

基于多频率综合鉴别 ϕ -OTDR 系统中干涉衰落假信号的相位解调技术

周俊^{1,3} 潘政清¹ 叶青¹ 蔡海文¹ 赵浩² 瞿荣辉¹ 方祖捷¹

¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800
² 上海波汇通信科技有限公司, 上海 201203
³ 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 对相位解调相位敏感光时域反射仪(ϕ -OTDR)系统中干涉衰落问题进行了研究。同一频率多次脉冲扫描显示出相似的衰落波形,而不同光频有不同的衰落波形。通过改进现有瑞利散射随机性和相干性物理模型,推出了瑞利散射系数是激光频率和有效折射率的函数,合理解释了上述实验现象。为了消除干涉衰落导致的系统误报问题,提出了一种基于多频率综合判决的方法,有效地区分并排除了误报,提高了整个 ϕ -OTDR 系统相位解调的准确性。

关键词 传感器;相位敏感光时域反射仪;相干检测;衰落噪声

中图分类号 TN212.14 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0905003

Phase Demodulation Technology Using a Multi-Frequency Source for Discrimination of Interference-Fading Induced False Alarms in a ϕ -OTDR System

Zhou Jun^{1,3} Pan Zhengqing¹ Ye Qing¹ Cai Haiwen¹ Zhao Hao²
Qu Ronghui¹ Fang Zujie¹

¹ Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² Shanghai Bandweaver Communication Technologies Co., Ltd., Shanghai 201203, China
³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The characteristics of interference fading in the phase-demodulated phase-sensitive optical time domain reflectometer(ϕ -OTDR) system are investigated. It is found that the fading waveforms have high similarity for different pulse scans, but obvious differences for different optical frequencies. An improved model for randomness and coherent noise of Rayleigh scattering is presented. It can be concluded that the composite Rayleigh scattering coefficient is a function of laser frequency and the index distribution, which could explain the experimental results reasonably. In order to eliminate the false alarms due to interference fading, a multi-frequency method is proposed, which can improve the accuracy of the phase demodulation in the ϕ -OTDR system.

Key words sensors; phase-sensitive optical time domain reflectometer; coherent detection; fading noise

OCIS codes 060.2370; 290.5870; 030.1670

收稿日期: 2013-04-18; 收到修改稿日期: 2013-05-02

基金项目: 国家 863 计划(2012AA041203)、上海市科委高新技术处科级攻关项目(11DZ1140202)、浦东新区科级发展基金(PKJ2012-D04)

作者简介: 周俊(1987—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: zhoujun1987910@163.com

导师简介: 蔡海文(1975—),男,博士,研究员,主要从事光纤传感方面的研究。

E-mail: hwcai@siom.ac.cn (通信联系人)

1 引言

相位敏感光时域反射仪(ϕ -OTDR)是一种新型的分布式光纤传感技术^[1],在对光纤线路范围内的入侵进行远程和实时动态的安全监测方面,具有传统的传感器所不能替代的优势。 ϕ -OTDR 分布式光纤技术最早由 Taylor 等^[2]在 1993 年提出,但是当时采用直接探测的方法,只能定性测量发生扰动的位置信息,无法定量测量^[3-4]。为了提高 OTDR 的传感距离和动态范围,1994 年 Furukawa 等^[5]提出了利用相干接收方法来检测后向瑞利散射信号的相干 OTDR (COTDR),该方法可以有效增强系统的测量范围和信噪比。但是由于需要大量的平均,COTDR 测量的是准静态的变化,主要用于长距离光纤损耗和断点的监测^[6]。为了将其应用扩展到分布式振动传感领域,Lü 等^[7]于 2010 年提出利用 ϕ -OTDR 相干检测方法测量外界声场的振动频率,采用移动平均的方法降低系统随机噪声,并采用快速傅里叶变换(FFT)方法获得外界的振动频率。但是对扰动造成的直接影响,即引起光纤中探测光相位的改变量并没有定量的测量,因此只能定性地作为区分扰动目标的依据。本课题组于 2011 年提出了基于数字相干检测的 ϕ -OTDR 技术^[8],通过解调瑞利散射信号的相位信息来获得光纤沿线的扰动,相位解调精度达到 0.1 rad,保证了后续模式识别的准确性。

然而,由于系统采用窄线宽的激光光源,光源的高相干性使回波信号发生干涉衰落,即相干瑞利噪声^[8-10]。由于干涉衰落,在一些位置处幅度接近于零,此时信号淹没在噪声中,相位解调会产生较大的误差,严重时将导致安防系统发生误报,直接影响 ϕ -OTDR 系统工作的可靠性。

为了从含有相干瑞利噪声的探测信号中正确提取出相位信息,本文采用多频率光源对 ϕ -OTDR 系统中干涉衰落问题展开了深入的研究。实验发现,同一频率多次脉冲扫描得到的瑞利散射回波显示出相似的干涉衰落波形,而不同光频有不同的衰落波形。针对现有瑞利散射随机性和相干性物理模型不能完全描述干涉衰落现象的问题,对其进行改进,推出了瑞利后向散射系数是激光频率和有效折射率空间变化的函数,解释了上述实验结果。为了区分并排除在单一频率的情况下由于干涉衰落导致的误报,提出了一种基于多频率综合判决的方法,通过同时解调三种不同频率的拍频信号相位信息,同时以幅度大小作为判断相位解调正确与否的依据,从而鉴别出由于干涉衰落导致的误报,提高了整个

ϕ -OTDR 系统相位解调的准确性。

2 理论分析及仿真

2.1 瑞利散射随机性和相干性物理模型

光纤中干涉衰落通常可理解为在脉冲宽度区域内,许多波长量级的散射点共同叠加的结果,文献^[11]给出脉冲内干涉表达式为

$$\hat{r} = \sum_{i=1}^N r_i \exp(j\varphi_i) = r \exp(j\varphi), \quad (1)$$

式中 r_i 代表第 i 个散射点的振幅大小, φ_i 代表随机相位。由于大量散射点的叠加,散射振幅 r 服从瑞利分布,散射相位 φ 在 $[-\pi, \pi]$ 服从均匀分布^[9]。在(1)式中,对于沿光纤链路每个脉冲宽度来说,综合散射系数 \hat{r} 都是相同变化的,这不能解释干涉衰落现象。文献^[12]从偏振角度分析了该问题,提出了分偏振接收方案,但是每个偏振态以及两个偏振态之和均显示出类似的干涉衰落波形。这表明,消除偏振问题对系统的影响,并不能够完全解决干涉衰落问题。

值得注意的是,(1)式中假定传感光纤沿着链路是均匀的,但实际上,光纤受到温度 $T(z)$ 和应变 $\epsilon(z)$ 的影响,其有效折射率是光纤长度 z 的函数 $\beta = 2\pi n_{\text{eff}}[T(z), \epsilon(z)]/\lambda$,因此传输相位因子应当被写成

$$\hat{r}(z) = \int_0^z \beta(z) dz, \quad \text{那么综合散射系数可改写为}$$

$$\hat{r}(z) = \int_z^{z+\Delta z} r(z) \exp[j\varphi(z) + j2 \int \beta(z) dz] dz = |\hat{r}(z)| \exp[j\varphi(z)], \quad (2)$$

式中 $r(z)$ 、 $\varphi(z)$ 分别表示光纤单位长度上瑞利散射系数和随机散射相位。从(2)式中可以看出,改进后的综合散射系数取决于折射率的分布,既是光纤长度 z 的函数,同时也是波长 λ 的函数。(2)式在物理思想上与文献^[13]的“一维脉冲响应模型”一致,但给出了便于深入和定量研究的积分形式。

2.2 理论仿真

根据(2)式,假设 $r(z)$ 服从瑞利分布,即 $P(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)$ ($\sigma = 1.0$); 随机相移 $\varphi(z)$ 在 $[-\pi, \pi]$ 服从均匀分布; 光纤有效折射率空间变化幅度大小 0.00005, 周期为 5 m, 脉冲覆盖长度为 5 m。得到的仿真结果如图 1 所示。可以看出,仿真的瑞利散射波形呈现出干涉衰落波形,并随着激光频率变化而变化。

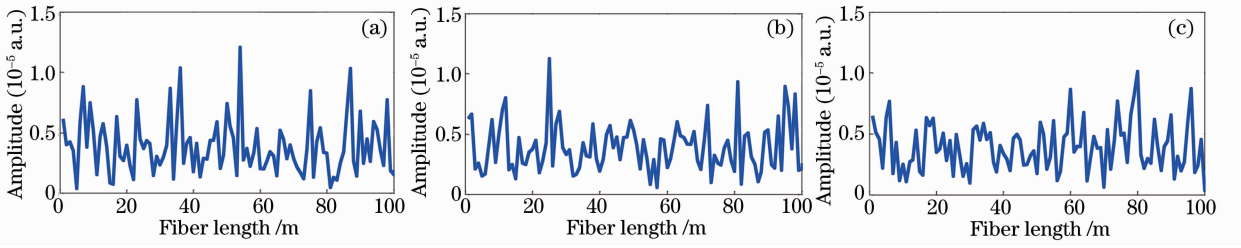


图 1 仿真波形图。(a) 波长为 1550 nm; (b) 在波长为 1550 nm 基础上上频移 70 MHz; (c) 在波长为 1550 nm 基础上下频移 70 MHz

Fig. 1 Simulation results of fading waveforms. (a) Wavelength of 1550 nm; frequency deviation of (b) +70 MHz and (c) -70 MHz, respectively, based on the wavelength of 1550 nm

2.3 正交解调算法

本实验系统采用相干接收方式, 后向瑞利散射光与本地光混频, 经双平衡探测器 (BPD) 后转换为电信号, 表示为

$$P_{\text{BPD}} \propto E_L E_0 |\hat{r}(z)| \sin[\Delta\omega t + \phi(z)], \quad (3)$$

式中 E_L 表示本地光振幅, E_0 表示散射回的瑞利光振幅, $\Delta\omega$ 表示瑞利散射光与本地光的频率差。假设本地光的初始相位为零, 那么 $\phi(z)$ 表示瑞利后向散射光的相位。为了从拍频信号中提取出振幅和相位信息, 采用正交解调算法^[8,14], 两个正交分量可表示为

$$I = \langle P_{\text{BPD}} \cos(\Delta\omega t) \rangle \propto E_0 E_L |\hat{r}(z)| \sin \phi(z), \quad (4)$$

$$Q = \langle P_{\text{BPD}} \sin(\Delta\omega t) \rangle \propto E_0 E_L |\hat{r}(z)| \cos \phi(z). \quad (5)$$

那么后向瑞利散射光的振幅和相位信息可以表示为

$$E_0 E_L |\hat{r}(z)| = \sqrt{I^2 + Q^2}, \quad (6)$$

$$\phi(z) = \arctan(I/Q). \quad (7)$$

当外界扰动导致某个位置处光纤折射率或长度变化时, 在该位置处瑞利散射光的相位发生变化。通过检测扰动位置前后两点间的相位差, 就可以获得外界扰动的位置、相位和频率信息。

3 实验装置

实验装置如图 2 所示。系统光源是自制的短腔单频光纤激光器 (FL), 线宽为 2 kHz, 输出功率为 20 mW。其输出被分成两部分, 90% 用作信号光、10% 用作本地光。信号光波首先入射到相位调制器 (PM), 其调制频率为 70 MHz, 从而在光载波中心频率附近产生许多等间隔的边频; 声光调制器 (AOM) 将连续光调制成脉冲光, 脉宽为 50 ns, 重复频率为 10 kHz, 同时声光调制器引入 160 MHz 的上频移; 随后脉冲光经过掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大, 通过环形器注入到被测传感光纤中。光纤中返回的瑞利散射光与本地光混合后得到的拍频信号最后由 BPD 接收。数据采集卡 (DAQ) 采集 BPD 输出的电信号, 之后进行相关数据处理。

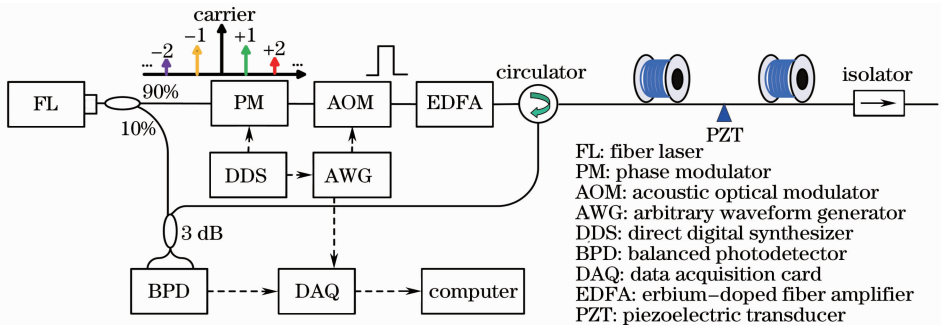


图 2 多频率相位解调 ϕ -OTDR 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of phase-demodulated ϕ -OTDR with a multi-frequency source

相位调制后的光场可以表示为^[15-17]

$$E_{\text{PM}} = E_0 \exp[-j(\omega t + \varphi_m \sin \omega_m t)] = E_0 \exp(-j\omega t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\varphi_m) \exp(-jn\omega_m t), \quad (8)$$

式中 ω_m 表示调制频率, J_n 表示第 n 阶贝塞尔函数, φ_m 表示相位调制深度。当调制深度为 $\varphi_m = 1.44$ 时, $J_0(\varphi_m) = J_{\pm 1}(\varphi_m)$, 0 级和 ± 1 级达到最大, 而其他高阶边频较小。实验中瑞利散射光与本地光拍频后的

信号功率谱如图 3 所示,0 级拍频频率为 160 MHz,其他级次拍频信号对称分布在其左右,-3 级的拍频信号显示在图中+50 MHz 频率位置处。

4 结果与分析

通过数字相干检测方法^[8,14],对采集到的数据进行分析,得到了拍频信号的幅度信息。图 4(a)给出了单个探测脉冲的拍频信号幅度随着光纤长度的变化曲线,显示出了干涉衰落变化波形,这和先前文献^[3,6,8]报道的结果一致。图 4(b)、(c)和(d)分别描述了三个不同拍频信号(90、160、230MHz)各自对

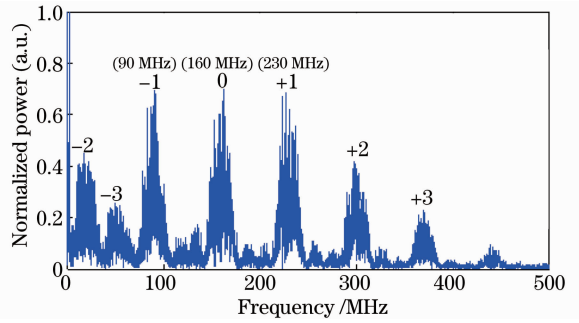


图 3 拍频信号功率谱图

Fig. 3 Measured spectrum of beat signals of return wave 对应的 400 条幅度曲线叠加的结果。

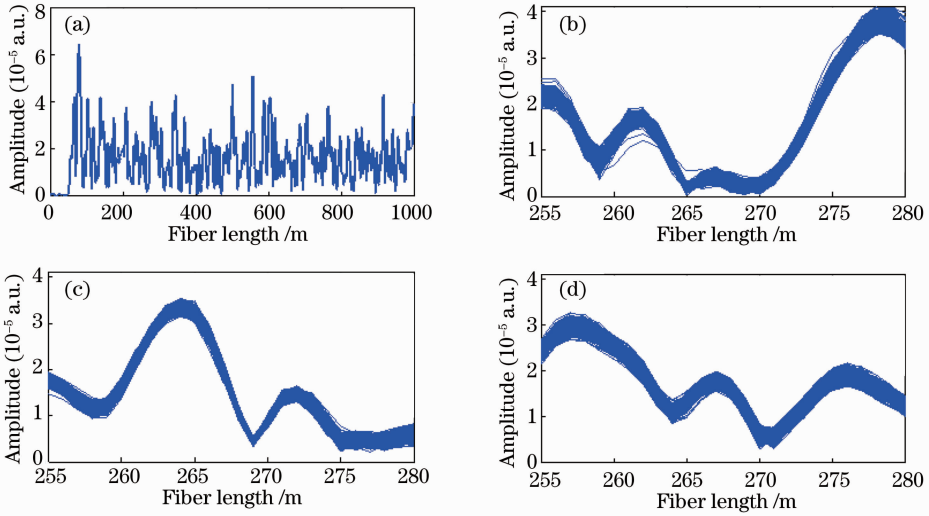


图 4 (a) 光纤长度为 1 km 时,单个探测脉冲拍频信号幅度随着光纤长度变化曲线图;(b), (c), (d) 分别表示不同拍频信号 400 条幅度曲线叠加的结果

Fig. 4 (a) Signal versus position waveform for 1 km fiber; (b), (c), (d) detailed waveforms for different optical frequencies

从图 4 中可以明显看出:首先,同一频率 400 次脉冲扫描序列的瑞利散射回波显示出了相似的波形,即不同脉冲扫描获得相似的空间变化;其次,不同光频的干涉衰落波形有明显的差别;第三,不同频率的衰落波形相邻峰的间隔大小也是相似的。由以上特征可以得出后向瑞利散射系数是激光器频率和

空间有效折射率波动的函数。这一现象和特征,是提出(2)式的实验基础。

在相位解调 ϕ -OTDR 系统中,对于那些瑞利散射信号幅度接近于零的位置,即干涉衰落点,信号淹没在噪声中,此时相位解调会产生较大的误差,严重时将导致系统出现误报,如图 5 所示,错误的相位解

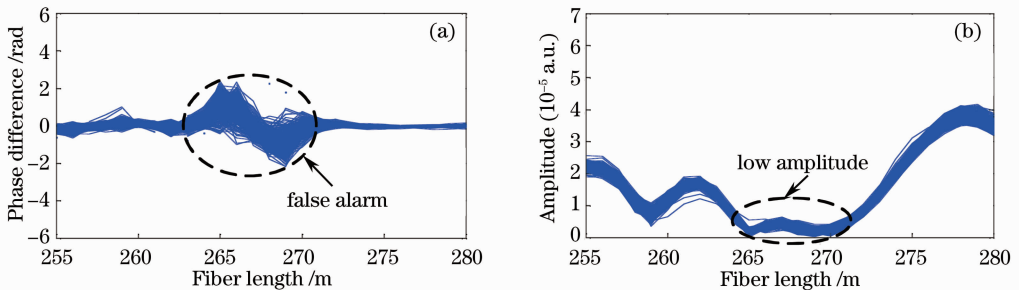


图 5 (a) 拍频信号为 90 MHz 时,相位解调出现误报位置在 265~270 m;(b)对应位置处拍频振幅曲线图

Fig. 5 (a) A false alarm around 265~270 m for beating frequency of 90 MHz; (b) amplitude trace for beating frequency of 90 MHz at the corresponding location

调出现的位置和干涉衰落位置一一对应。实验中用施加正弦信号的压电传感器(PZT)作为模拟振动源,加载在光纤 685 m 的位置处,分别对中心频率 90,160,230 MHz 拍频信号进行相位解调,实验结果如图 6 所示。从图中可以看出,在光纤位置 685 m 处,对于三个拍频信号,PZT 振动均使得相位

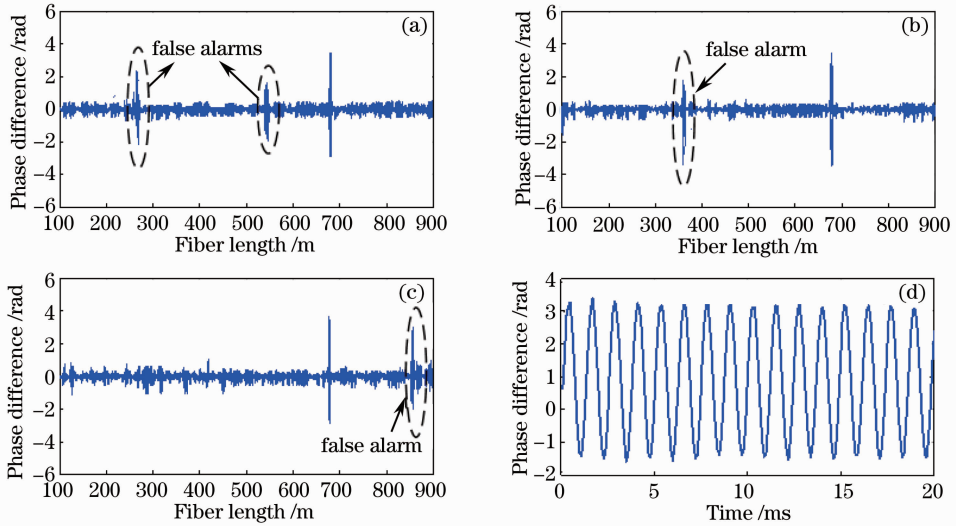


图 6 (a), (b), (c) 分别表示拍频信号为 90,160,230 MHz 解调的相位差曲线图;(d) 探测到的正弦振动信号
Fig. 6 (a), (b), (c) Demodulated phase difference traces for beating with three frequencies of 90, 160, 230 MHz;
(d) detected sinusoidal vibration

三个不同拍频信号振幅曲线图以及平均后的结果如图 7 所示。可以看出,经过三个不同拍频信号平均后的振幅曲线波动明显减小,没有零振幅出现。这表明对应于三个拍频信号,振幅不可能同时为零。也就是说,对应于三个拍频信号,至少有一个正确的相

差发生变化。但是对于那些干涉衰落点,由于采用三个不同的拍频频率,干涉衰落的位置会随着激光频率改变而相应地发生改变,因而同一位置处的干涉衰落点同时出现的几率大大减小,所以可以通过多频率综合判决的方法来区分并排除干涉衰落导致的误报。

位解调,它的准确程度由该位置处解调幅度大小来决定。因此选用三个拍频信号对应位置幅度最大用做相位解调,这样可以保证相位解调的准确性。优化后相位差曲线如图 8 所示,从图中可以看出,该方法可以有效去除光纤沿线由于干涉衰落导致的误报。

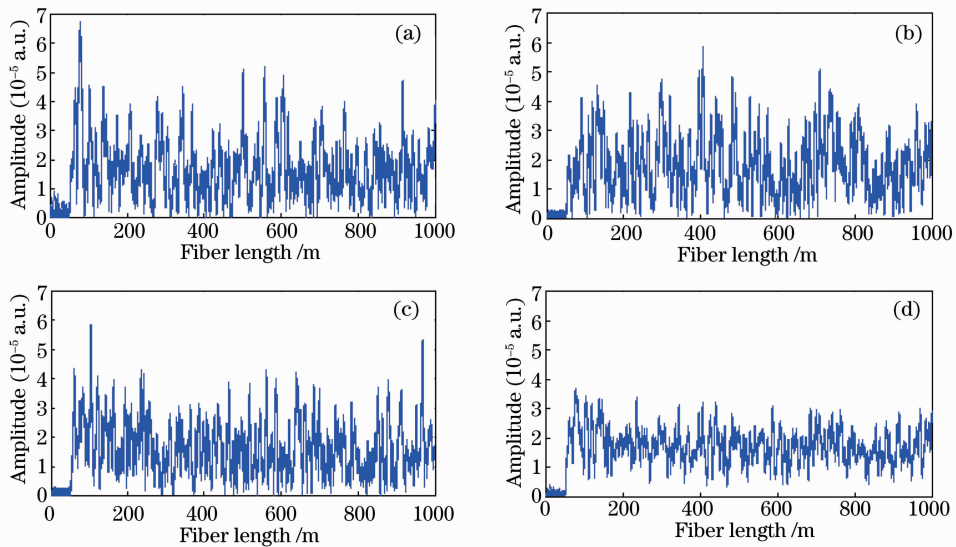


图 7 (a), (b), (c) 分别表示三个不同拍频信号振幅曲线图;(d) 三个不同频率拍频信号平均后的振幅曲线图
Fig. 7 (a), (b), (c) Comparison of fading waveforms for beating with three frequencies of 90, 160, 230 MHz;
(d) averaged waveform for three frequencies

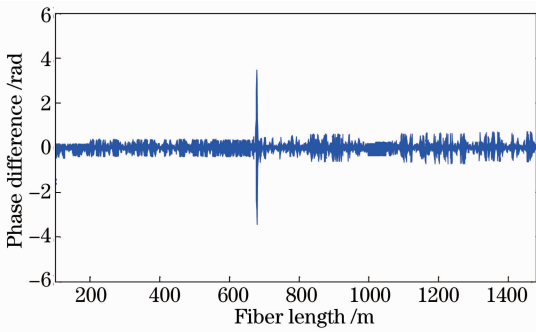


图 8 优化后相位差曲线图

Fig. 8 Optimized phase difference waveform

5 结 论

对 ϕ -OTDR 系统中干涉衰落问题进行了研究。实验发现,同一频率不同脉冲序列获得的瑞利散射信号具有相似的波形,并随着激光频率变化而变化。在现有瑞利散射随机性和相干性物理模型基础上提出了改进,解释了上述的实验现象。为了消除由于干涉衰落导致的系统误报,提出了一种基于多频率综合判决的方法,该方法可以有效地区分并排除干涉衰落导致的误报,提高了整个 ϕ -OTDR 系统相位解调的准确性。

参 考 文 献

- 1 Lü Yuelan, Xing Yongwei. Investigation on Rayleigh scattering waveform in phase optical time domain reflectometer[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0819001.
吕月兰, 行永伟. 相位光时域反射计瑞利散射波形特性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0819001.
- 2 H F Taylor, C E Lee. Apparatus and Method for Fiber Optic Intrusion Sensing[P]. US Patent: 5194847. 1993-3-16.
- 3 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.
- 4 J C Juarez, H F Taylor. Field test of a distributed fiber-optic intrusion sensor system for long perimeters[J]. Appl Opt, 2007, 46(11): 1968–1971.
- 5 S Furukawa, K Tanaka, Y Koyamada, *et al.*. High dynamic range coherent OTDR for fault location in optical amplifier systems[C]. Proc IMTC, 1994, 1: 106–109.

- 6 H Iida, Y Koshikiya, F Ito, *et al.*. Ultra high dynamic range coherent optical time domain reflectometry [C]. SPIE, 2011, 7753: 77533J.
- 7 Y L Lü, T Zhu, L A Chen, *et al.*. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR [J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(22): 3243–3249.
- 8 Z Pan, K Liang, Q Ye, *et al.*. Phase-sensitive OTDR system based on digital coherent detection [C]. SPIE, 2011, 8311: 83110S.
- 9 P Healey. Fading in heterodyne OTDR[J]. Electron Lett, 1984, 22(1): 30–32.
- 10 K Shimizu, T Horiguchi, Y Koyamada. Characteristics and reduction of coherent fading noise in Rayleigh backscattering measurement for optical fibers and components[J]. J Lightwave Technol, 1992, 10(7): 982–988.
- 11 J H Park, W K 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]. SPIE, 1998, 3555: 49–56.
- 12 J C Juarez, H F Taylor. Polarization discrimination in a phase-sensitive optical time-domain reflectometer intrusion-sensor system[J]. Opt Lett, 2005, 30(24): 3284–3286.
- 13 Y Koyamada, K Kubota, K Hogari. Fiber-optic distributed strain and temperature sensing with very high measurand resolution over long range using coherent OTDR[J]. J Lightwave Technol, 2009, 27(9): 1142–1146.
- 14 Liang Kezhen, Pan Zhengqing, Zhou Jun, *et al.*. Multi-parameter vibration detection system based on phase sensitive optical time domain reflectometer[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0805004.
梁可桢, 潘政清, 周俊, 等. 一种基于相位敏感光时域反射计的多参量振动传感器[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0805004.
- 15 F Zeng, J Yao. Investigation of phase-modulator-based all-optical band-pass microwave filter[J]. J Lightwave Technol, 2005, 23(4): 1721–1728.
- 16 Huang Cheng, Chen Lin, Yu Jianjun, *et al.*. Millimeter-wave generation utilizing one phase modulator[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(1): 73–76.
黄诚, 陈林, 余建军, 等. 采用单个相位调制器产生毫米波[J]. 中国激光, 2008, 35(1): 73–76.
- 17 Wang Xin, Chen Lin, Cao Zizheng. Influence of modulation depth on optical subcarrier OFDM system [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0506002.
王鑫, 陈林, 曹子峥. 调制深度对副载波正交频分复用光传输系统性能的影响[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0506002.

栏目编辑:何卓铭