066-1072.
- 16 Liang Hao, Zhang Xuping, Li Xinhua, *et al.* Design and implementation of data fitting algorithm for Brillouin back scattered-light spectrum data[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(4): 875-879.
梁浩, 张旭苹, 李新华, 等. 布里渊背向散射光谱数据拟合算法设计与实现[J]. 光子学报, 2009, 38(4): 875-879.