

基于双向拉曼放大的相位敏感光时域反射仪

王杰[†] 贾新鸿 饶云江 吴慧娟

(电子科技大学通信与信息工程学院, 光纤传感与通信教育部重点实验室, 成都 611731)

(2012年7月4日收到; 2012年8月1日收到修改稿)

报道了一种基于双向拉曼放大延长相位敏感光时域反射仪分布式光纤传感系统传感距离的方法. 利用双向拉曼抽运对信号光进行拉曼放大, 补偿了光纤传输损耗. 实验表明, 该方法提高了整个传感光纤上信号光的分布均匀性, 实现了 74 km 的超长传感距离和 20 m 的空间分辨率, 同时, 试验了不同信号光入纤功率和抽运功率对基于双向拉曼放大的相位敏感光时域反射仪系统的影响.

关键词: 相位敏感光时域反射仪, 分布式光纤传感, 拉曼放大

PACS: 42.65.Dr, 42.65.Es, 42.81.Cn, 42.81.Pa

DOI: 10.7498/aps.62.044212

1 引言

近年来, 基于相位敏感光时域反射仪 (Φ -OTDR) 的分布式光纤传感器 (DOFS) 得到了广泛的研究和应用, 特别是在安防领域的入侵监测和定位^[1-4]. 与传统的传感器相比, 基于 Φ -OTDR 的分布式传感系统具有高灵敏度、长距离监测、抗电磁干扰、低成本以及传输介质即为传感介质等诸多优点.

对基于 Φ -OTDR 的 DOFS 研究主要集中于延长传感距离和提高空间分辨率. Park 等^[2] 使用线宽为 50 kHz 的半导体环形激光器和声光调制器, 获得了 6 km 的传感距离和 400 m 的空间分辨率. Juarez 等^[3] 结合掺铒光纤和一对光纤布拉格光栅形成的 Fabry-Perot 腔, 产生了具有窄线宽 (≈ 3 kHz) 和低频率漂移的光纤激光, 并结合电光调制器, 实现了传感距离 19 km 和空间分辨率 100 m 的分布式光纤入侵传感系统. Lu 等^[4] 报道了一种基于相干探测的 Φ -OTDR 分布式震动传感系统, 获得了 1.2 km 的传感距离和 5 m 的空间分辨率. 近年来本实验对基于 Φ -OTDR 的 DOFS 做了优化和实用化研究, 采用大功率超窄线宽单模光纤激光器, 在现场实验中实现了传感距离 14 km, 定位精度 50 m^[5]. 基于窄线宽 DFB 激光器和纤维增强塑料传感光缆, 并结

合小波分析方法降噪, 实现了传感距离 8 km, 空间分辨率 100 m 的分布式光纤围栏入侵监测系统^[6].

拉曼放大技术由于能够灵活控制增益带宽和增益波段在长距离光纤传输系统中得到广泛应用^[7-9]. 为进一步延长 Φ -OTDR 系统的传感距离和提高其空间分辨率, 本文研究了基于双向拉曼分布式放大技术的 Φ -OTDR 传感系统, 有效克服了传统集中式掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大存在的问题, 提高了整个光纤链路信号光的均匀分布性, 实现了 74 km 的传感距离和 20 m 的空间分辨率.

2 原理

Φ -OTDR 与传统的光时域反射仪 (OTDR) 一样, 光脉冲从光纤的一端注入, 用探测器探测后向瑞利散射信号. 不同的是注入 Φ -OTDR 系统的光是高度相干的, 因此该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结果. 如果光纤链路的某一位置受到了扰动, 由于弹光效应, 该处的光纤折射率就会发生变化, 从而导致该处的光相位发生变化, 由于干涉作用, 相位的变化将引起后向瑞利散射光光强发生变化, 将不同时刻的后向瑞利散射曲线相减即可检测与定位这种变化. 系统的

[†] 通讯作者. E-mail: wangjiek@126.com

空间分辨率是由脉冲宽度决定的^[2], 可表示为

$$\Delta z = cT_w/2n, \quad (1)$$

其中 Δz 为空间分辨率, c 为真空中的光速, T_w 为脉冲宽度, n 为光纤的群折射率. 由 (1) 式可知, 要获得较高的空间分辨率, 须使用较窄的脉冲宽度, 但是更窄的脉冲宽度将弱化注入到光纤的光功率, 这将缩短系统的传感距离. 所以, 需采用放大技术补偿信号光在光纤中的传输损耗, 获得更长的传感距离.

对于长距离的 Φ -OTDR 传感系统, 集中放大式的 EDFA 虽然能对入纤信号光放大, 但由于光纤的传输损耗, 信号光将随着传播距离而衰减, 使得前端的光功率远远大于后端的光功率, 且需要控制 EDFA 的输出功率, 避免出现较大的自发辐射噪声. 为补偿 EDFA 放大的不足, 本文采用了双向拉曼分布式放大技术, 其特性可由下面方程表示^[10]:

$$P_s^{dB}(z) = 10 \lg \left(\exp \left\{ \frac{1}{\alpha_p} g_{\text{eff}} P_0 [(1-R) \times e^{-\alpha_p L} (e^{\alpha_p z} - 1) - R (e^{-\alpha_p z} - 1)] - \alpha_s z \right\} \right), \quad (2)$$

其中 P_s^{dB} 是以 dB 表示的信号光在光纤中的功率, α_p 和 α_s 分别为抽运光和信号光在光纤中的传输损耗, g_{eff} 为有效拉曼增益系数, P_0 为总抽运功率, L 为光纤长度, R 为前向抽运功率占总抽运功率的比例. 当 $R = 0$ 时, 表示只使用后向抽运; 当 $R = 1$ 时,

表示只使用前向抽运; 当 $0 < R < 1$ 时, 表示使用双向抽运.

图 1 显示了长度为 75 km 的普通单模光纤 (SMF) 在不同拉曼抽运结构下的信号光增益分布仿真结果, 显然采用双向拉曼抽运结构能获得更加均衡的信号光功率分布.

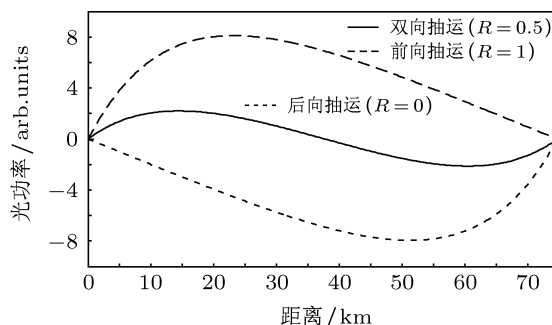


图 1 不同拉曼抽运结构下的光增益分布

3 实验系统装置

实验系统图如图 2 所示. 一个超窄线宽 (2 kHz) 半导体激光器输出波长为 1550 nm 的连续光, 功率为 13 dBm, 经过声光调制器 (消光比为 40 dB) 调制为脉冲光. 声光调制器由信号发生器驱动, 重复频率为 1 kHz, 脉宽为 200 ns (占空比为 0.02%), 对应 20 m 的空间分辨率. 脉冲光经 EDFA 放大后通过环形器的 1 端口耦合进 SMF. 脉冲光经 EDFA 放大后通过环形器的 1 端口耦合进 SMF.

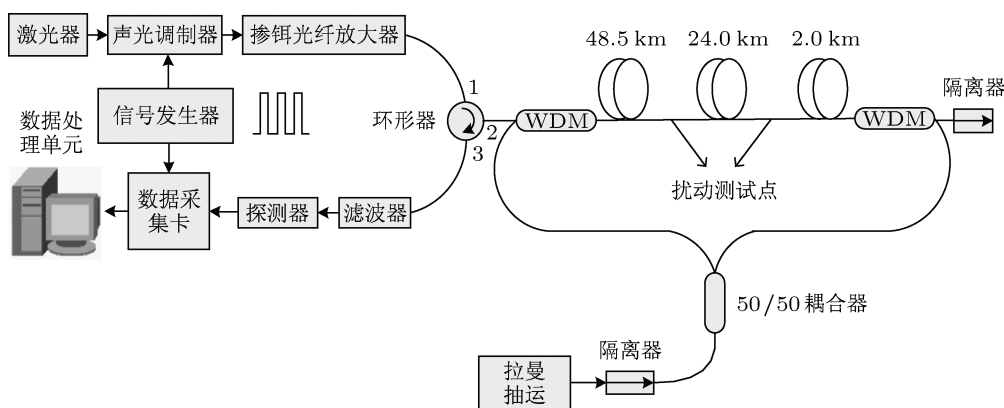


图 2 基于双向拉曼放大的 Φ -OTDR 传感系统实验图

放大系统采用了双向拉曼放大, 其中抽运是一个拉曼光纤激光器, 中心波长为 1455 nm, 最大输出功率为 5 W, 抽运光经隔离器保护后通过 50 : 50 的耦合器分为两路, 分别从光纤链路两端经 1455/1550 波分复用器 (WDM) 进入光纤. 从光纤链

路反射回的后向瑞利散射信号光经滤波器消除其中的残余抽运光和抽运自身产生的 1455 nm 后向散射噪声后进入光电探测器. 信号发生器同步触发数据采集卡进行数据采集, 采集卡的采样率为 50 MSa/s, 平均次数为 64 次 (系统最大测量频率为 8

Hz^[4]), 采集后的数据进入数据处理单元进行进一步的处理.

4 实验结果

系统在无拉曼放大时的后向瑞利散射光干涉结果如图 3(a) 所示, 图 3(b) 为加入双向拉曼放大后的后向瑞利散射光干涉结果, 其增益谱曲线与图 1(双向抽运 $R = 0.5$) 仿真结果相符, 整个光纤链路获得了较为平坦的信号增益.

在抽运功率固定, 入纤功率不同时后向瑞利散射光干涉曲线如图 4 所示. 由图可知, 入纤功率过强反而弱化光纤后端的后向瑞利散射光干涉强度, 降低系统的传感距离. 在信号光入纤功率固定, 不同抽运功率时的后向瑞利散射光干涉曲线如图 5 所示. 由图可知, 抽运功率过低无法放大光纤后端的信号光, 抽运功率过高则会导致后端后向瑞利散射光干涉信号信噪比降低, 甚至消失. 所以, 需同时调整优化信号光的入纤功率和抽运功率, 使系统工作在最佳状态.

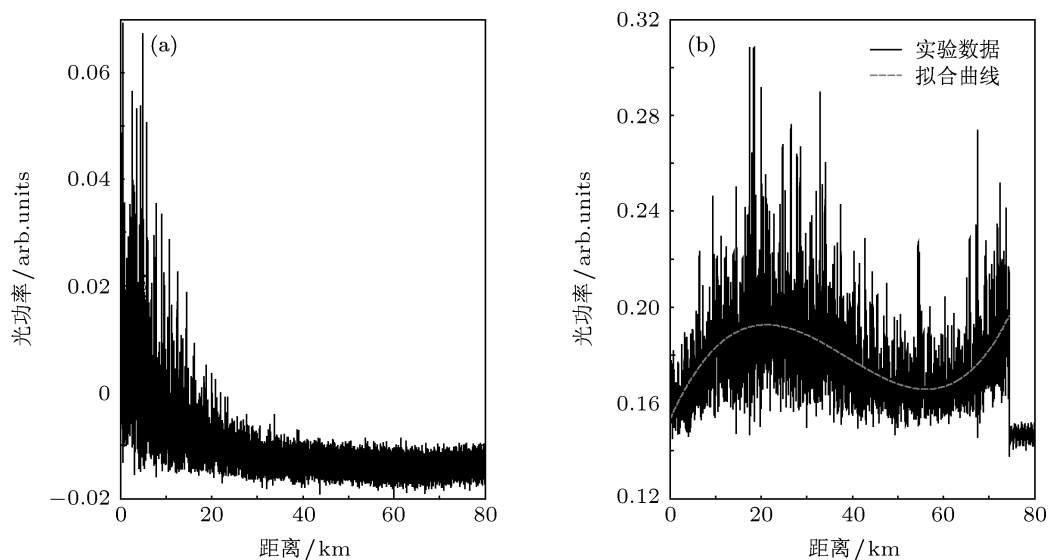


图 3 后向瑞利散射光干涉曲线 (a) 无拉曼放大;(b) 加入双向拉曼放大

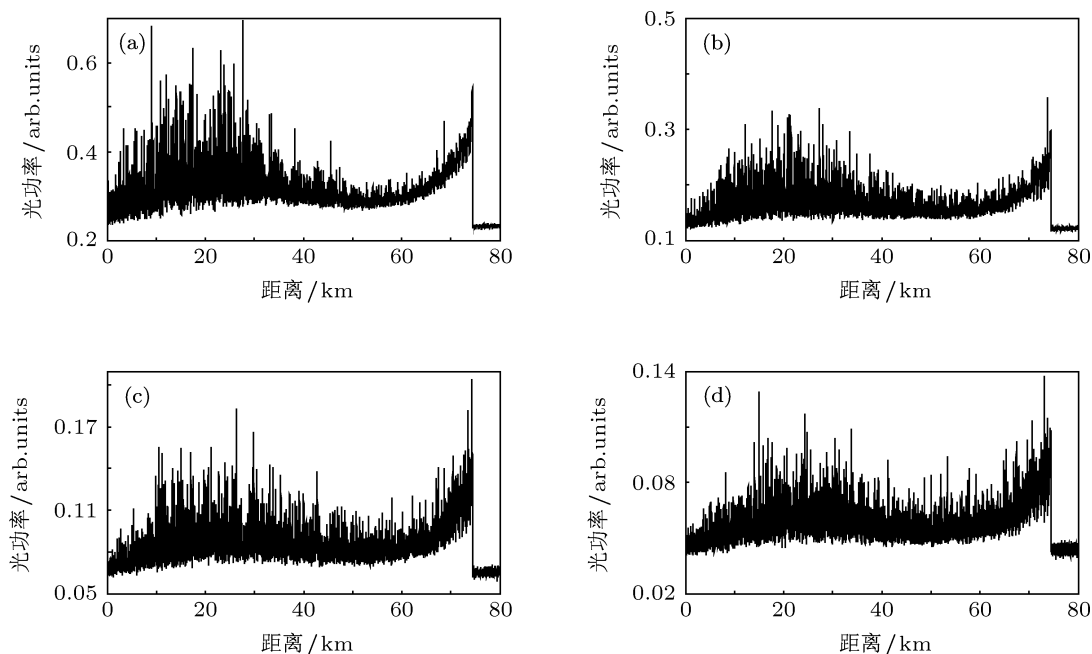


图 4 抽运功率固定, 不同信号光入纤功率下的后向瑞利散射光干涉曲线 (a) 入纤无衰减; (b) 入纤衰减 2 dB; (c) 入纤衰减 3 dB; (d) 入纤衰减 5 dB

实验中对绕成圈置于光学平台的 20 m 长铠装光缆施加随机人为扰动 (用手触碰光缆并施加适当压力, 频率 < 8 Hz), 将两次相邻后向瑞利散射光干

涉曲线相减即可检测和定位该扰动. 图 6 分别显示了在光纤链路 48.5 和 72 km 处的扰动信号以及两点同时扰动时的扰动信号, 且具有很高的灵敏度.

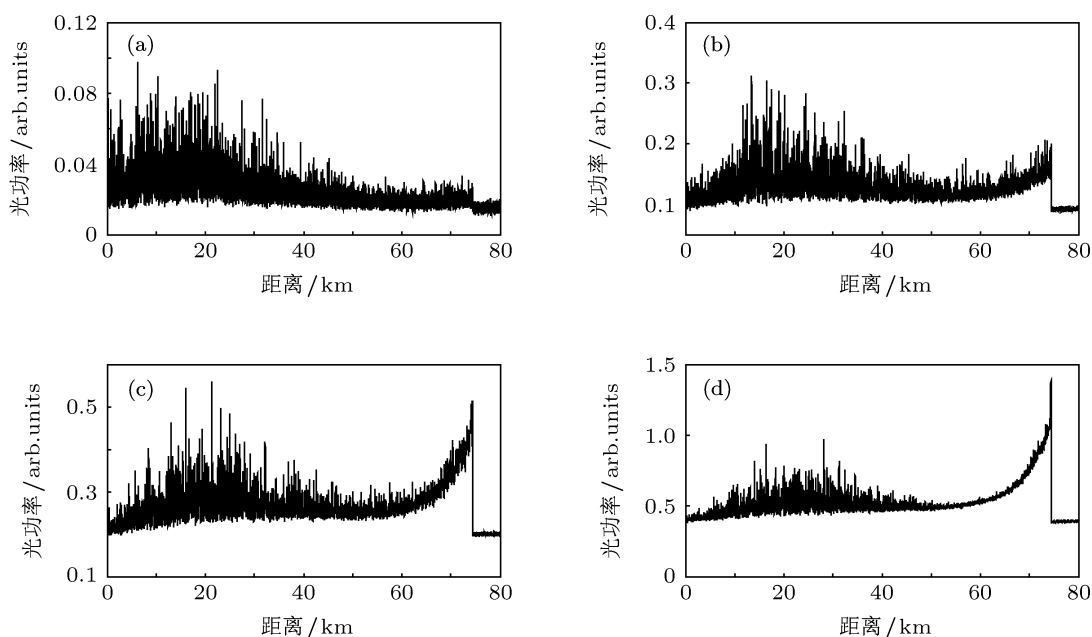


图 5 信号入纤功率固定, 不同抽运功率下的后向瑞利散射光干涉曲线 (a) 抽运功率 1.12 W; (b) 抽运功率 1.41 W; (c) 抽运功率 1.58 W; (d) 抽运功率 1.79 W

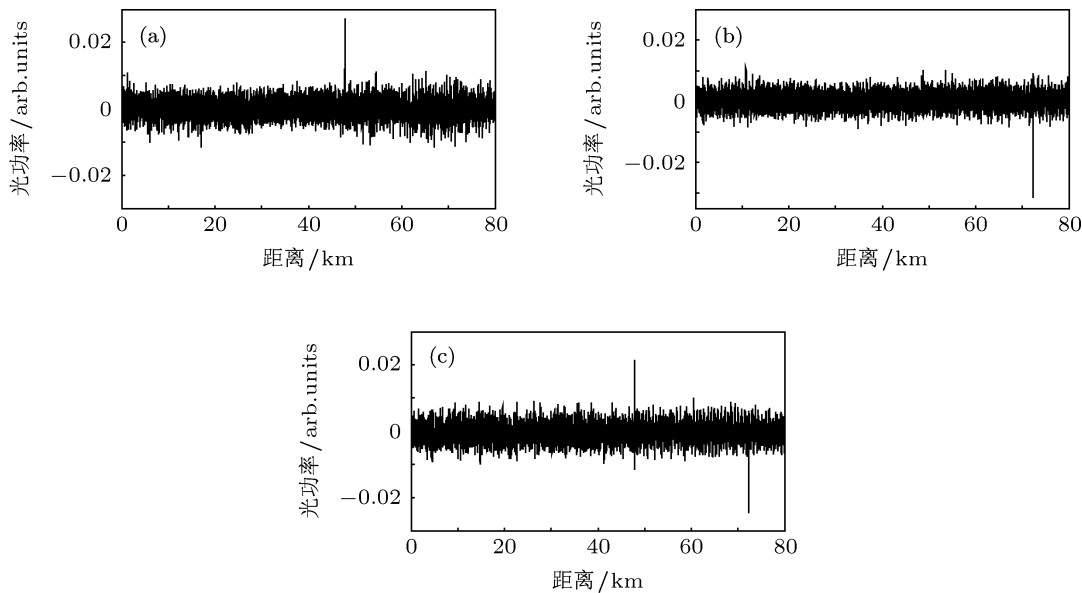


图 6 扰动实验结果 (a) 在 48.5 km 处的扰动信号; (b) 在 72 km 处的扰动信号; (c) 两个测试点同时扰动的扰动信号

5 结论

综上所述, 将双向拉曼放大运用到 Φ -OTDR 传感系统中, 提高了传感光纤中信号光的分布均匀性, 延长了传感距离, 实现了具有 74 km 超长距离

和 20 m 空间分辨率的分布式传感系统, 通过适当增大拉曼抽运的功率和优化入纤光功率可进一步延长传感距离. 实验结果表明, 基于双向拉曼放大的 Φ -OTDR 分布式传感系统是一种理想的超长距离安防监测系统, 在油气输送管道、国境边线等重要领域具有广泛的应用前景.

- [1] Taylor H F, Lee C E 1993 *U. S. Patent* 5 194 847 [1993-03-16]
[2] Park J, Lee W, Taylor H F 1998 *Proc. SPIE* **3555** 49
[3] Juarez J C, Taylor H F 2007 *Appl. Opt.* **46** 1968
[4] Lu Y L, Zhu T, Chen L, Bao X Y 2010 *J. Lightw. Technol.* **28** 3243
[5] Xie K L, Rao Y J, Ran Z L 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 569 (in Chinese)
[谢孔利, 饶云江, 冉曾令 2008 光学学报 **28** 569]
[6] Luo J, Rao Y J, Yue J F, Ran Z L 2009 *Chin. J. Sci. Instrum.* **30** 1123
(in Chinese) [罗俊, 饶云江, 岳剑锋, 冉曾令 2009 仪器仪表学报 **30**
1123]
[7] Yun P, Chi R H, Li Y G, Lü K C 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4229 (in
Chinese) [运鹏, 迟荣华, 李乙钢, 吕可诚 2004 物理学报 **53** 4229]
[8] Ma Y H, Xie S Z, Chen M H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 123 (in Chinese)
[马永红, 谢世种, 陈明华 2005 物理学报 **54** 123]
[9] Tong Z, Wei H, Jian S S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1873 (in Chinese)
[童治, 魏淮, 简水生 2006 物理学报 **55** 1873]
[10] Ania-Castañón J D 2004 *Opt. Express* **12** 4372

Phase-sensitive optical time-domain reflectometer based on bi-directional Raman amplification

Wang Jie[†] Jia Xin-Hong Rao Yun-Jiang Wu Hui-Juan

(Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Ministry of Education, School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

(Received 4 July 2012; revised manuscript received 1 August 2012)

Abstract

In this paper, we report on a distributed sensing system of phase-sensitive optical time-domain reflectometer (Φ -OTDR) based on bi-directional Raman amplification. With the bi-directional Raman amplification, the transmission loss of the optical fiber can be compensated efficiently. The experimental characterization of evenly detected signals along the whole sensing distance of 74 km with 20 m spatial resolution is successfully demonstrated, resulting in the longest distributed sensing system based phase-sensitive optical time-domain reflectometer reported so far, to the best of our knowledge. The influences of different incident powers and pump powers on Φ -OTDR are studied experimentally.

Keywords: phase-sensitive time-domain reflectometer, distributed optical-fiber sensor, Raman amplification

PACS: 42.65.Dr, 42.65.Es, 42.81.Cn, 42.81.Pa

DOI: 10.7498/aps.62.044212

[†] Corresponding author. E-mail: wangjiek@126.com