

长距离衰减型布里渊光时域分析仪的性能

沈逸铭 宋牟平 董沛君

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要 在布里渊光时域分析仪(BOTDA)中,需要检测由脉冲激励光和直流连续探测光的非线性作用产生的受激布里渊散射信号。根据激励光和探测光采用的不同频差,可分为激励光频率高于探测光的增益型和激励光频率低于探测光的衰减型。由于受激布里渊散射作用引起的功率损失影响,增益型 BOTDA 的传感距离和信噪比(SNR)受到一定限制。对于衰减型布里渊光时域分析,进行了增益型和衰减型传感模式的性能分析比较,并以 100 km 传感系统为例进行了系统研究。研究结果表明,衰减型 BOTDA 具有更好的传感距离和检测精度,在同样传感距离下衰减型的最差检测信噪比比增益型高 10 dB 以上,因此更适用于长距离分布式光纤传感器。

关键词 传感器;布里渊光时域分析;增益型;衰减型;信噪比

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.s205005

Performance of Long-Range Loss-Mechanism Brillouin Optical-Fiber Time-Domain Analysis

Shen Yiming Song Muping Dong Peijun

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

Abstract In the system of Brillouin optical-fiber time-domain analysis (BOTDA), stimulated Brillouin scattering signal which produced by the interaction of pulse pump and DC continuous wave (CW) probe light should be detected. According to the frequency difference between two optical waves, BOTDA systems can be made as two types. One is the gain-mechanism, whose frequency of the pump pulse light is higher than the CW probe, and the other is the loss-mechanism, whose frequency of the pump pulse light is lower than the CW probe. In the gain-mechanism BOTDA, the sensing distance and the signal-to-noise ratio (SNR) are limited for the loss of pulse pump by the Brillouin interaction. The loss-mechanism BOTDA is studied by comparing the gain-mode BOTDA. The scheme of 100 km's loss-mechanism BOTDA is set as the sensing system. It is found that the loss-mechanism BOTDA has better sensing distance and detecting performance than the gain-mechanism, and the worst SNR of the loss-mechanism is above 10 dB larger than the gain gain-mechanism under the same distance. So, the loss-mechanism BOTDA is a better choice for the long-range distributed optical-fiber sensing.

Key words sensors; Brillouin optical time domain analyzer; gain-mechanism; loss-mechanism; signal-to-noise ratio

OCIS codes 060.2310; 060.2340; 060.2370

1 引言

布里渊光时域分析(BOTDA)^[1]是近期受到高度关注的一种分布式光纤传感(DOFS)^[2]技术,不仅具有一般光纤传感器的无辐射干扰性、抗电磁干扰性好、化学稳定性好等优点,而且可以在沿光纤路径上同时得到被测量场在时间和空间上的连续分布信息。其传感原理是,传感光纤两端入射的脉冲激

励光与直流探测光,在传感光纤中发生受激布里渊散射(SBS)作用,通过检测直流探测光经过非线性作用后的变化,获得传感光纤各处的受激布里渊散射信号^[3],再根据布里渊散射增益谱与传感信息的关系计算出传感信息^[4]。

布里渊光时域分析仪利用了受激布里渊散射信号较强的特点,在一定程度上克服了拉曼散射传

收稿日期: 2012-06-10; 收到修改稿日期: 2012-07-06

作者简介: 沈逸铭(1985—),男,硕士研究生,主要从事分布式光纤传感技术方面的研究。E-mail: shenym@zju.edu.cn

导师简介: 宋牟平(1971—),男,博士,副教授,主要从事光子器件、光纤通信和光纤传感等方面的研究。

E-mail: songmp@zju.edu.cn(通信联系人)

感^[5]和布里渊光时域反射计(BOTDR)^[6]信号微弱很难检测的缺点。对于布里渊光时域分析仪,根据脉冲激励光和直流光之间的频差,分为激励光频率高于探测光的增益型和激励光频率低于探测光的衰减型。在普通增益型布里渊光时域分析仪中,由于受激布里渊散射作用,脉冲激励光能量随传感距离衰减,基于光脉冲功率和宽度(空间分辨率)的影响,其传感性能^[7]受到了抑制。目前一些对于改进分布式布里渊光时域分析的方法已被提出,例如通过结合拉曼放大效应增强受激布里渊信号^[8],使得传感距离大幅增加;通过两种不同脉宽的脉冲调制兼顾了空间分辨率和检测信号强度的关系,使得在保证空间分辨率的情况下提高了传感距离^[9];通过引入消偏振衰落技术,提高了BOTDA的测量精度^[10]。

对于衰减型布里渊分布式光时域分析,受激布里渊散射作用是把直流探测光的能量转移给脉冲激励光,从而在一定程度上减少了由于脉冲激励光功率损失带来的性能下降。这里从信号强度和信噪比(SNR)的角度,通过对增益型和衰减型传感模式的性能分析比较,并以100 km传感系统为例进行了系统性能研究。研究表明,衰减型BOTDA传感模式具有更好的传感距离和检测精度,更适合于组建长距离分布式光纤传感器。

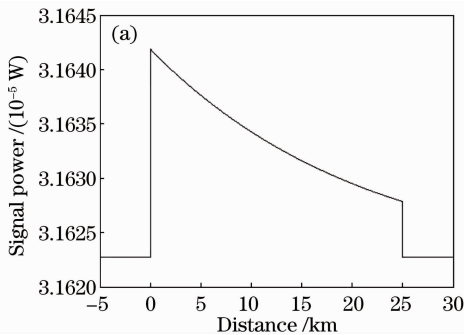
2 原理分析

在布里渊光时域分析仪模型中,采用了脉冲光和直流连续(CW)光作为激励光和探测光在光纤两端输入,如图1所示。两路频率相差 ν_B 的光在光纤中产生非线性相互作用,遵循两个耦合方程式^[3]:

$$\frac{dI_s}{dz} = -g_B I_p I_s + \alpha I_s, \quad (1)$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -g_B I_p I_s - \alpha I_p, \quad (2)$$

式中 I_s 和 I_p 分别为斯托克斯光和抽运光的光强,



分别代表脉冲光 I_p 和直流连续光 I_{CW} , g_B 为布里渊增益系数,取决于光纤和频差 ν_B , α 为光损耗系数。当直流光频率为 $\nu_{CW} = \nu_p - \nu_B$ 时, I_{CW} 为斯托克斯光,代替 I_s ,脉冲光 I_p 代替抽运光 I_p ,此结构为增益型BOTDA结构。因为受激布里渊散射相对 I_{CW} 很小,所以在直流光传播过程中,近似

$$I_{CW}(z) = I_{CW}(L) \exp[-\alpha(L-z)], \quad (3)$$

式中 L 为光纤总长度,代入耦合方程可得

$$I_p(z) = I_p(0) \exp(-\alpha z) \exp\{g_B I_{CW}(L) \times \exp(-\alpha L) [\exp(\alpha z - 1) / \alpha]\}. \quad (4)$$

对于(1)式和(2)式,若脉冲光宽度为 W ,在 Wc/n (c 为光速, n 为折射率)的距离内等式两边乘上 dz 并关于 z 积分,则等式右边第一项为受激布里渊散射的光强 I_B ,即

$$I_B = \int_z^{z+Wc/n} g_B I_p I_s dz. \quad (5)$$

由于 I_{CW} 和 I_p 在 Wc/n 内相对变化很小,可近似为恒定值 $I_{CW}(z)$ 和 $I_p(z)$ 。于是将(3)式和(4)式代入(5)式,可得到受激布里渊散射信号的强度为^[1]

$$I_B(z) = \mp g_B (Wc/n) I_{CW}(L) \exp(-\alpha L) I_p(0) \times \exp(-\alpha z) \exp\{g_B I_{CW}(L) \exp(-\alpha L) \times [\exp(\alpha z - 1) / \alpha]\}, \quad (6)$$

式中当 $\nu_{CW} = \nu_p - \nu_B$ 时取负号;当 $\nu_{CW} = \nu_p + \nu_B$ 时取正号,即衰减型BOTDA结构^[11]。

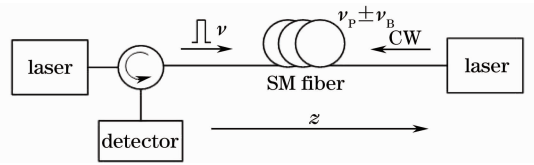


图1 布里渊光时域分析的简单结构

Fig. 1 Simple structure of BOTDA

根据(6)式,可以近似地计算出检测器接收到的布里渊散射信号。图2给出了25 km下BOTDA的接收信号,增益型BOTDA为直流光叠加SBS光信

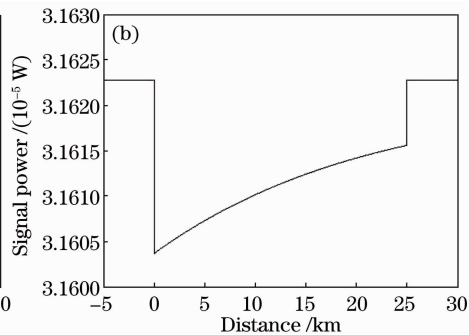


图2 (a)增益型/(b)衰减型布里渊光时域分析的接收端信号

Fig. 2 Receipt of signal in (a) gain/ (b) loss BOTDA

号,衰减型则是减去 SBS 光信号。

3 性能研究

要分析两种布里渊光时域分析的性能,必须考虑到 SBS 的大小和信噪比,引入一个信噪比公式^[1]

$$R_{SN} = 4(I_s M)^2 / [(\sqrt{\sigma_1^2} + \sqrt{\sigma_0^2})^2 B], \quad (7)$$

式中 B 为接收机的带宽,其他参数参考文献[1]。这里以 50 km 为例,取脉冲光峰值为 5 mW,直流光功率为 1 mW,选用了波长为 1550 nm 光源对应的所有参数值(下文光源默认波长为 1550 nm)。图 3 分别表示增益型 BOTDA 的 SBS 时域信号、衰减型

BOTDA 的 SBS 时域信号以及他们对应的信噪比曲线。从图 3 中可以看出,衰减型信号最弱处在光纤中间,增益型在末端;衰减型 BOTDA 的信号较增益型要强,最低信噪比也要高得多。

根据信噪比将噪声信号加入到 SBS 信号上,以 2 m 为空间分辨率,10 ns 为采样周期,进行对信号叠加 500 次的模拟仿真,得到接收端的模拟信号,见图 4。比较两个图的信号可以看出,50 km 下衰减型 BOTDA 的接收端信号质量明显高于增益型 BOTDA 的接收信号。因此初步认为,在长距离下使用衰减型布里渊光时域分析性能要好于增益型。

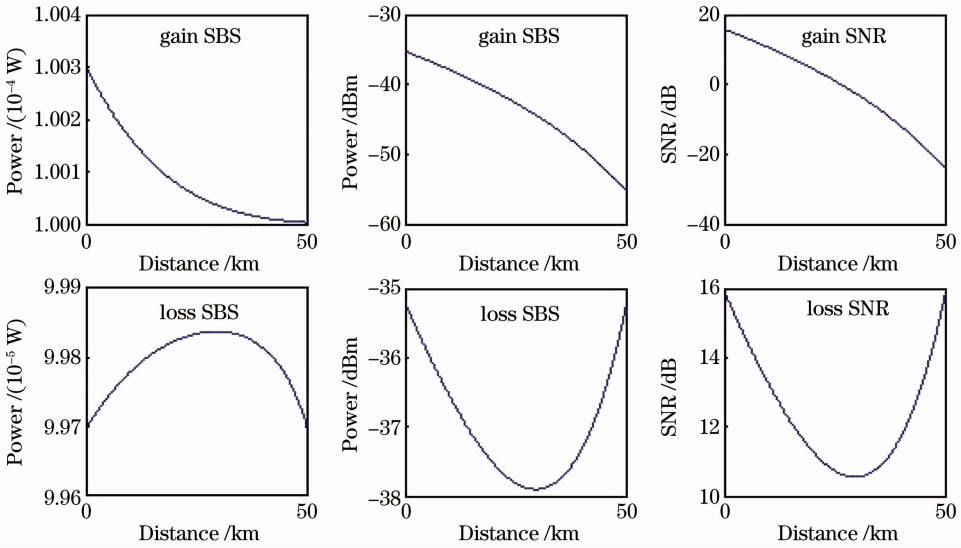


图 3 增益型/衰减型布里渊光时域分析的时域信号和对应信噪比

Fig. 3 Time domain signal and SNR in gain/loss BOTDA

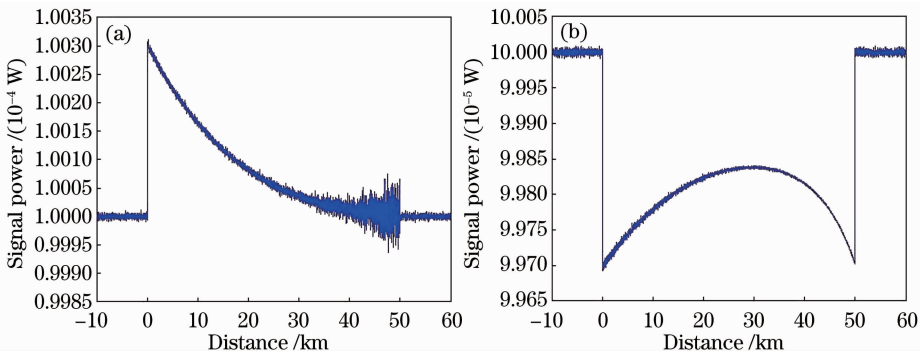


图 4 50 km 下(a)增益型/(b)衰减型布里渊光时域分析的接收信号模拟

Fig. 4 Simulation of SBS signal in (a) gain/(b) loss BOTDA along a 50 km optical fibre

为了分析 SBS 信号质量对传感精度的影响,这里要引用受激布里渊散射关于布里渊频移的增益公式和布里渊频移与温度/应变的线性关系公式^[3,4]:

$$g_B = \frac{\gamma g_0 (\Gamma_B/2)^2}{[\Omega_B(T) - \Omega]^2 + (\Gamma_B/2)^2}, \quad (8)$$

$$\Delta V_B = C_{vT} \Delta T + C_{\epsilon E} \Delta \epsilon, \quad (9)$$

式中 Γ_B 为布里渊增益带宽, Ω_B 为改变环境后的布里渊频移, Ω 为原始布里渊频移, r 为偏振系数, g_0 为谱线中心增益系数, ΔV_B 为环境改变引起的布里渊频移, T 为温度, C_{vT} 为温度系数, $C_{\epsilon E}$ 为应变系数, ϵ 为应变变量。

根据实际测量普通单模光纤 G652 对应的温度

系数 C_{vT} 约为 $1.1 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$, 令 $\Gamma_B = 50 \text{ MHz}$, 这里只考虑单参量温度的精度, 即受到温度影响后的布里渊频移, 根据公式可以得到测温精度和信噪比的关系。下面模拟出了叠加了噪声的布里渊增益谱的估算方法, 见图 5。

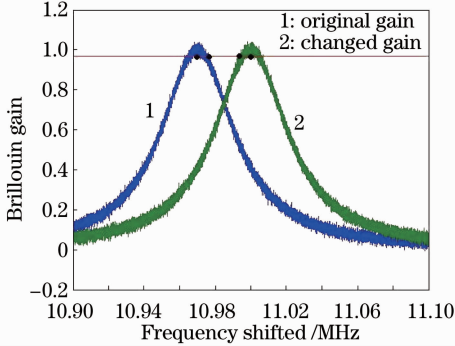


图 5 叠加高斯噪声的布里渊增益谱

Fig. 5 Brillouin gain spectra with white Gaussian noise

图 5 左右两曲线分别为同一空间距离下的原始布里渊增益谱和频移后的增益谱。基于一般布里渊传感都采用扫频搜索最大布里渊增益值的方法, 所以在不考虑偏振态影响^[12]的情况下, 理论上测量频移中心位置的误差期望为图中水平线交于增益谱曲线的相邻两黑点之间的频率差值。于是根据(8)式和(9)式近似有

$$P_B \left(1 + \frac{1}{R_{SN}}\right) \frac{\gamma g_0 (\Gamma_B/2)^2}{(\sigma T \times C_{vT})^2 + (\Gamma_B/2)^2} = P_B \frac{\gamma g_0 (\Gamma_B/2)^2}{[\Omega_B(0) - \Omega]^2 + (\Gamma_B/2)^2}, \quad (10)$$

式中 σT 表示温度误差期望, (9) 式在只考虑温度的情况下频率差可以由 $\sigma T C_{vT}$ 表示; $P_B(1+1/R_{SN})$ 为叠加了噪声的受激布里渊散射信号的功率期望; $\Omega_B(0)$ 表示布里渊增益最大值处的频率, 即 Ω ; 化简可得

$$\frac{1}{R_{SN}} = \frac{(\sigma T \times C_{vT})^2}{(\Gamma_B/2)^2}. \quad (11)$$

可以算出, 增益型 BOTDA 叠加 500 次的情况下最低信噪比处在尾部, 关于噪声的温度误差期望是 10°C ; 而衰减型 BOTDA 最低信噪比处为 30 km 处, 关于噪声的温度误差期望是 0.5°C 。对于不同的光纤长度的和不同的光源功率做多次仿真计算, 给出最低传感精度最佳的情况下增益型和衰减型的性能比较, 见表 1。可以看出, 随着距离增加, 增益型 BOTDA 的传感性能下降明显, 而衰减型 BOTDA 通过调整直流光强度, 仍能保持很好的精确性。在同样的传感距离下衰减型 BOTDA 的最差信噪比可相对改善 10 dB 以上。图 6 为衰减型 BOTDA 的信噪比、温度测量精度随着传感距离加长的变化。

表 1 不同情况下 BOTDA 温度测量结果

Table 1 Temperature testing results in different conditions of BOTDA

| Length of fibre / km | Pulse / mW | CW light / mW | | Position of lowest SNR / km | | SNR / dB | | Minimum signal power / dBm | | Temperature error / $^\circ\text{C}$ | |
|----------------------|------------|---------------|------|-----------------------------|------|----------|------|----------------------------|-------|--------------------------------------|------|
| | | Gain | Loss | Gain | Loss | Gain | Loss | Gain | Loss | Gain | Loss |
| 10 | 5 | 1 | 1 | 10 | 0 | 5 | 17.2 | -32 | -27.2 | 2 | 0.3 |
| 20 | 5 | 1 | 1 | 20 | 0 | -5 | 17 | -39 | -29.2 | 5 | 0.3 |
| 30 | 5 | 1 | 1 | 30 | 10 | -11 | 16 | -45 | -32 | 10 | 0.5 |
| 40 | 5 | 1 | 1 | 40 | 20 | -16 | 14 | -51 | -34.5 | 18 | 1 |
| 50 | 5 | 1 | 1.5 | 50 | 20 | -22 | 14 | -55 | -35 | >20 | 1 |
| 60 | 5 | 1 | 2 | 60 | 25 | -28 | 12 | -60 | -35 | >20 | 2 |

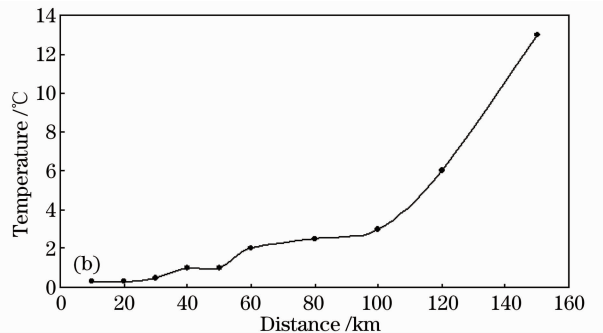
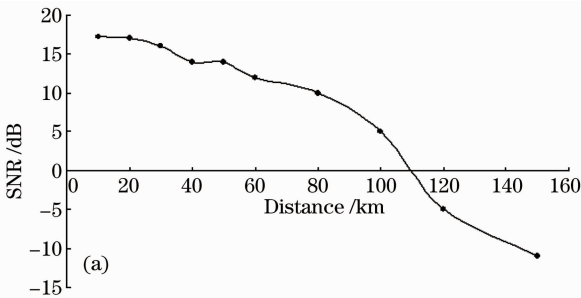


图 6 不同光纤长度下的最低信噪比(a)和温度误差(b)期望

Fig. 6 Expected values of lowest (a) SNR and (b) temperature error in different lengths of optical fibre

4 系统分析

根据模拟计算得到的数据结构,设计了 100 km 的衰减型 BOTDA 模型。此系统使用峰值功率为 5 mW 的脉冲光作为斯托克斯光,1.9 mW 的直流光作为抽运光,利用微波源和电光调制器(EOM)调制使得脉冲光频率 $\nu_P = \nu_{CW} - \nu_B$, ν_B 约为 11 GHz。最后由环形器输出信号光,由光电探测器(PD)接收见

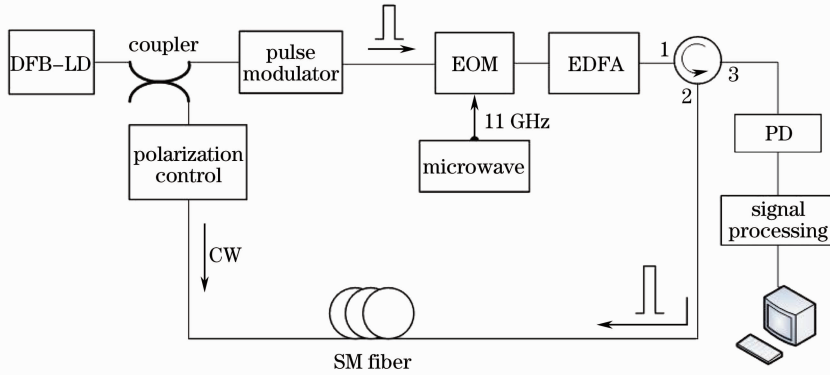


图 7 衰减型 BOTDA 系统框图

Fig. 7 System configuration of the gain BOTDA

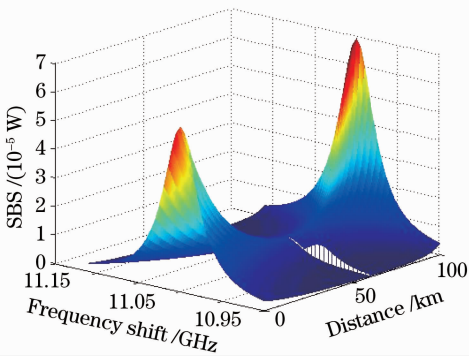


图 8 100 km 下的受激布里渊信号的增益谱

Fig. 8 SBS gain spectrum along a 100 km optical fibre

在该增益模型下,按照普通布里渊分布式传感仪的采样方式对受激布里渊信号进行模拟扫频,经过叠加 1000 次处理,搜索信号增益最大值,以获得准确的布里渊斯托克斯频移。这里分别选用 5 MHz 间隔和 10 MHz 间隔从 11 GHz 开始扫频,分析此衰减型 BOTDA 模型的性能。扫频模拟结果如图 9、图 10 所示。图 9 中最下方的扫频为频移 11 GHz,依次往上是 10.99,10.98,10.90 GHz;图 10 同理。

为了可以更清晰地观察到 60 km 处的扫频情况,每次扫频模拟都用了不同颜色的曲线(彩图详见网络电子版)。图中第 4 次扫频获得了整根光纤的布里渊增益最大值,第 2 次扫频获得了 60 km 布里渊增益最大值,以 10 MHz 间隔扫频信号没有出现重叠现象。图 10 是以 5 MHz(对应约 4.5 °C)为间

图 7。图中 DFB-LD 为分布反馈半导体激光器,EDFA 为掺铒光纤放大器。

此模型整个光纤上的 SBS 信号三维增益谱翻转后如图 8 所示。假设 60 km 处(信噪比最低)温度发生变化,造成 10 MHz 的布里渊频移,则在该处的增益谱发生频移,在图中形成频移了的增益谱截面。

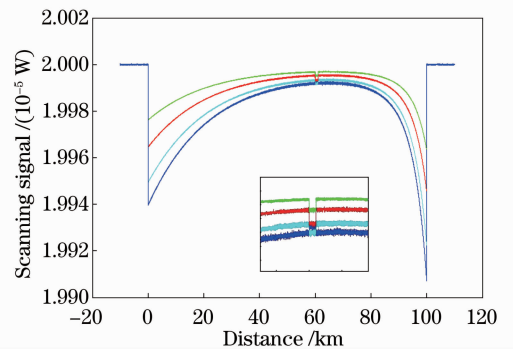


图 9 10 MHz 间隔扫频下的受激布里渊信号

Fig. 9 SBS signal detected by scanning the frequency at intervals of 10 MHz

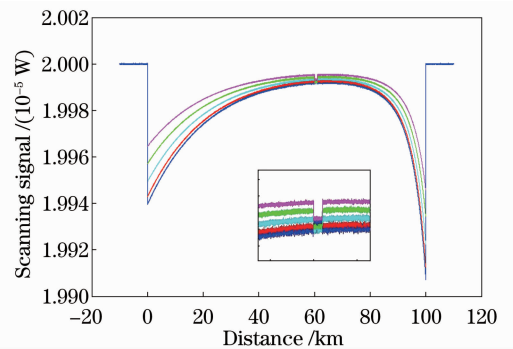


图 10 5 MHz 间隔扫频下的受激布里渊信号

Fig. 10 SBS signal detected by scanning the frequency at intervals of 5 MHz

隔的扫频,在局部放大图中可以看到,第 1 次扫频和第 2 次扫频出现了边缘重叠现象,60 km 处出现了

部分信号重叠现象,会出现最大值判断错误的情况。该系统模拟了 100 km 衰减型布里渊光时域分析的信号检测,表明了衰减型 BOTDA 超远距离分布式传感的可行性和良好性能。

5 结 论

布里渊光时域分析仪有增益型和衰减型,由于受激布里渊散射作用,增益型布里渊光时域分析仪中脉冲激励光衰减较快,从而影响检测信号,而衰减型布里渊光时域分析仪可降低此影响。研究表明相对于普通增益型,衰减型布里渊光时域分析仪在传感距离和精度上具有优势。在同样的传感距离下,衰减型布里渊光时域分析仪的最差信噪比可改善 10 dB 以上。因此衰减型布里渊光时域分析仪较增益型更适合长距离的传感。研究结果对组建长距离分布式光纤传感器具有直接的应用价值。

参 考 文 献

- 1 T. Horiguchi, M. Tateda. BOTDA-nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction; theory[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(8): 1170~1176
- 2 Xu Ping, Pang Fufei, Chen Na *et al.*. A quasi-distributed optical fiber temperature sensor based on fresnel reflection[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1955~1958
徐平, 庞拂飞, 陈娜等. 基于菲涅耳反射的准分布式光纤温度传感器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1955~1958
- 3 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,

2002. 223~240
G. P. Agrawal. *非线性光纤光学原理及应用*[M]. 贾东方, 余震虹译. 北京: 电子工业出版社, 2002. 223~240
- 4 H. Naruse, M. Tateda, H. Ohno *et al.*. Linear strain distribution dependence of the Brillouin gain spectrum [C]. *Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, 2002, **1**: 309~312
- 5 S. Adachi. Distributed optical fiber sensors and their applications [C]. *SICE Annual Conference*, 2008. 329~333
- 6 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. Technol. Lett.*, 1997, **9**(3): 360~362
- 7 L. F. Zou, X. Bao, S. V. Afshar *et al.*. Dependence of the Brillouin frequency shift on strain and temperature in a photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(13): 1485~1487
- 8 A. Zornoza, R. A. Pérez-Herrera, César Elosúa *et al.*. Long-range hybrid network with point and distributed Brillouin sensors using Raman amplification [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(9): 9531~9541
- 9 L. Zou, X. Bao. Distributed fiber Brillouin strain and temperature sensor with centimeter spatial resolution by coherent probe-pump technique[C]. *SPIE*, 2005, **5855**: 68~71
- 10 Song Muping, Zhuang Baiyun. Study on polarization induced fading eliminated technique in Brillouin optical time domain analysis sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 711~715
宋牟平, 庄白云. 布里渊光时域分析传感器的消偏振衰落技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 711~715
- 11 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
- 12 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

栏目编辑:何卓铭