

文章编号: 0258-7025(2010)04-1037-05

基于布里渊时域分析的分布式光纤传感入侵定位系统

洪小斌 郭宏翔 伍 剑

(北京邮电大学信息光子学与光通信研究院 信息光子学与光通信教育部重点实验室, 北京 100876)

摘要 基于布里渊时域分析(BOTDA)对温度和应变的检测原理,构建了分布式光纤传感入侵定位系统。该系统只检测应变事件位置,不检测温度和应变绝对值,因此简化了 BOTDA 技术中复杂的频率检测方法。系统以脉冲光作为抽运光,反方向传输的连续光作为探测光。分析表明该入侵定位系统在抽运光产生的布里渊峰值频率小于连续光的频率时具有较高的灵敏度,存在一最佳频率偏移使探测灵敏度最高。当传感光纤所处温度改变时,可以通过调节抽运光频率使系统始终保持最佳的灵敏度。

关键词 光纤光学;分布式光纤传感;布里渊时域分析;入侵检测;应变检测

中图分类号 TP212 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103704.1037

A Brillouin Optical Time Domain Analysis Based Distributed Fiber Optic Intrusion Sensor System

Hong Xiaobin Guo Hongxiang Wu Jian

(Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Ministry of Education, Institute of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract A distributed fiber optic intrusion sensor system based on Brillouin optical time domain analysis (BOTDA) is proposed. The absolute values of temperature and strain are not required in this system. So the complicated frequency analyzer is omitted, which simplifies the BOTDA system. An optical pulsed signal is used as pump and a continuous wave optical signal in counter propagating direction is used as the detected light. It is concluded that the best sensitivity can be achieved when the frequency of continuous wave is higher than the Brillouin peak gain frequency produced by pump and there exists an optimal frequency offset that makes the highest sensitivity. When the temperature of the optical fiber changes, the optimal sensitivity can be achieved by adjusting the pump frequency.

Key words fiber optics; distributed fiber optic sensor; Brillouin optical time domain analysis; intrusion detection; strain detection

1 引 言

光纤传感定位系统通过检测光纤的应变来确定事件发生的位置,并不需要知道应变的准确大小。目前提出的传感定位方法都是通过干涉方法检测应变引起的光相位变化来定位的,这种方法灵敏度高,但对光源的线宽和频率稳定度要求很高,由于外界环境对干涉的影响,定位准确率也不理想。目前提出的事件定位系统多采用 Sagnac 结构来实现,文献[1]利用双 Sagnac 干涉环实现了长度为 180 m,定位精度为 1 m 的检测;文献[2]采用波分复用方式

组成双 Sagnac 干涉环实现了环路 40 km 定位精度 100 m 的定位系统;文献[3]结合了 Sagnac 干涉和迈克耳孙干涉结构实现了 200 m 的定位;文献[4]采用双马赫-曾德尔干涉结构实现了 149 m 的定位分辨率;文献[5]通过分析 Sagnac 干涉信号的频谱来确定事件发生的位置,实验证明在 40 km 干涉环中定位精度为几十米。文献[6]采用相干光时域反射(OTDR)原理^[7],但使用高稳定窄线宽光源代替传统 OTDR 中的宽谱光源。

分布式布里渊传感器利用光纤中的布里渊散

收稿日期: 2009-07-14; 收到修改稿日期: 2009-08-16

基金项目: 高等学校学科创新引智计划(B07005)资助课题。

作者简介: 洪小斌(1971—),男,博士,讲师,主要从事光纤网络和光纤传感方面的研究。E-mail: xbhong@bupt.edu.cn

射^[8]产生的信号频移来测量应变和温度,该技术结合 OTDR 技术可以检测应变和温度随光纤长度的分布,主要包括布里渊时域反射(BOTDR)^[9,10]和布里渊时域分析(BOTDA)^[11]。BOTDR 通过测量抽运脉冲产生的反向传输的反斯托克斯光频谱来进行应变和温度分析,而 BOTDA 在光纤一端输入抽运光,另一端输入探测光,通过分析探测光的频谱变化得到应变和温度分布。由于 BOTDA 在测量分辨率更具优势,受到广泛关注。

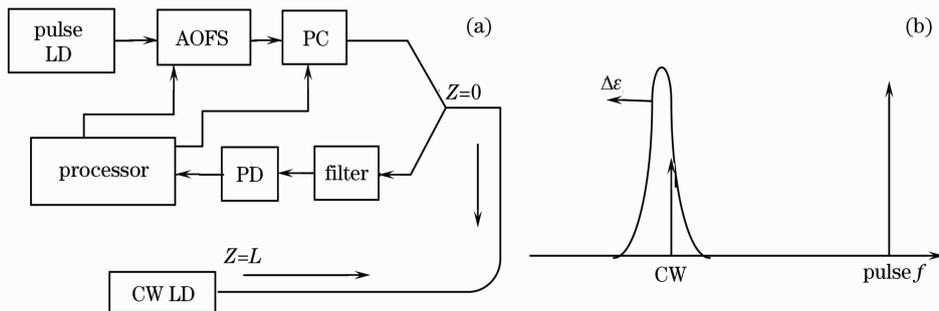


图 1 (a) 分布式光纤传感入侵定位系统原理图; (b) 探测光和抽运的频谱关系

Fig. 1 (a) Setup of distributed fiber optic intrusion sensor system; (b) dependence of detected and pulsed light

抽运光产生的布里渊增益谱的中心频率和峰值增益在光纤各处会随该处的温度和应变变化^[12~14], 布里渊功率和峰值增益的变化满足^[13]

$$\delta\nu_B = C_{v\epsilon} \delta\epsilon + C_{vT} \delta T, \quad (1)$$

$$\frac{100\delta P_B}{P_B} = C_{P\epsilon} \delta\epsilon + C_{PT} \delta T, \quad (2)$$

$$P_B = \frac{AT}{\nu_B^2}, \quad (3)$$

式中 $\delta\nu_B$, $\delta\epsilon$, δT 和 δP_B 分别是峰值增益、应变、温度和布里渊功率相对某一参考值的变化, C 是与波长和光纤有关的常数, 对 $1.55 \mu\text{m}$ 的光信号在单模光纤中传输, $C_{v\epsilon} = 0.0483 \text{ MHz}/\mu\epsilon$, $C_{vT} = 1.10 \text{ MHz}/\text{K}$, $C_{P\epsilon} = -7.7 \times 10^{-4} \%/\mu\epsilon$, $C_{PT} = 0.36 \%/\text{K}$ ^[13]。由于环境温度的变化非常缓慢, 而且沿光纤分布是连续的, 某一事件在光纤中产生的应变是突发式的, 根据(2)式, 突发式的应变会引起布里渊功率的突变, 利用这一特点, 可以定位时间发生的地点。图 1 中电控偏振控制器(PC)根据光电探测器(PD)检测到的连续(CW)光的平均光功率来控制脉冲光源的偏振态, 当 2 个光源的偏振态一致时, 经布里渊效应放大的 CW 光功率最大。声光移频器(AOFS)根据检测到的光功率与参考光功率的差, 粗略估算光纤中温度的分布情况, 调整脉冲光源的频率来优化系统检测灵敏度。偏振态的变化较快, 环境温度变化很慢, 偏振控制和声光移频器通过数字算法控制, 不会

本文利用布里渊时域分析原理进行实时事件检测, 分析了环境温度、监测范围和定位精度对定位准确率的影响。

2 定位原理

如图 1 所示, 采用光纤布里渊时域分析原理^[11], 脉冲光作为抽运光, 连续光作为探测光, 两束光在光纤中反方向传输, 连续光处于抽运光的布里渊增益区, 在与脉冲相遇处被抽运光放大。

同时作用。PD 检测到的布里渊光功率分布可表示为^[15]

$$P_B = P_{CW}(L) \exp(-\alpha L) \times \left\{ 1 - \exp\left[g(z)P_P(z) \frac{c}{n} \frac{\Delta\tau}{2}\right] \right\}, \quad (4)$$

$$P_P(z) = P_P(0) \exp\left\{-\alpha z - \int_0^z g(z')P_{CW}(L) \times \exp[-\alpha(L-z')] dz'\right\}, \quad (5)$$

式中 P_B , P_{CW} , P_P 分别为布里渊、连续光、抽运光功率, $g(z)$ 为抽运脉冲宽度。连续光的布里渊增益与 z 处的温度和应变有关, 在常温没有应变情况下, 单模光纤峰值增益约为 $1.09 \times 10^{-11} \text{ m}/\text{W}$ ^[16], 增益谱可用洛伦茨分布描述^[17], 因此峰值增益随温度、应变的变化可以近似认为与布里渊功率成正比。

3 定位性能分析

对事件的定位是通过检测光纤应变产生的布里渊功率的变化来实现的, 假设布里渊增益带宽为 100 MHz, CW 光功率为 0.1 mW, 脉冲光功率为 20 mW。

图 2 是 $50 \mu\epsilon$ 的应变在 20 km 的光纤不同位置处引起的布里渊功率变化, 图中纵坐标是有应变事件发生时和没有应变事件发生时布里渊功率之差, 并假设环境温度沿光纤没有变化, 定位精度为

50 m。从图 2 可以看出,可以把应变引起的功率变化看成是二进制数字通信的“1”,通过判断“1”的位置即可定位事件发生的地点。在同样的应变条件下,CW 光的入射端附近(即图 2 中的 20 km 处)布里渊功率的变化最小,定位的灵敏度最差。

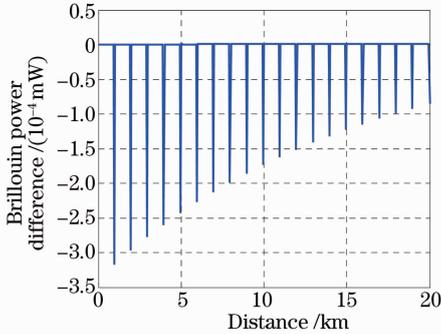


图 2 布里渊功率变化

Fig. 2 Variation of the received Brillouin power

为了分析定位的灵敏度,假设噪声服从高斯分布,定位的错误率等效于二进制非归零码的误码率。接收信号的噪声考虑散弹噪声、热噪声、布里渊自发辐射噪声、冲击噪声、激光器相对强度噪声(RIN)、PD 暗电流和跨阻放大器(TIA)等效噪声^[18],其中布里渊自发辐射噪声采用文献[15]中的模型。计算中使用的参数主要有:光带宽 50 MHz,电带宽为脉冲宽度对应频率的 75%,RIN 为 -150 dB/Hz,PD 采用 JDSU 的 epm605,TIA 等效电流噪声为 $10 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。系统实现是通过检测 CW 光信号,计算得到布里渊功率,因此在计算噪声时使用 CW 光的功率作为信号功率。由于 CW 光功率比布里渊功率的变化大很多,因此冲

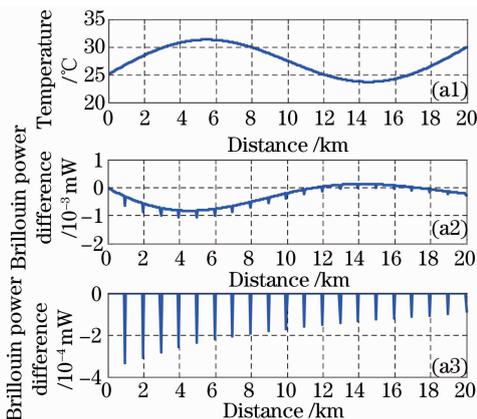


图 3 (a1)温度沿光纤的分布;(a2)布里渊功率的变化;(a3)高通滤波后的布里渊功率变化;
(b)不同应变下定位错误率与温度偏移的关系

Fig. 3 (a1) Temperature distribution along the optical fiber; (a2) Brillouin power change along the optical fiber;

(a3) Brillouin power change along the optical fiber after filtered by a high pass filter; (b) error rate of distance locating as a function of temperature offset

击噪声是影响灵敏度的主要噪声源。以下分析中的定位错误率定义为 20 km 光纤、定位点为灵敏度最低点(即 CW 光入射点)处的错误率。

参考图 1(b),应变会使增益谱向低频方向移动,因此应变引起的布里渊增益在 CW 光波长处的变化率决定了定位的灵敏度,即 CW 波长所处布里渊增益谱的斜率起主要作用,如果 CW 光处于峰值附近,定位灵敏度最低。如果 CW 光处于峰值频率以下,应变有可能使 CW 光落入峰值频率附近,因此需要调节抽运光的频率,使 CW 光在无应变时处于峰值频率以上。根据(1)式,布里渊增益谱中心频率与应变和温度有关,系统通过判断光纤的平均温度来调节抽运光的频率,使峰值增益始终小于 CW 光频率。可以把图 1(b)中的峰值频率与 CW 光频率的偏移映射为温度偏移,以室温作为参考点,并假设室温条件下 CW 光处于峰值功率处。图 3(a)是当温度在光纤中不均匀分布时 $50 \mu\epsilon$ 的应变在光纤不同位置处引起的功率变化情况。图 3(b)是不同应变条件下定位错误率与温度偏移的关系。当温度偏移参考温度 $23 \text{ }^\circ\text{C}$ (相当于 25 MHz 频率偏移)时定位错误率最低,在零偏时几乎无法定位,验证了前面的分析。在偏离峰值频率 25 MHz 处灵敏度最高与布里渊增益谱的包络有关,因为对于 100 MHz 增益带宽、形状为洛伦茨分布的增益谱,在偏离峰值增益 25 MHz 附近具有最大斜率。因此始终保持

$$f_{\text{CW}} = f_p + 25 \text{ MHz}, \quad (6)$$

系统可以获得最佳的灵敏度,式中 f_{CW} 为 CW 光频率, f_p 为增益谱峰值频率。

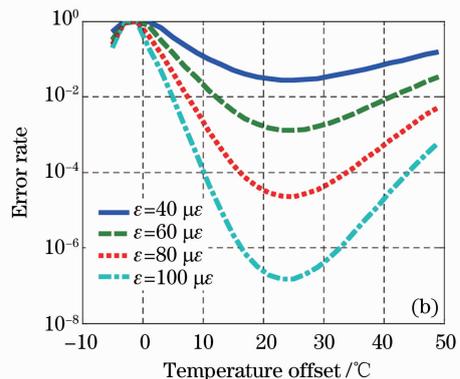


图4是光纤定位分辨率对定位灵敏度的影响,水平虚线对应的定位准确率为99%。由图可知应变越大,空间分辨率越低错误率越低,准确率越高。由图4(a)所示,当事件产生的应变为 $100\ \mu\epsilon$ 时,在20 m分辨率情况下,20 km光纤10 km处的定位准确率大于99%。图4(b)为同样的应变,在20 km光纤20 km处,在定位准确率大于99%时分辨率为

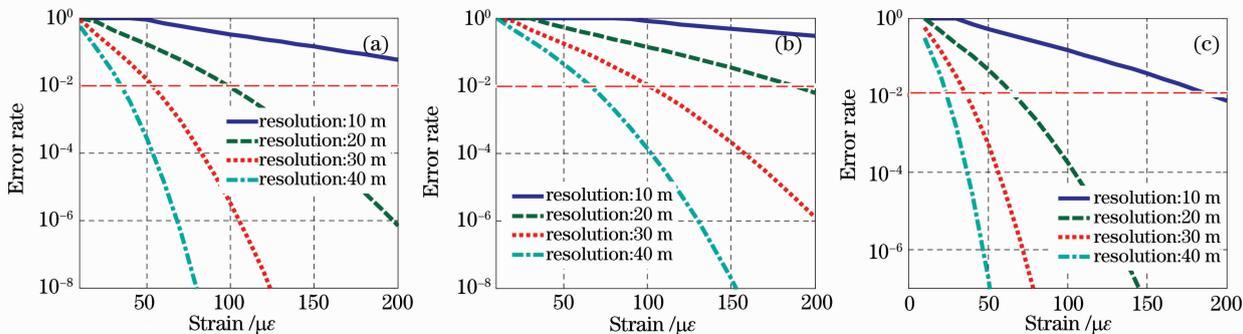


图4 在最佳频偏时定位分辨率对定位错误率的影响

Fig. 4 Error rate of distance locating dependence on strain

在实际的系统应用中,通常监测范围和定位准确率有明确的要求,以20 km监测范围、定位准确率为99%的系统为例进行分析。由以上分析可知,该系统在20 km处的灵敏度最低,因此该位置处满足系统要求时,其他位置也能满足。因此通过分析图4(b)即可得到空间分辨率和应变灵敏度之间的关系,当系统要求空间分辨率为40 m时,其应变灵敏度为 $60\ \mu\epsilon$,空间分辨率为20 m时,应变灵敏度约为 $190\ \mu\epsilon$ 。

4 结 论

基于BOTDA原理,构建了分布式光纤传感定位系统,系统分析表明,该入侵定位系统在抽运光产生的布里渊峰值频率小于连续光的频率25 MHz时具有最高的灵敏度。对10 km的监测系统,保证定位准确率大于99%,分辨率为25 m时,应变灵敏度可达 $50\ \mu\epsilon$ 。

参 考 文 献

- 1 F. Xiaojun. A variable-loop Sagnac interferometer for distributed impact sensing [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(10): 2250~2254
- 2 S. J. Russell, K. R. C. Brady, J. P. Dakin. Real-time location of multiple time-varying strain disturbances acting over a 40 km fiber section using a novel dual-Sagnac interferometer [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(2): 205~213
- 3 S. J. Spammer, P. L. Swart, A. A. Chitchebakov. Merged Sagnac-Michelson interferometer for distributed disturbance detection [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(6): 972~976
- 4 Chen Weimin, Wu Jun, Tan Jing *et al.*. Locating technology for

30 m。图4(c)为在10 km的监测系统中,99%的定位准确率对应于 $100\ \mu\epsilon$ 应变及15 m分辨率,或 $50\ \mu\epsilon$ 应变及25 m分辨率。对比图4(a)和(c),在相同位置处(例如 $z=10\ \text{km}$),短光纤比长光纤灵敏度更高。因此在设计系统时需要在监测范围、灵敏度、定位准确率和定位精度之间折中考虑。

- twin Mach-Zehnder distributed optical fiber sensing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2128~2132
- 陈伟民, 吴俊, 谭靖等. 双马赫-曾德尔分布式光纤传感系统定位技术 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2128~2132
- 5 P. R. Hoffman, M. G. Kuzkyk. Position determination of an acoustic burst along a Sagnac interferometer [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(2): 494~498
- 6 J. C. Juarez, E. W. Maier, N. C. Kyoo *et al.*. Distributed fiber-optic intrusion sensor system [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(6): 2081~2087
- 7 K. I. Aoyama, K. Nakagawa, T. Itoh. Optical time domain reflectometry in a single-mode fiber [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1981, **QE-17**(6): 862~868
- 8 D. Cotter. Stimulated Brillouin scattering in monomode optical fiber [J]. *Opt. Commun.*, 1983, **4**(1): 10~19
- 9 T. Kurashima, T. Horiguchi, H. Izumita *et al.*. Brillouin optical-fiber time domain reflectometry [J]. *IEICE Trans. Commun.*, 1993, **E76-B**(4): 382~389
- 10 He Yujun, Yin Chengqun, Li Yongqian *et al.*. A novel BOTDR system based on all fiber Mach-Zehnder interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 721~724
- 何玉钧, 尹成群, 李永倩等. 一个新型的基于全光纤 Mach-Zehnder干涉仪 BOTDR 系统 [J]. *光子学报*, 2004, **33**(6): 721~724
- 11 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
- 12 T. R. Parker, M. Farhadiroushan, V. A. Handerek *et al.*. A fully distributed simultaneous strain and temperature sensor using spontaneous Brillouin backscatter [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(7): 979~981
- 13 T. R. Parker, M. Farhadiroushan, V. A. Handerek *et al.*. Temperature and strain dependence of the power level and frequency of spontaneous Brillouin scattering in optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(11): 787~789
- 14 T. Kurashima, T. Horiguchi, H. Ohno *et al.*. Strain and temperature characteristics of Brillouin spectra in optical fibers for distributed sensing techniques [C]. *ECOC '98*, 1998,

- 1**: 149~150
- 15 Minardo, R. Bernini, L. Zeni. Accurate distributed temperature measurements by Brillouin scattering fiber-optic sensor [C]. *Proc. IEEE Sensors*, 2003, 2003, **1**: 348~352
- 16 R. B. Jenkins, R. M. Sova, R. I. Joseph. Steady-state noise analysis of spontaneous and stimulated Brillouin scattering in optical fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25** (3): 763~770
- 17 M. Nikles, L. Thevenaz, P. A. Robert. Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(10): 1842~1851
- 18 Y. Aoki. Properties of fiber Raman amplifiers and their applicability to digital optical communication systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(7): 1225~1239