

文章编号: 0253-2239(2008)03-0569-04

# 基于大功率超窄线宽单模光纤激光器的 $\phi$ -光时域反射计光纤分布式传感系统

谢孔利<sup>1</sup> 饶云江<sup>1,2</sup> 冉曾令<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 电子科技大学宽带光纤传输和通信网技术教育部重点实验室, 四川 成都 610054)  
<sup>2</sup> 重庆大学光电技术与系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

**摘要** 提出了一种基于大功率超窄线宽单模光纤激光器的  $\phi$ -光时域反射计光纤分布式传感系统。传感光缆采用普通单模光纤制成的直径 3 mm 的细光缆, 并埋设于室外。入侵者走在光缆上面或附近产生的压力(振动)导致光纤中瑞利散射光相位发生变化, 由于干涉作用, 光相位变化将引起光强度的变化, 通过实时将当前时刻的  $\phi$ -光时域反射计后向瑞利散射信号与其前一时刻(时间间隔 0.1 s)的后向瑞利散射信号连续相减检测这种干涉效应来定位入侵位置。经适当的数据处理后, 该传感系统定位精度可达到 50 m(为目前报道的  $\phi$ -光时域反射计传感系统最高定位精度), 定位范围可达到 14 km, 信噪比约为 12 dB, 且灵敏度较高。该系统可望能广泛用于军事基地、国界、核设施及监狱等重要场所的安全防范。

**关键词** 光纤光学; 光纤分布式传感; 光时域反射计; 相位敏感光时域反射计; 入侵检测

**中图分类号** TP212.14      **文献标识码** A

## Distributed Optical Fiber Sensing System Based of Rayleigh Scattering Light $\phi$ -OTDR Using Single-Mode Fiber Laser with High Power and Narrow Linewidth

Xie Kongli<sup>1</sup> Rao Yunjiang<sup>1,2</sup> Ran Zengling<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission & Communication Networks, Ministry of Education, University of Electronics Science & Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Opto-Electronic Technology & Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China

**Abstract** A phase-sensitive optical-time-domain-reflectometer ( $\phi$ -OTDR) using a fiber laser with high power and narrow linewidth is described. The sensing element is a single-mode telecommunication fiber cable with a 3 mm diameter buried outdoors. The phase changes of Rayleigh scattering light resulting from the pressure (vibration) of the intruder on the ground immediately above or near the buried fiber. By subtracting a present  $\phi$ -OTDR trace signal from an earlier one with a time difference of 0.1 s, the system can locate the intrusion point where the optical intensity will change for the reason of interference. By processing the returned signal properly, a distance range of 14 km can be reached, with the best spatial resolution of  $\sim 50$  m reported to date, and a signal-to-noise ratio of  $\sim 12$  dB, to the best of our knowledge. Such a distributed sensing system is anticipated to be used widely in safety monitoring of military bases, national borders, nuclear facilities, electrical power generation stations, jails, *et al.*

**Key words** fiber optics; distributed fiber-optic sensor; optical-time-domain-reflectometer; phase-sensitive optical-time-domain-reflectometer ( $\phi$ -OTDR); intrusion sensing

收稿日期: 2007-06-27; 收到修改稿日期: 2007-09-05

基金项目: 教育部博士点基金(A0901010120060614017)资助课题。

作者简介: 谢孔利(1982-), 男, 满族, 辽宁本溪人, 硕士研究生, 主要从事光纤传感技术方面的研究。

E-mail: xiekongli@163.com

导师简介: 饶云江(1962-), 男, 云南保山人, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感技术与光纤通信器件等方面的研究。

E-mail: yjrao@uestc.edu.cn

# 1 引 言

由于分布式光纤传感系统具有抗电磁干扰、电绝缘性好、耐腐蚀、灵敏度高、以及可以实现大范围监测等诸多优点,且传感光纤都埋藏于地下,具有很好的隐蔽性,所以用于监测和保护国境、军事基地、发电厂、核设施及监狱等的分布式光纤传感防入侵系统已经成为目前研究的热点<sup>[1~3]</sup>。

使用脉冲激光器或连续光激光器作为光源的 $\phi$ -光时域反射计系统已被证明可以用来检测并定位拉伸或加热引起的相位扰动。使用半导体脉冲激光器作为光源的 $\phi$ -光时域反射计系统被用于检测由温度快速变化引起的光相位变化<sup>[4]</sup>。由环形激光器与声光调制器组成的 $\phi$ -光时域反射计系统用于检测由压电陶瓷(PZT)引起的光相位扰动<sup>[5]</sup>,该系统的空间分辨力为 400 m,信噪比(入侵位置的幅度变化与其他区域幅度变化平均值的比值)为 3.3 dB。由光纤激光器与电光调制器组成的系统<sup>[6]</sup>,采用两级放大,在现场实验中,定位精度为 1 km,定位范围为 12 km,信噪比约为 5.6 dB。

另一类光纤分布式传感防入侵系统是基于干涉仪原理的分布式传感系统<sup>[7~10]</sup>。但是,干涉仪方法的定位精度会随着传感距离的增大而降低,数据处理工作也很复杂,且对参考光纤的屏蔽有很高的要求。

本文的分布式光纤传感系统基于光时域反射计(OTDR)结构,利用 $\phi$ -光时域反射计的干涉机理<sup>[5]</sup>,从光纤中不同部分反射回来的瑞利散射光发生干涉,实验证明这种系统比常规的光时域反射计系统灵敏度高很多,因此, $\phi$ -光时域反射计技术极具吸引力。

# 2 原理及系统设计

分布式光纤传感系统如图 1 所示,与常规光时域反射计一样,光脉冲从光纤的一端注入,用光探测器探测后向瑞利散射光。不同的是注入光纤中的光是高度相干的,因此该传感系统的输出就是脉冲宽度区域内反射回来的瑞利散射光相干干涉的结果。 $\phi$ -光时域反射计通过测量注入脉冲与接收到的信号之间的时间延迟得到扰动的位置。当光纤线路上由于入侵而发生扰动时,由于弹光效应,光纤相应位置的折射率将发生变化,这将导致该处光相位发生变化,由于干涉作用,相位的变化将引起后向散射光光强发生变化。通过探测器探测后向瑞利散射光,并且将 $\phi$ -光时域反射计不同时刻的后向瑞利散射曲线相减来

检测这种效应,相减的曲线上光强发生变化的时间位置同入侵导致相位扰动的位置(相对注入脉冲那一端的距离)相对应。该系统的定位精度  $\Delta z$  与注入光纤的光脉冲宽度  $T_p$  有关,且有  $\Delta z = cT_p/2n_g$ ,其中  $c$  为真空中的光速, $n_g$  为群折射率<sup>[9]</sup>。

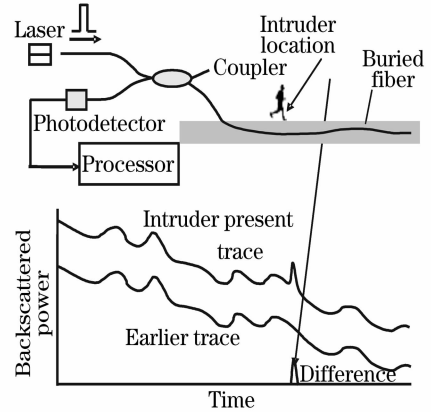


图 1  $\phi$ -光时域反射计系统用于入侵监测  
Fig. 1 Phase-sensitive OTDR ( $\phi$ -OTDR) used for intrusion detecting

与常规光时域反射计相比, $\phi$ -光时域反射计需要极窄的线宽及极小的频率漂移<sup>[11]</sup>。窄线宽是 $\phi$ -光时域反射计系统的关键,是系统能够响应光相位变化的基本条件,且线宽越窄,干涉作用就越明显,系统的灵敏度就越高。极小的频率漂移非常重要,因为频率漂移会导致 $\phi$ -光时域反射计后向散射曲线发生抖动,使入侵引起的后向散射曲线的变化被淹没,严重影响系统的性能。

由于光纤制备水平的快速发展,光纤的损耗越来越低,瑞利散射光也越来越小;而且,激光经调制后,由于占空比极小(文中为 1/2000),调制器的插入损耗约为 4 dB,平均功率将损失约为 37 dB。因此,大功率对于长距离传感起着重要作用,而使用过多的光放大大会引入一定程度的噪声(主要来源于自发辐射噪声),因此,大功率激光器对于长距离传感是一种极好的选择。

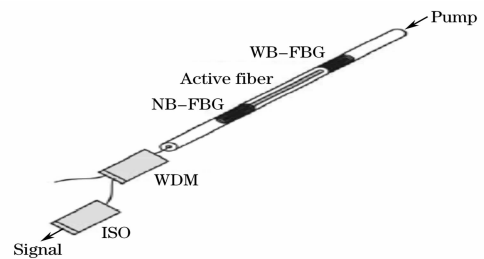


图 2 激光器结构  
Fig. 2 Laser configuration

本实验采用了 NP Photonics 公司的单模光纤激光器,其主要结构如图 2 所示,激光腔由两个光纤布拉格光栅(FBG)与一段很短的高增益有源光纤熔接在一起组成的,超窄带光纤布拉格光栅(NB-FBG)和另一个宽带、高反射率的光纤布拉格光栅(WB-FBG)形成激光腔,该激光器的线宽  $\Delta f \leq 3$  kHz(如图 3),频率漂移很小,在正常的实验室条件下为 1~1.5 MHz/min,输出功率为 50 mW。

实验系统结构框图如图 4 所示。光纤激光器发出的连续光,经过电光调制器后产生光脉冲,光脉冲被掺铒光纤放大器(EDFA)放大,由带通滤波器(包含光纤布拉格光栅的结构)滤除自发辐射光后通过一个 3 dB 的耦合器进入传感光缆。用带有前放和滤波功能的光电探测器探测后向瑞利散射光,采用 300kHz 的低通滤波,用采样率为 50MS/s 的数据

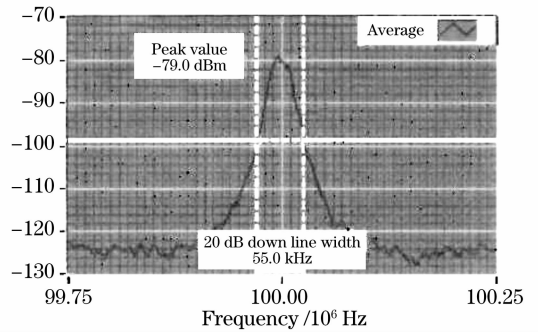


图 3 激光器线宽

Fig. 3 Laser spectral linewidth

采集卡采集数据,并用 Matlab 软件处理数据。实验设备位于实验室内,16 km 直径为 3 mm 的成缆标准单模光纤作为传感光纤,全部埋设于室外地下 20 cm,且在 2 km 及 14 km 处直线展开作为入侵点(其余为光缆盘)。

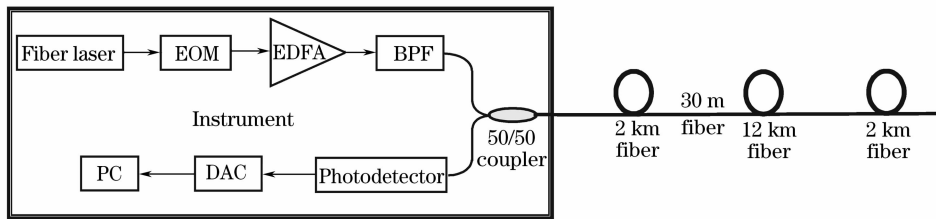


图 4  $\phi$ -光时域反射计实验系统结构框图

Fig. 4 Steup for the  $\phi$ -OTDR system

### 3 实验结果

电光调制器的调制输入端是周期为 1 ms 的脉冲信号,满足光脉冲重复周期大于光脉冲在光纤中传播的往返时间(120  $\mu$ s),以避免光脉冲在光纤中发生混叠,影响系统工作。光脉冲的宽度为 500 ns,对应于 50 m 的定位精度。图 5(a)所示为两个体重约为 60 kg 的人分别在距实验室 2 km 及 14 km 处

离入侵点 1 m 的地面走动时,连续 100 条后向瑞利散射曲线的叠加图(末端的强反射是非涅耳反射)。

图 5(b)是对图 5(a)中的散射曲线处理后的叠加效果图。从图 5(b)可以明显看出在 20  $\mu$ s 和 140  $\mu$ s 等价于 2 km 和 14 km 的位置有明显的峰值出现,信噪比约为 12 dB,系统具有很高的灵敏度。然而,常规光时域反射计系统(本文使用日本安立公司

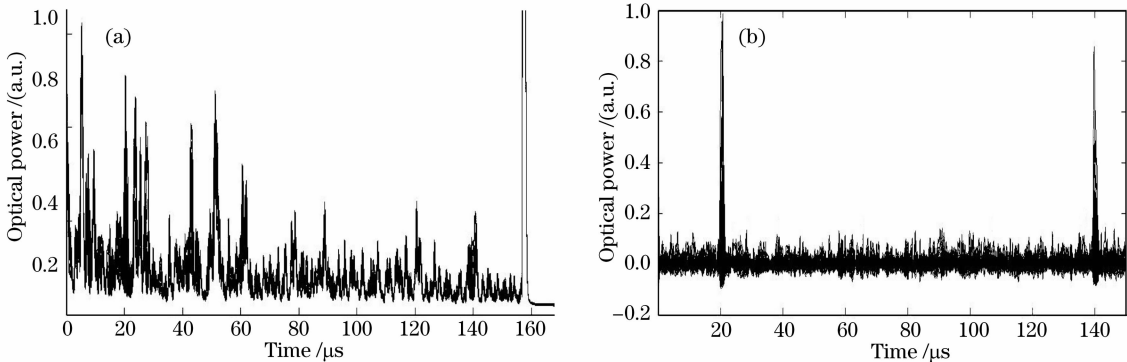


图 5 (a)当有人在光缆 2 km 和 14 km 位置附近走动时,连续 100 条散射曲线叠加图,(b)对(a)中曲线处理后的叠加效果图

Fig. 5 (a) Consecutive OTDR traces superimposed with phase changes at 2 km and 14 km location, (b) OTDR traces superimposed with phase changes at 2 km and 14 km location after processing

MW9076B1 的光时域反射计)在相同的实验条件下,几乎不能探测到如此微弱的入侵扰动。

图 6 所示为验证系统分辨率的效果图,在 2 km 处有两个入侵点,且两个入侵点的距离为 50 m。当有入侵时,从图 6 可以看出有两个峰值同时出现,可见系统的定位精度可以达到 50 m。

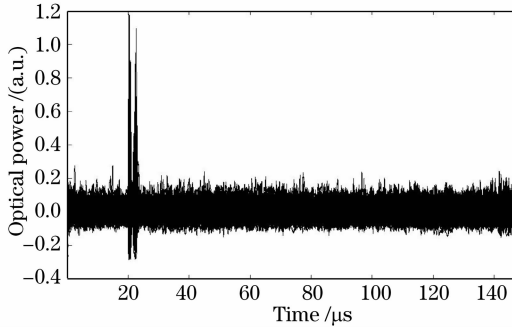


图 6 在 2 km 处相距 50 m 的两个点同时入侵  
Fig. 6 OTDR traces superimposed of two 50 m apart intrusions at 2 km location after processing

## 4 结 论

本文提出了一个基于大功率超窄线宽单模光纤激光器的  $\phi$ -光时域反射计光纤分布式传感系统,激光器的输出功率为 50 mW,线宽  $\Delta f \leq 3$  kHz。方案中只使用了一级放大,降低了自发辐射噪声,有效地提高了系统的信噪比性能,采用信号处理方法,系统的信噪比达到 12 dB,具有较高的探测灵敏度。当入侵者在埋设光缆的地面附近走动时,导致探测脉冲内各点光相位发生扰动,系统能很好地响应这种光相位调制。系统的定位精度为 50 m(为目前报道的  $\phi$ -光时域反射计传感系统最高定位精度),定位范围 14 km。实验结果表明,该系统对于军事基地、国界、核设施及监狱等重要场所周界安全防范将是一个很好的选择。

## 参 考 文 献

- 1 Jianzhong Gao, Zhuangde Jiang, Yulong Zhao *et al.*. Full distributed fiber optical sensor for intrusion detection in application to buried pipelines[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(11): 633~635
- 2 Song Muping. The technique of Brillouin scattering-distributed optical fiber sensing based on microwave electrooptical modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1111~1114  
宋牟平. 微波光电调制的布里渊散射分布式光纤传感技术[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1111~1114
- 3 Dong Yuming, Zhang Xuping, Lu Yuangang *et al.*. Cross sensitivity of Brillouin scattering distributed fiber sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 197~201  
董玉明,张旭平,路元刚等. 布里渊散射光纤传感器的交叉敏感问题[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 197~201
- 4 S. V. Shatalin, V. N. Treschikov, A. J. Rogers. Interferometric optical time-domain reflectometry for distributed optical-fibre sensing[C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3479**: 181~191
- 5 J. Park, W. Lee, H. F. Taylor. A fiber optic intrusion sensor with the configuration of an optical time domain reflectometer using coherent interference of Rayleigh backscattering[C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3555**: 49~56
- 6 J. C. Juarez, E. W. Maier, K. N. Choi *et al.*. Distributed fiber-optic intrusion sensor system[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(6): 2081~2087
- 7 P. R. Hoffman, M. G. Kuzyk. Position determination of an acoustic burst along a Sagnac interferometer[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(2): 494~498
- 8 A. A. Chtcherbakov, P. L. Swart, S. J. Spammer. Dual wavelength Sagnac-Michelson distributed optical fiber sensor[C]. *Proc. SPIE*, 1996, **2838**: 301~307
- 9 S. J. Russell, K. R. C. Bardy, J. P. Dackin. 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
- 10 Hang Lijun, He Cunfu, Wu Bin. A new pipeline leakage detection system based on linear optical fiber Sagnac interferometer and its location technology[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(6): 820~824  
杭利军,何存富,吴斌. 一种新的直线型 Sagnac 光纤干涉仪管道泄漏检测系统及其定位技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 820~824
- 11 A. H. Hartog, M. P. Gold. On the theory of backscattering in single-mode optical fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1984, **LT-2**(2): 76~82