

相位敏感型光时域反射传感系统光学背景噪声的产生机理及其抑制方法

张旭苹 张益昕 王峰 单媛媛 孙振铎 胡燕祝

The mechanism and suppression methods of optical background noise in phase-sensitive optical time domain reflectometry

Zhang Xu-Ping Zhang Yi-Xin Wang Feng Shan Yuan-Yuan Sun Zhen-Hong Hu Yan-Zhu

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 66, 070707 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.070707

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.070707>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光学微操纵过程的轴平面显微成像技术

[Observation of particle manipulation with axial plane optical microscopy](#)

物理学报.2017, 66(1): 010702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.010702>

荧光激光雷达技术探测水面油污染系统仿真研究

[Simulation of fluorescence lidar for detecting oil slick](#)

物理学报.2016, 65(7): 070704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.070704>

同步辐射中双压电片反射镜的研究现状

[Present research status of piezoelectric bimorph mirrors in synchrotron radiation sources](#)

物理学报.2016, 65(1): 010702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.010702>

基于激光诱导叶绿素荧光寿命成像技术的植物荧光特性研究

[Study of plant fluorescence properties based on laser-induced chlorophyll fluorescence lifetime imaging technology](#)

物理学报.2015, 64(19): 190702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.190702>

一种新型的用于差分吸收激光雷达中脉冲式光学参量振荡器的种子激光器的频率稳定方法

[A novel frequency stabilization method for the seed laser of the pulse optical parametric oscillator in differential absorption lidar](#)

物理学报.2015, 64(2): 020702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.020702>

专题: 光纤传感

相位敏感型光时域反射传感系统光学背景噪声的产生机理及其抑制方法*

张旭莘¹⁾²⁾ 张益昕^{1)2)†} 王峰¹⁾²⁾ 单媛媛¹⁾ 孙振铎¹⁾ 胡燕祝³⁾

1)(南京大学光通信工程研究中心, 南京 210093)

2)(南京大学近代声学教育部重点实验室, 南京 210093)

3)(北京邮电大学自动化学院, 北京 100876)

(2017年1月23日收到; 2017年3月26日收到修改稿)

相位敏感型光时域反射(Φ -OTDR)传感系统具有响应速度快、灵敏度高优点, 能够实现对微弱扰动的分布式检测, 在重大设施的入侵警戒、大型工程结构的健康监测等领域具有广阔应用前景. 然而, 与传统的OTDR传感系统不同, Φ -OTDR系统中存在着激光器中心频率漂移、偏振相关的噪声、光纤应变与干涉强度非线性对应关系引起的测量失真等光学背景噪声, 对有效信号的提取形成了不可忽视的干扰, 从而限制了 Φ -OTDR传感系统在实际应用环境下的传感性能. 本文对这些光学背景噪声的产生机理进行了深入分析, 并提出了相应的噪声抑制方法. 实验结果表明, 本文提出的方法可以有效抑制 Φ -OTDR传感系统中的光学背景噪声, 并显著提高传感系统性能.

关键词: 相位敏感型光时域反射, 光学背景噪声, 光源频漂, 偏振相关噪声

PACS: 07.60.-j, 42.81.Wg, 42.25.Kb

DOI: 10.7498/aps.66.070707

1 引言

1993年, 相位敏感型光时域反射计(phase-sensitive optical time domain reflectometer, Φ -OTDR)由Taylor和Lee^[1]首次提出. 该传感系统通常采用kHz级别的窄线宽激光器作为光源, 通过检测传感光纤中瑞利背向散射(RBS)信号干涉引起的光功率波动来感知光纤所受到的外部扰动.

Φ -OTDR灵敏度极高^[2-4]、测量响应速度快^[5-7]且能够实现长距离全分布式传感^[8,9], 非常适合对微扰动事件的监测, 在大型建筑结构健康监测^[2]、重要场所的周界安防^[10]等领域有着广泛的应用. 然而 Φ -OTDR传感系统中存在着有别于

传统OTDR传感系统的光学背景噪声, 主要包括由激光器中心频率漂移引起的曲线畸变, 由光纤局部双折射变化引起的偏振相关噪声(PRN)以及由于光纤应变与干涉强度非线性对应关系引起的测量失真. 这些光学背景噪声会显著降低系统的灵敏度和精确度, 从而限制 Φ -OTDR传感系统的整体传感性能.

本文基于 Φ -OTDR传感系统的经典理论模型, 对上述光学背景噪声的产生机理进行研究, 通过对经典模型的修正和实验的验证, 揭示产生这些光学背景噪声的物理本质. 并根据噪声的成因, 提出相应的噪声抑制方法, 以期实现对该类传感系统的性能提升, 克服其在工程应用中的技术瓶颈.

* 国家自然科学基金(批准号: 61627816, 61540017, 61405090, 61307096)和北京财政支持的“城市地下基础设施的光纤检测平台”资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ziyixin@nju.edu.cn

2 相位敏感型光时域反射计传感原理

传统的光时域反射计(OTDR)一般采用线宽较宽的激光器作为光源,通过向待测试光纤注入探测光脉冲并检测光纤中由光脉冲产生的RBS信号的强度,实现对光纤衰减量的分布式测量^[11-14]. 在应用中人们发现,若采用窄线宽激光器作为光源,本应平滑的OTDR曲线会产生随机的幅度波动,这一波动现象被称为相干衰落效应^[15,16],其产生与否与光源的相干长度有关. 通常激光器产生的探测光的相干长度 L_c 可以由(1)式进行估算:

$$L_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}, \quad (1)$$

其中 λ 为激光器的中心波长, $\Delta\lambda$ 为激光的光谱宽度(以波长为单位),相干长度 L_c 表示光源能够发生干涉的最大光程差. 同一光源发出的激光,若光程差在相干长度以内,那么就必须考虑两者的干涉效应;反之,若光程差远远大于相干长度(一般取值为相干长度的10倍以上),那么就不会产生干涉效应. 当OTDR系统采用窄线宽激光器作为光源时,光源的相干长度远大于探测光脉冲长度,此时必须考虑脉冲产生的RBS信号间的干涉效应.

在最初的OTDR应用中,这种强度随机的起伏被认为是一种干扰正常测量的噪声^[15,16]. 但是进一步的研究发现:当光源稳定且光纤不受扰动时,光纤中返回的RBS信号将呈现稳定的干涉起伏模式,每条光功率曲线上的起伏波动形状相同,不会随着时间而变化. 反之,当光纤上某局部区域受到外部事件扰动时,该处返回的RBS信号的干涉起伏模式将发生改变,即光功率曲线上对应位置的起伏波动形状将产生变化. Φ -OTDR就是基于RBS信号干涉起伏模式对外界扰动敏感这一特性实现传感测量的一种新型传感系统,该系统通常采用kHz级别的窄线宽激光器作为光源,实现对沿光纤分布的微弱扰动事件的连续分布式感测.

光纤中的瑞利散射来源于纤芯折射率的微观折射率波动. 从尺寸上来说,这些折射率波动的大小远远小于入射光的波长,所以可以近似地把这种折射率波动的位置看作是一个个空间上离散的“散射点”^[15]. 探测光脉冲在光纤中传播的同时,脉冲覆盖的大量散射点将独立地产生瑞利散射信号. 其中一部分散射光被光纤俘获,能够沿光纤反向传输,即如图1所示的RBS信号光.

由于这种散射点是由纤芯材料本身的特性引起的,所以具有以下性质^[15]:

- 1) 散射点的位置在光纤中是随机分布的,因此各个散射点产生的RBS信号的相位随机分布在 $[0, 2\pi]$ 区间之内,且其概率密度函数符合均匀分布;
- 2) 各散射点的散射率是随机的,因此各个散射点产生的RBS信号的强度也是随机分布的,且其概率密度函数符合高斯分布.

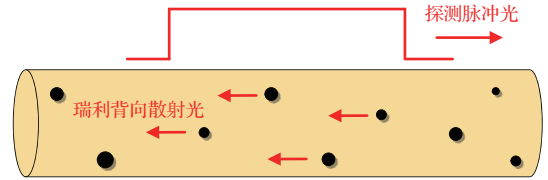


图1 光纤中的散射点模型示意图

Fig. 1. The model of the scattering points in the fiber.

对于在某一时刻回到接收端的RBS信号,可以认为其是光纤中某一局部区域内散射点被探测光脉冲覆盖时产生的RBS信号的叠加. 在用数学模型对其进行描述时,普遍做如下假设:

- 1) 光纤中的探测光脉冲被认为是理想的单频光,且不存在频率漂移问题;
- 2) 忽略偏振不匹配问题,认为输入光在脉冲宽度以内偏振态近似保持一致^[17];
- 3) 忽略光纤损耗.

设注入传感光纤中的探测光脉冲在光纤中的空间长度为 W ,探测脉冲前端进入待测光纤的时刻为0时刻. 假设光纤长度足够长时,时刻 t 回到起始端的瑞利散射信号电场强度可以表示为^[18]

$$E(t) = \sum_{i=1}^N E_0 \rho_i \cos(2kx_i - \omega_0 t + \varphi_0) \times \text{rect}\left(\frac{4x_i - 2v_g t + W}{2W}\right), \quad (2)$$

其中, E_0 为探测脉冲的电场强度; ω_0 为探测脉冲的角频率; φ_0 为探测光的初始相位; v_g 为探测脉冲在待测光纤中的传播速度, $v_g = c/n$,其中, c 表示真空中的光速, n 为光纤的折射率; k 是探测光在待测光纤中的波数,有 $k = 2\pi n/\lambda$; N 表示待测光纤中的散射点总数,散射点随机分布在整条光纤中,并按与入射端的距离从近到远依次编号为 $1, 2, 3, \dots, N$; x_i 和 ρ_i 分别表示光纤中第 i 个散射点的位置和散射系数. $\text{rect}(x)$ 表示矩形函数,其取值为

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq 1/2, \\ 0, & \text{else where.} \end{cases} \quad (3)$$

从(2)式中可以看出, Φ -OTDR信号实际上是由 $W/2$ 长度以内的散射点产生的RBS信号叠加形成. 当激光器的线宽足够窄使得光源相干长度远大于 $W/2$ 时, 这个叠加过程必然发生强烈的干涉效应. 由于散射点位置和反射率的随机性, 将导致光纤的不同位置处背向散射光的干涉强度产生随机波动, 形成特定的干涉起伏模式.

现假设在某一确定时间点 $t = t'$, 接收端接收到的RBS信号的电场强度为 $E(t')$. 它是光纤某位置处一系列散射点RBS信号的叠加. 假设这一系列散射点编号为 $[x_a, x_{a+1}, x_{a+2}, \dots, x_b]$ ($a < b$). $[x_a, x_{a+1}, x_{a+2}, \dots, x_b]$ 代表了光纤中在时刻 $t = t'$ 能够产生RBS信号的散射点, 其是光纤中全部散射点集合 $[x_1, x_2, x_3, \dots, x_N]$ 的一个子集. 则 $E(t')$ 可以表示为

$$E(t') = \sum_{i=a}^b E_0 \rho_i \cos(2kx_i - \omega_0 t' + \varphi_0). \quad (4)$$

光电探测器输出的光电流可以写为

$$I(t') \propto E^2(t') = E_0^2 \left[\sum_{i=a}^b \rho_i \cos(2kx_i - \omega_0 t' + \varphi_0) \right]^2, \quad (5)$$

将其展开并忽略2倍光频项, 得到

$$I(t') \propto E_0^2 \sum_{i=a}^b \rho_i^2 + 2E_0^2 \sum_{j>i}^b \sum_{i=a}^b \rho_i \rho_j \times \cos[2k(x_j - x_i)]. \quad (6)$$

(6) 式中包含两项, 其中前一项为光电流的直流分量, 表示光纤上每一个独立散射点的RBS功率之和; 后一项是交流分量, 表示同一脉冲中不同散射点之间的RBS干涉产生的波动信号. 交流分量是 Φ -OTDR传感系统用于感测外部扰动事件的信号分量, 这一项所占的比重可以用相干可视度表示, 可视度越高, 通常认为系统的原始信噪比越好. 显然, 在时刻 t' 时交流分量的幅度主要取决于以下两项因素:

1) 探测光脉冲的参数, 包括光频 k 和脉冲宽度 W , 传统上通常认为这两个参数在传感系统工作时近似为常量;

2) 光纤内散射点的特性, 包括相对分布位置 $|x_j - x_i|$ 和各自的散射率 ρ_i, ρ_j .

当外界环境的变化对光纤产生扰动时, 该扰动处所对应的散射点及其之后的散射点所产生的散

射光都将被叠加上一个额外的相移 φ_v . 若扰动处的散射点为第 q 个散射点, q 属于 $[1, b]$, 则扰动前与扰动后的电流强度变化 ΔI 为

$$\Delta I \propto 2E_0^2 \sum_{i=1}^{q-1} \sum_{j=q}^b \rho_i \rho_j [\cos \varphi_{ij} - \cos(\varphi_{ij} + \varphi_v)], \quad (7)$$

其中, $\varphi_{ij} = \varphi_i - \varphi_j = 2k(x_i - x_j)$. 由(7)式可以看出, 即使是众多散射点中的一个受到了扰动, 也会造成输出电流信号的剧烈变化, 实际上, 这正是绝大多数现有的 Φ -OTDR 传感系统探测微弱扰动事件的原理.

3 Φ -OTDR 传感系统中光学背景噪声的来源

在 Φ -OTDR 传感系统中, 由于激光器中心频率漂移、光纤局部双折射变化以及光纤应变与干涉强度的非线性对应关系, 都会给系统引入相应的噪声, 影响 Φ -OTDR 传感系统的传感灵敏度以及探测精确度. 下面将对上述光学背景噪声的成因进行分析.

3.1 激光器中心频率漂移引起的曲线畸变

传统 Φ -OTDR 的理论模型假设光纤中的探测光脉冲是理想的单频光, 且不存在频率漂移问题. 但是实际上, 普通商用窄线宽激光器的长期稳定性并不理想, 光源频漂始终无法避免. 当激光器中心频率变化 Δf 时, 在 t' 时刻接收到的 Φ -OTDR 曲线功率可表示为

$$I(t') \propto E_0^2 \sum_{i=a}^b \rho_i^2 + 2E_0^2 \sum_{j>i}^b \sum_{i=a}^b \rho_i \rho_j \cos[2k(x_j - x_i) + 2\pi \Delta f t']. \quad (8)$$

从(8)式可以很明显地看出, Φ -OTDR 系统所探测的RBS信号的强度对光源的频率漂移是极为敏感的. 为了验证这种敏感性的存在, 我们使用约 6 km 的传感光纤搭建了 Φ -OTDR 传感系统进行试验. 光纤被放置于隔离箱内, 隔绝外部环境对光纤的扰动. 探测光脉冲宽度 250 ns, 每次探测的时间间隔为 50 ms. 实验中激光器的频率漂移速率约为 1.5 MHz/s. 图2所示的是测得的 Φ -OTDR 曲线中 5 km 附近的局部放大图. 不同时刻获取的

Φ -OTDR 曲线被记录下来, 用于比较这些曲线之间的幅度差异.

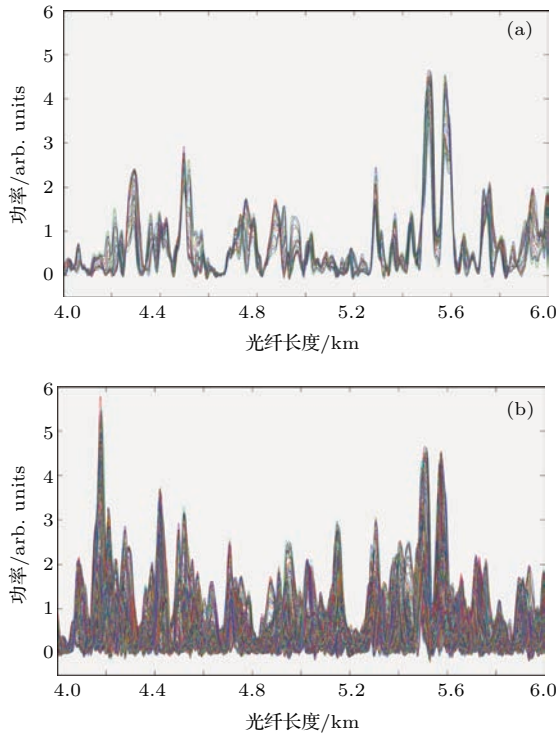


图2 一定时间内得到的 Φ -OTDR 曲线形状畸变 (a) 记录时间长度为 1 s 时, 获取的 20 条 Φ -OTDR 曲线; (b) 记录时间长度为 5 s 时, 获取的 100 条 Φ -OTDR 曲线
 Fig. 2. The curve distortion of Φ -OTDR: (a) 20 traces of Φ -OTDR within 1 s; (b) 100 traces of Φ -OTDR within 5 s.

如图 2 所示, 即使在没有外部扰动的情况下, 由于光源频漂的影响, Φ -OTDR 曲线形状还是会发生畸变. 且随着时间的增长, 曲线畸变会越来越严重. 由光源频漂带来的这种曲线畸变是缓慢变化的, 在较短的测量时间内, 曲线的畸变并不严重, 可以通过添加数字高通滤波器加以抑制, 因此对高频扰动信号探测的影响较小. 但是当光纤上的扰动事件也是低频的、缓变的振动信号时, 就需要比较长的监测时间才能俘获整个振动周期. 在这种情况下, 由光源频漂带来的 Φ -OTDR 曲线畸变问题将严重恶化系统的原始信噪比, 最终会导致低频扰动事件检测失败.

为了更好地考察激光频率漂移量和曲线幅度畸变程度之间的关系, 假定除激光频率外的其他所有参量均保持不变. 当激光源频率为 f 和 $f + f_d$ 时, RBS 信号的光电流分别为 $I(f)$ 和 $I(f + f_d)$. 在实际系统中, 最终都会通过模数转换器 (ADC) 对 Φ -OTDR 曲线进行数字化, 因此不妨假设 Φ -OTDR

曲线 $I(f)$ 和 $I(f + f_d)$ 均由离散的 M 个采样点组成. 由于光源频率 f 改变了 $+f_d$, 那么这两条曲线的形状将产生一定差异. 根据概率论和统计学中互相关计算的定义, 这两条 Φ -OTDR 曲线的互相关值可以由下式计算 [19]:

$$C[I(f), I(f + f_d)] = \frac{\sum_{i=1}^M [I(f) - \langle I(f) \rangle] \cdot [I(f + f_d) - \langle I(f + f_d) \rangle]}{\sqrt{\sum_{i=1}^M [I(f) - \langle I(f) \rangle]^2 \cdot \sum_{i=1}^M [I(f + f_d) - \langle I(f + f_d) \rangle]^2}}, \quad (9)$$

其中 $\langle I(f) \rangle$ 为 $I(f)$ 的平均值

$$\langle I(f) \rangle = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M I(f). \quad (10)$$

进一步简化后得到 [20]:

$$C(f_d, w) = \frac{\sin^2(\pi f_d W)}{(\pi f_d W)^2}. \quad (11)$$

通常脉冲宽度 W 可以近似认为是常数, 则由 (11) 可知: 当光频保持一致时, 得到的两条 Φ -OTDR 曲线互相关值为 1, 表示曲线形状完全相同无畸变; 当光频差值变化时, 得到的两条 Φ -OTDR 曲线的互相关值逐渐变小, 说明曲线畸变越来越严重.

3.2 光纤局部双折射变化引起的偏振相关噪声

传统的 Φ -OTDR 理论模型中, 光电探测器在 t 时刻接收的瑞利散射信号是传感光纤 $z = v_g t/2$ (考虑往返过程) 处及之后 $W/2 = L$ 长度范围内所有散射点产生的 RBS 光的叠加. 传统模型中假设输入光在上述光纤长度范围内的偏振态一致. 而在实际情况中, 由于光纤的双折射, 探测光脉冲在快轴和慢轴的传输模式稍有不同, 因而以固定偏振态进入光纤的光将以随机方式改变其偏振态, 如图 3 所示. 在普通单模光纤中, 两个模式在光纤中传输时其功率是周期性交换的, 此周期的典型长度约为数十米 [21].

当外界扰动事件通过挤压、弯曲或者扭转作用于传感光纤时, 光纤局部双折射特性将发生变化, 探测光脉冲在传感光纤中经过该区域时偏振态会受到调制, 其之后的偏振态演化规律也会改变, 导

致RBS信号的偏振态演化规律被扰乱, 这将产生PRN. PRN将会叠加在该局部区域之后的RBS信号中, 最终可能导致 Φ -OTDR难以同时探测多个扰动事件.

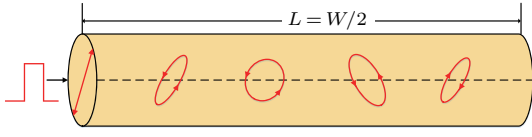


图3 探测光脉冲偏振态沿光纤的演化过程

Fig. 3. The transformation of the polarization state of probe pulse.

上述 L 范围内的探测光偏振态的不同可认为由以下两种因素导致: 1) 光纤线性双折射使探测光脉冲在光纤快轴和慢轴的分量之间有一个附加的相位延迟^[22]; 2) 光纤圆双折射将会使探测光脉冲的偏振态旋转一定的角度^[23]. 由于RBS信号有往返的过程, 圆双折射引起的偏振态旋转将会在往返过程中相互抵消, 即光纤圆双折射不会影响RBS信号的最终偏振态, 所以我们仅需考虑光纤中线性双折射的影响. 为了分析光纤双折射对 Φ -OTDR的影响, 将上述 L 范围起始端的探测光脉冲 E_{in} 根据琼斯矢量形式在光纤快轴和慢轴(分别用 x 轴和 y 轴表示)上分解为相互垂直的两个分量^[22,24]:

$$\mathbf{E}_{in} = E_0 e^{i\omega_0 t + \varphi_0} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \cdot e^{i\delta} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

其中 E_0 表示探测光脉冲 \mathbf{E}_{in} 的电场幅度, $\cos \theta$ 和 $\sin \theta$ 分别表示 x 轴和 y 轴上分量的比例系数, δ 为两个分量之间的相位差, ω_0 是探测光脉冲的角频率, φ_0 是探测光脉冲的初始相位.

探测光脉冲在 x 轴和 y 轴上的分量是正交的, 这两个正交的分量在 L 范围内独自产生的RBS信号可以用传统的 Φ -OTDR模型分别加以描述:

$$\begin{cases} E_x(t) = \sum_{i=1}^M (E_0 \cos \theta) \rho_i \cos(2\beta_x x_i - \omega_0 t + \varphi_0), \\ E_y(t) = \sum_{i=1}^M (E_0 \sin \theta) \rho_i \cos(2\beta_y x_i - \omega_0 t + \varphi_0 + \delta), \end{cases} \quad (13)$$

其中, M 表示 L 范围内光纤散射点总数, β_x 和 β_y 分别为 x 轴和 y 轴的传输常数. 光电探测器接收到的 x 轴和 y 轴的RBS信号功率 $I_x(t)$ 和 $I_y(t)$ 可分别表示为

$$\begin{cases} I_x(t) \propto \langle E_x^2(t) \rangle = K_x(t)^2 \cos^2 \theta, \\ I_y(t) \propto \langle E_y^2(t) \rangle = K_y(t)^2 \sin^2 \theta, \end{cases} \quad (14)$$

其中

$$\begin{cases} K_x(t)^2 = \left[E_0 \sum_{i=1}^M \rho_i \cos(2\beta_x x_i - \omega_0 t + \varphi_0) \right]^2 \\ = E_0^2 \sum_{i=1}^M \rho_i^2 + 2E_0^2 \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M \rho_i \rho_j \\ \quad \times \cos[2\beta_x(x_i - x_j)], \\ K_y(t)^2 = \left[E_0 \sum_{i=1}^M \rho_i \cos(2\beta_y x_i - \omega_0 t + \varphi_0 + \delta) \right]^2 \\ = E_0^2 \sum_{i=1}^M \rho_i^2 + 2E_0^2 \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M \rho_i \rho_j \\ \quad \times \cos[2\beta_y(x_i - x_j)]. \end{cases} \quad (15)$$

$K_x(t)$ 和 $K_y(t)$ 分别表示 x 轴和 y 轴上RBS干涉结果的幅度系数, 这两个系数反映了瑞利散射光的相干衰落程度, 同时也显示了 Φ -OTDR相位敏感性. 最后光电探测器接收到的 x 轴和 y 轴上的RBS功率可以表示为

$$\begin{aligned} I(t) &= I_x(t) + I_y(t) \\ &= K_x(t)^2 \cos^2 \theta + K_y(t)^2 \sin^2 \theta. \end{aligned} \quad (16)$$

从(16)式可以看出, RBS信号的功率 $I(t)$ 与 $K_x(t)$, $K_y(t)$, $\cos \theta$ 和 $\sin \theta$ 有关, 且功率的强度由 θ 的取值决定, 因此 Φ -OTDR对偏振态敏感. 为了更加直观地说明和验证 Φ -OTDR系统中PRN的产生机理, 我们进行了以下实验. 两个拉伸扰动事件分别作用在光纤的A点(0.36 km)和B点(1.38 km)处, 振动频率分别为3 Hz和5 Hz. 首先令这两个扰动事件都不改变光纤的双折射特性, 而仅仅产生对光纤的拉伸, 实验结果如图4(a)所示. 从图4(a)中可以看出, Φ -OTDR能够同时探测到扰动事件A和B.

然而, 当施加在A处的扰动事件是微弯扰动时, 将改变该处光纤的双折射特性, 探测光脉冲的偏振态就会被A处的微弯扰动所调制, 得到如图4(b)所示的结果. 可以看到A点之后的RBS信号被叠加上了PRN, 而且PRN幅度较强, 以至淹没了B处的振动信号. 上述实验结果验证了当扰动事件改变光纤双折射特性时会产生PRN, 并导致 Φ -OTDR多点扰动事件俘获能力的退化.

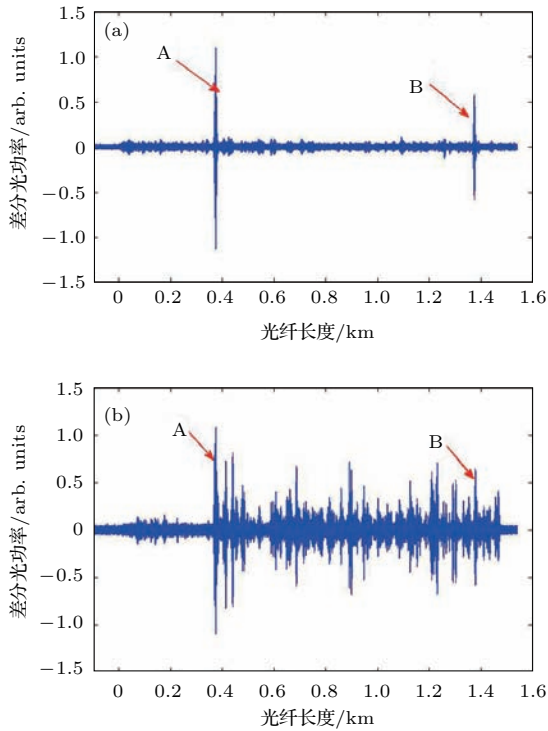


图4 A和B处的 Φ -OTDR曲线 (a) A和B处振动事件均未改变光纤双折射; (b) A处振动事件改变光纤双折射

Fig. 4. The Φ -OTDR traces of A and B: (a) The fiber birefringence of A and B are not changing; (b) the fiber birefringence of A is changing.

Juarze 等 [25] 曾提出使用偏振分集的方法收集 RBS 信号, 可以减少由于相干探测时偏振态失配引起的事件误判概率. 但是根据本文对 PRN 噪声成因的分析可知, 这种方法不能抑制 PRN 噪声的产生. 我们搭建了偏振分集探测型的 Φ -OTDR 系统进行实验验证. 在光纤 A 点 (0.6 km) 施加光纤微弯扰动, 在 B 点 (1.6 km) 拉伸扰动, 扰动频率仍为 3 Hz 和 5 Hz, 实验结果如图 5 所示. 从图 5 可以看出, 偏振分集探测无法抑制 PRN, 事件 B 依然完全被 PRN 所淹没.

3.3 光纤应变与干涉强度非线性对应引起的失真

传统的 Φ -OTDR 通常通过检测光纤中光脉冲产生 RBS 信号的强度来实现传感测量, 但这种鉴幅型的 Φ -OTDR 仅能检测到应变的发生位置及其频域信息, 而无法定量测量扰动引起的光纤应变的大小. 这主要是因为光纤内散射点的散射率和位置是随机分布的, 所以各个散射点产生的瑞利散射信号的强度和相位都是随机分布的. Φ -OTDR 系统所测得的光信号与光纤上加载的应变值没有确

定的、一一对应的关系, 甚至也难以维持单调关系, 从而引起测量失真. 图 6 所示即为对待测光纤某一部区域施加的 1 kHz 正弦振动信号, 所得到的 Φ -OTDR 曲线中对应区域的时域波形图 6 (a) 和频域能量分布图 6 (b). 可以看出, 光纤上的应变与干涉强度是非线性对应的. 此时, 时域波形失真, 难以提取信号特征. 频域能量分布向高次谐波移动并形成杂散分量, 降低传感系统动态范围.

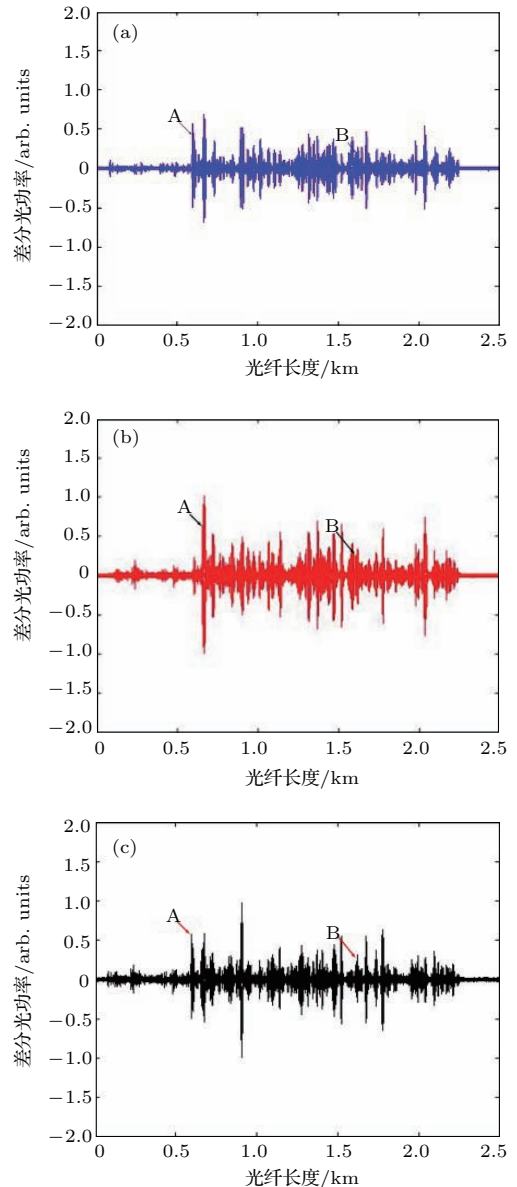


图5 偏振分集探测条件下的 PRN 噪声 (a) 滑动差分后 Φ -OTDR 曲线的线偏振态; (b) 滑动差分后 Φ -OTDR 曲线的正交偏振态; (c) (a) 和 (b) 曲线的累加

Fig. 5. The PRN of polarization diversity: (a) The linear polarization of the differential signals; (b) the orthogonal polarization of the differential signals; (c) the sum of (a) and (b).

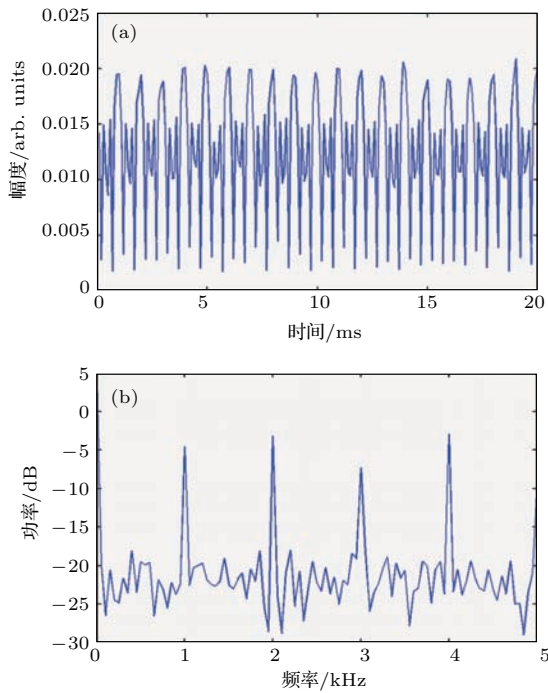


图6 应变和干涉强度非线性对应 (a) 1 kHz 正弦振动信号; (b) 频域能量分布
 Fig. 6. The nonlinear relationship between fiber strain and interference intensity: (a) The vibration signal of 1 kHz; (b) the energy distribution of frequency.

Φ -OTDR 也可以通过检测光脉冲产生的RBS的相位变化来实现传感测量, 这种鉴相型的 Φ -OTDR虽然可以在一定程度上获得线性测量结果, 但是由于RBS信号功率比较弱且存在衰落效应, 这就很难保证 Φ -OTDR传感系统具有较高的信噪比. 因此, 若能够设计一种测量方案, 使得对光纤应变的高灵敏度线性测量成为可能, 将大幅提升 Φ -OTDR传感系统的性能.

4 光学背景噪声的抑制方法及实验结果

由上述分析可知, Φ -OTDR传感系统中存在的光学背景噪声严重影响传感系统的检测灵敏度以及精确度. 因此, 针对上述三种噪声, 我们分别提出以下抑制方法.

4.1 基于主动光频扫描法补偿激光器频漂

相同光频的探测脉冲进行 Φ -OTDR探测所得到的 Φ -OTDR时域曲线形状相同, 而光频不同的探测脉冲得到的 Φ -OTDR时域曲线形状不同. 根

据这一性质, 通过光源的主动频率扫描技术和 Φ -OTDR曲线的互相关运算, 可以精确地求解出光源频率漂移的大小和方向, 并反馈控制激光器的输出功率, 使得 Φ -OTDR光频保持稳定, 最终实现抑制 Φ -OTDR曲线畸变的目的.

传统的 Φ -OTDR测试需要比较不同时刻获取的两条曲线之间的差别, 在时刻 T_0 和 T_1 分别进行了两次测量, 获取了对应的两条 Φ -OTDR曲线, 分别为 $I_{f_0}(t)$ 和 $I_{f_1}(t)$ (其中下标表示激光器的实际输出光频). 假设外部扰动仅存在于整条传感光纤有限的几个局部区域, 则在未发生光源频移时, 两条曲线的互相关值将趋近于1. 考虑到光源的频率漂移问题, 假设 T_1 和 T_2 时刻的激光器的原始输出光频发生了改变, 分别为 f_1 和 f_2 . 由于光频的不同, 根据(8)式可知, 两条 Φ -OTDR曲线 $I_{f_1}(t)$ 和 $I_{f_2}(t)$ 的波形将发生畸变. 为了补偿这种曲线畸变, 本文提出了基于光源频率扫描的频率补偿方案. 这种方法与传统的 Φ -OTDR测试方法的区别在于, 每一次测量中均在原始输出光频附近采用 P 个光频进行独立的测试, 如图7中不同颜色的曲线所示. 假设 T_1 和 T_2 的激光原始输出光频改变了 Δf , 即 $f_1 = f_2 - \Delta f$. 在 T_2 扫频结果中可以使用互相关计算来衡量扫频曲线与原始曲线的相似程度, 并选取互相关值最大的那条曲线作为原始曲线的同频曲线. 由于两者可以认为是由近似相同的光频产生的, $I_{f_1}(t)$ 将与 $I_{f_2-\Delta f}(t)$ 的波形近似保持一致, 如图7中绿色曲线表示. 从曲线之间的相似关系中可以进一步得知 $f_2 = f_1 + \Delta f$. 因此该方案可以通过曲线相似性的偏移来获取时刻 T_1 和 T_2 之间的光源频率漂移的大小和方向. 下一次扫频测量时, 可以令 $f_3 = f_1 + \Delta f$ 作为扫频的中心频率. 如果 $I_{f_3}(t)$ 与 $I_{f_2-\Delta f}(t)$ 的互相关值最大, 表示T3时刻的光源频漂补偿成功, T3时刻光源频率未发生偏移, 如图7中的T3时刻的 $I_{f_3}(t)$ 所示^[26].

若能够反复进行上述操作, 就可以持续地追踪光源频率漂移, 连续地进行补偿. 同时如果每次都提取最相似的 Φ -OTDR曲线作为有效数据, 就可以抑制由于光源频率漂移引起的曲线畸变问题. 利用这一补偿原理设计实验, 实验原理图如图8所示.

实验中, 选用的脉冲宽度为250 ns, Δf 和 P 的取值分别为400 kHz和20, 因此单次频率扫描范围为初始光频的两侧 $[-8$ MHz, $+8$ MHz]. 考虑到待

测光纤的长度约为6 km, 所以实验中不同探测脉冲之间的时间间隔设为65 μs. 实验中时间记录长度设为10 s, 获得100条互相关曲线, 我们可以通

过互相关峰值的漂移观察光源的漂移情况. 在这段时间内光源共漂移了6.4 MHz, 平均漂移速度为0.64 MHz/s, 如图9所示.

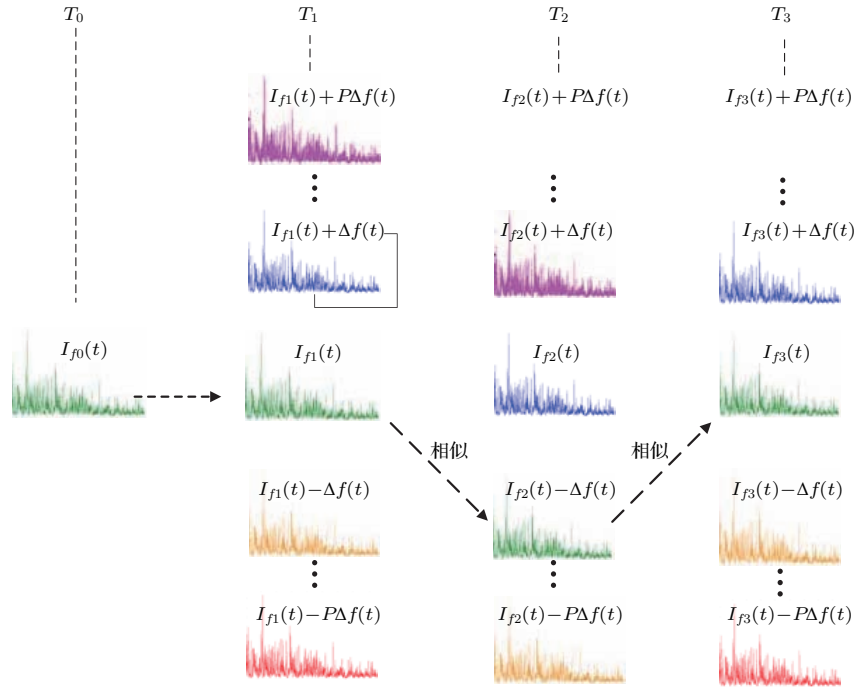


图7 主动光源频漂补偿方案的基本原理

Fig. 7. Principle of the active compensation method.

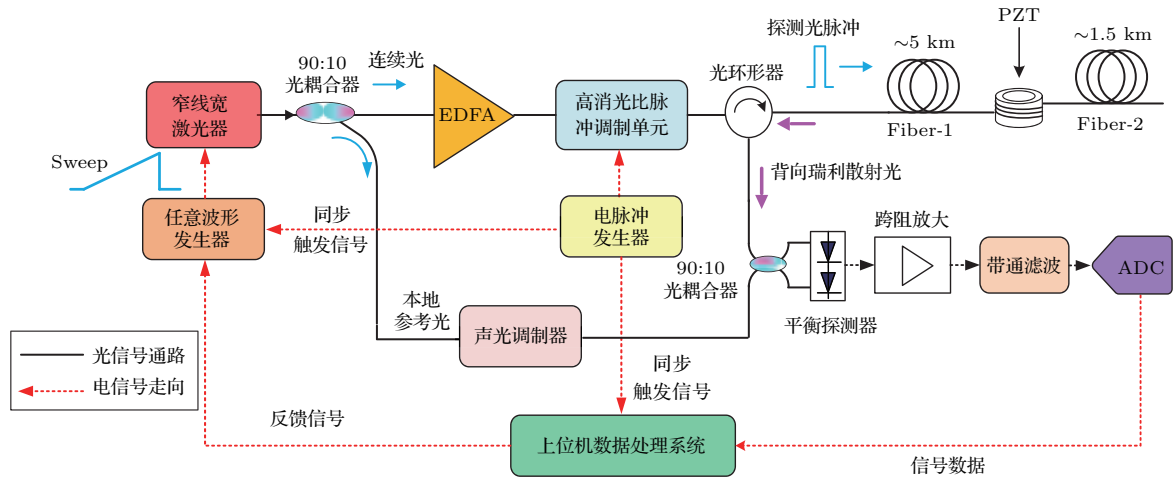


图8 基于主动扫频法的Φ-OTDR光源频漂补偿方法的原理示意图

Fig. 8. Experimental setup and principle of the active compensation method based on active laser frequency sweep.

利用主动扫频法对光源频漂进行补偿, 将记录时间10 s内获得的原始Φ-OTDR曲线分别绘制到图10(a)和图10(b)中进行比较. 可以看出, 在补偿之前, Φ-OTDR曲线的畸变较为严重, 淹没了原本应当存在于红色圆圈内的扰动事件; 而补偿后, 曲线之间的畸变得到了较好的抑制, 使得低频振动

引起的曲线幅度变化能够被观察到.

以上实验结果表明, 基于激光器主动频率扫描以及互相关算法可以对Φ-OTDR系统的光源频漂进行补偿, 使得由光源频漂带来的Φ-OTDR曲线畸变得到有效的抑制, 从而解决了Φ-OTDR系统难以检测低频扰动的难题.

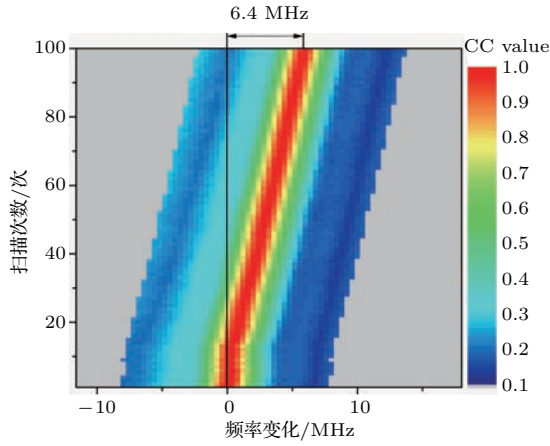


图9 互相关曲线漂移示意图

Fig. 9. The cross-correlation of the frequency.

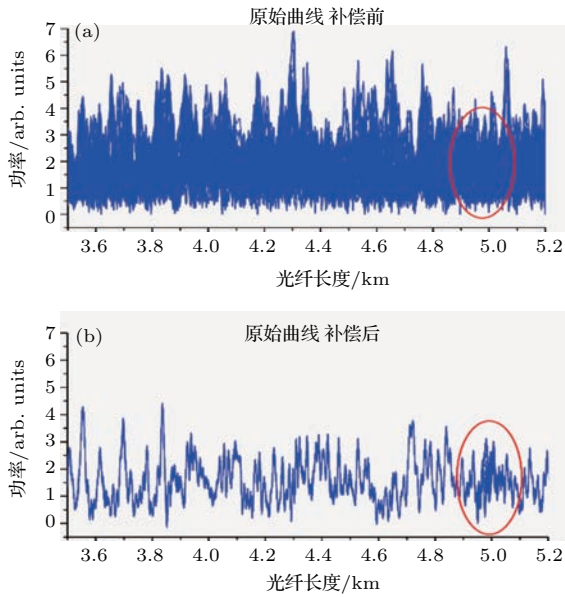

 图10 补偿前后的原始 Φ -OTDR曲线 (a) 补偿前; (b) 补偿后

 Fig. 10. Comparison of the original Φ -OTDR traces: (a) Without compensation; (b) with compensation.

4.2 基于正交偏振态脉冲抑制偏振相关噪声

为了抑制 Φ -OTDR系统中的PRN, 可以引入正交偏振态的探测光脉冲对 (Orthogonal-SOP pulse pair, OSPP) 进行传感. OSPP顾名思义就是向传感光纤注入两个偏振态相互正交的光脉冲, 因为两个光脉冲是正交的, 所以有 $\mathbf{E}_I \cdot \mathbf{E}_Q^* = 0$, 其中 \mathbf{E}_I 和 \mathbf{E}_Q 分别为这两个光脉冲电场的琼斯矢量, * 表示复数共轭, 则这两个光脉冲可表示为^[24]

$$\mathbf{E}_I = E_0 e^{i\omega_0 t + \varphi_0} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \cdot e^{i\delta} \end{bmatrix} \quad (17)$$

和

$$\mathbf{E}_Q = E_0 e^{i\omega_0 t + \varphi_0} \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \cdot e^{i(\delta + \pi)} \end{bmatrix} \quad (18)$$

两个光脉冲产生的RBS信号的功率分别为

$$I_I(t) = K_x(t)^2 \cos^2 \theta + K_y(t)^2 \sin^2 \theta \quad (19)$$

和

$$I_Q(t) = K_x(t)^2 \sin^2 \theta + K_y(t)^2 \cos^2 \theta, \quad (20)$$

在数据处理中将 $I_I(t)$ 和 $I_Q(t)$ 求和, 可以得到

$$I_{\text{sum}}(t) = K_x(t)^2 + K_y(t)^2. \quad (21)$$

(21) 式反映的是正交偏振态脉冲对产生的RBS信号经过简单的求和算法处理之后的结果. 从中可以直观地看出使用OSPP方法后的RBS信号强度对探测光脉冲偏振态的敏感性被彻底消除, 即通过OSPP方法可以成功抑制 Φ -OTDR系统中的PRN. 基于以上理论, 我们总结出: 向传感光纤注入偏振态相互正交的光脉冲, 收集这两个正交的光脉冲独立产生的瑞利散射信号, 然后将两条瑞利信号曲线相加, 如此就可以抑制 Φ -OTDR的偏振相关性. 设计的抑制方案如图11所示.

在实验中, 偏振开关装置由保偏光开关 (POS) 和偏振光束合束器 (PBC) 构成. 光源输出经由 POS 于 I 通道和 Q 通道之间进行切换, 再经 PBC 输出, 就能获得偏振态正交的光. POS 应该具有快速切换能力, 以实现高频率探测光脉冲合成. 实验中所用的高速 POS 响应时间小于 300 ns, 完全能够满足 OSPP 连续合成的需求. 正交的光被 AOM 调制为 200 ns 的探测光脉冲重复周期为 20 μ s. 实验中 POS 的切换频率等于激光脉冲的重复频率, 同为 20 μ s, 确保正交的两个脉冲轮流注入到传感光纤中. 实验所用传感光纤约为 1.5 km, 两个振动事件分别加载在光纤位置 A 点 (约 360 m 处) 和 B 点 (约 1380 m 处), A 处施加的微弯扰动频率为 3 Hz, B 处施加的拉伸扰动频率为 5 Hz. 通过滑动差分的方法^[27] 得到振动事件的位置信息, $\{I_I(t)\}_N$ 和 $\{I_Q(t)\}_N$ 的差分结果分别如图 12(a) 和图 12(b) 所示, $\{I_{\text{sum}}(t)\}_N$ 的差分结果如图 12(c) 所示. 从实验结果来看, 虽然对于单一偏振态的脉冲来说, PRN 依然存在, 但是经过简单的求和算法处理之后, A 处之后的 PRN 噪声被有效地抑制了, 同时也能够清晰分辨出 B 处的扰动事件.

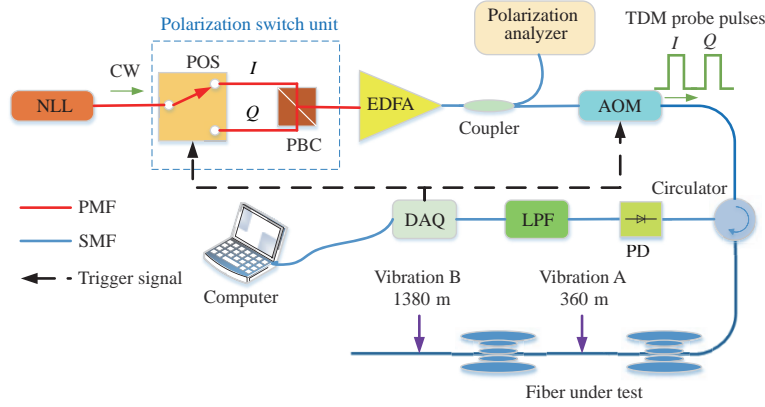


图 11 基于 OSPP 实验结构图

Fig. 11. Experiment setup based on OSPP scheme.

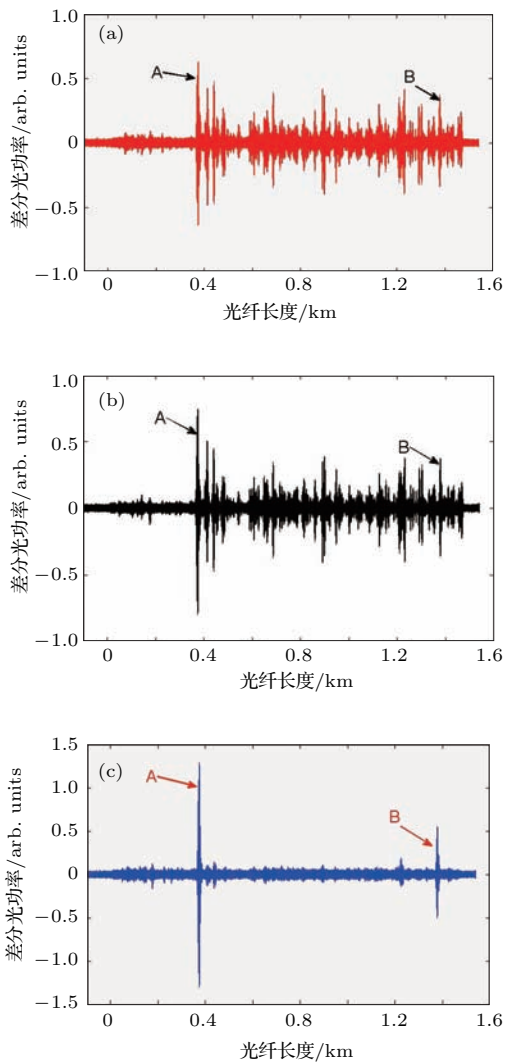


图 12 OSPP 抑制偏振相关噪声 (a) $\{I_I(t)\}_N$ 差分结果; (b) $\{I_Q(t)\}_N$ 差分结果; (c) $\{I_{Sum}(t)\}_N$ 的差分结果
Fig. 12. The experiment results of the PRN method: (a) The differential signals of $\{I_I(t)\}_N$; (b) the differential signals of $\{I_Q(t)\}_N$; (c) the differential signals of $\{I_{Sum}(t)\}_N$.

4.3 基于弱反射端面阵列实现应变与干涉强度的线性对应

Φ -OTDR 中, 应变与干涉强度的非线性对应关系会引起测量结果的失真. 考虑到这主要是由于光纤中散射点位置和大小随机性所造成的, 我们提出图 13 所示的改进方案: 在光纤中嵌入固定的弱反射端面, 用以提供稳定的、强度可调的反射光作为传感信号 [28]. 为了说明其传感原理, 首先考虑仅有两个反射面的情况. 探测光脉冲在传感光纤中传播时, 分别在间距为 D 的反射面 S_1 和 S_2 产生反射光 RF_1 和 RF_2 , 当探测光频率 f 稳定, 则信号 RF_1 和 RF_2 的相位就是固定的, 可以表示为

$$RF_1 = E_1 \exp [i (2\pi ft + \varphi_1)], \quad (22)$$

$$RF_2 = E_2 \exp [i (2\pi ft + \varphi_2)], \quad (23)$$

其中 E_1 和 E_2 为散射光信号的电场强度, φ_1 和 φ_2 为反射光信号 RF_1 和 RF_2 的相位. 在不考虑光源频率漂移的情况下, 如果没有外部扰动作用于光纤, 则反射面 S_1 和 S_2 之间的间距 D 为常量, 信号 RF_1 和 RF_2 的相位差就是 $\varphi_1 - \varphi_2$ 并保持恒定.

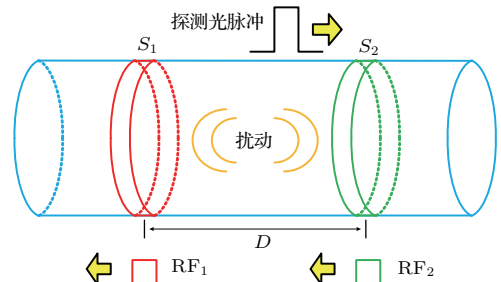


图 13 外部扰动对 RBS 光信号的影响

Fig. 13. The influence by external vibration to RBS.

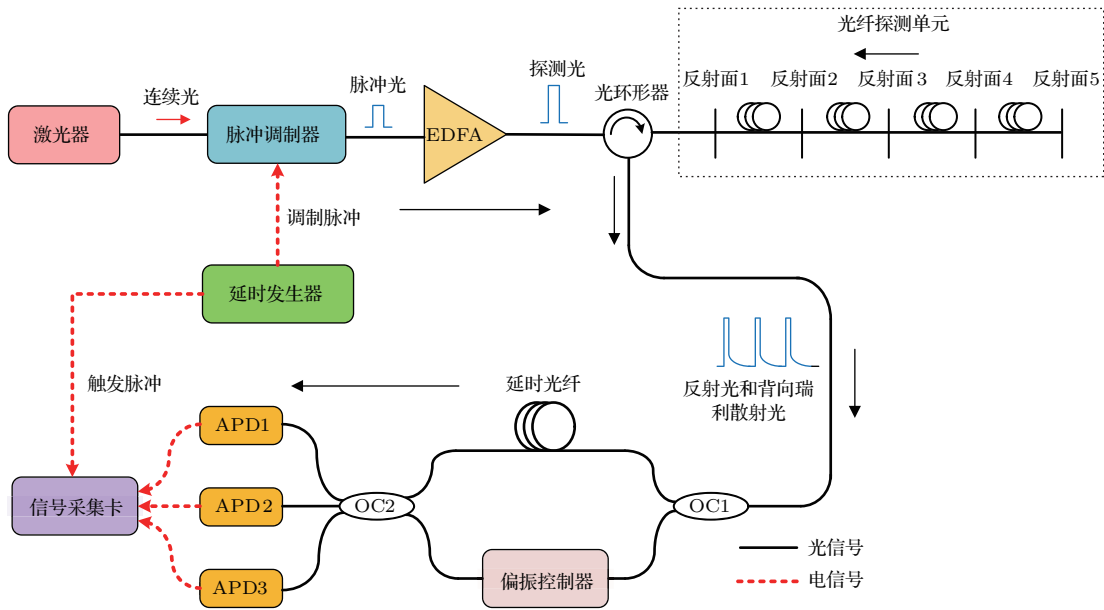


图 14 基于三端口相位解调的 Φ -OTDR 应变定量测量系统

Fig. 14. The experimental setup of 3-ports phase demodulation system.

当外部扰动作用于反射面 S_1 和 S_2 之间时, 将引起光纤的伸缩, 假设间距 D 变化了 ΔD . 则信号 RF_1 和 RF_2 的相位差 $d\varphi$ 也将发生变化, 如下式所示:

$$d\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 + 4\pi n \frac{f\Delta D}{c}. \quad (24)$$

显然若光源频率 f 稳定, 则相位差 $d\varphi$ 的变化量将与反射面 S_1 和 S_2 之间的间距变化量 ΔD 呈线性关系. 因此如果能够快速地对相位差 $d\varphi$ 进行解调, 就可以实现对外部扰动引起的光纤应变量的定量检测. 为此我们提出了如图 14 所示的基于弱反射端面阵列和 3×3 耦合器相位解调的传感系统结构.

3×3 耦合器的理想分光比为 $1 : 1 : 1$, 因此耦合器三个端口输出的传感信号的电场强度可以表达为

$$I_1 \propto E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos(d\varphi), \quad (25)$$

$$I_2 \propto E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos\left(d\varphi + \frac{2\pi}{3}\right), \quad (26)$$

$$I_3 \propto E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos\left(d\varphi - \frac{2\pi}{3}\right). \quad (27)$$

联立 (25)—(27) 式, 就可以求解出 $d\varphi$ 的值. 通过连续观测 $d\varphi$ 的变化, 就可以实现对应变量的定量检测. 实验中我们利用光纤接头作为反射面, 在传感光纤上嵌入了 5 个人工形成的弱反射端面.

连接光纤接头的法兰相互之间间隔 20 m, 反射光的功率比 RBS 的功率高 20 dB 左右. 图 15 (a) 为 3×3 耦合器输出的原始光强信号, 图中共包括六个峰, 中间四个峰为反射光构成的干涉峰. 选择图 15 (a) 中信噪比相对较差的位置三进行观察, 其峰值点的强度变化如图 15 (b) 所示. 从图中可以看出波形存在大量的翻折, 这正体现了应变与干涉强度的非线性对应关系. 同时三路中间可以大致看到 $2\pi/3$ 的相位差关系. 通过对 (25)—(27) 式的求解, 可以获得 $d\varphi$ 的变化. 但现在求得的相位范围在 $[-\pi, +\pi]$ 之间, 对于较大的振动或者由于振动过程中产生的相位累加, 相位值会超出范围, 导致检测到的相位值会被折叠到 $[-\pi, +\pi]$ 内, 因此我们要根据前后两点的变化幅度对相位跳变点进行解缠绕, 补偿 2π 的相位, 恢复连续的相位变化曲线, 如图 15 (c) 所示. 对恢复得到的时域信号进行傅里叶变换, 可以得到图 15 (d) 所示的功率谱. 振动信号的频率为 200 Hz. 高频处存在谐波和杂散, 但是相对于传统 Φ -OTDR 系统, 高次谐波和杂散的能量较低, 动态范围约为 20 dB.

以上实验结果表明, 利用弱反射端面产生的干涉信号进行相位解调可以减少由于光纤应变和干涉强度的非线性对应而引起的测量失真, 提高对光纤应变的宽频俘获能力, 使得 Φ -OTDR 系统能够定量测量外部扰动事件.

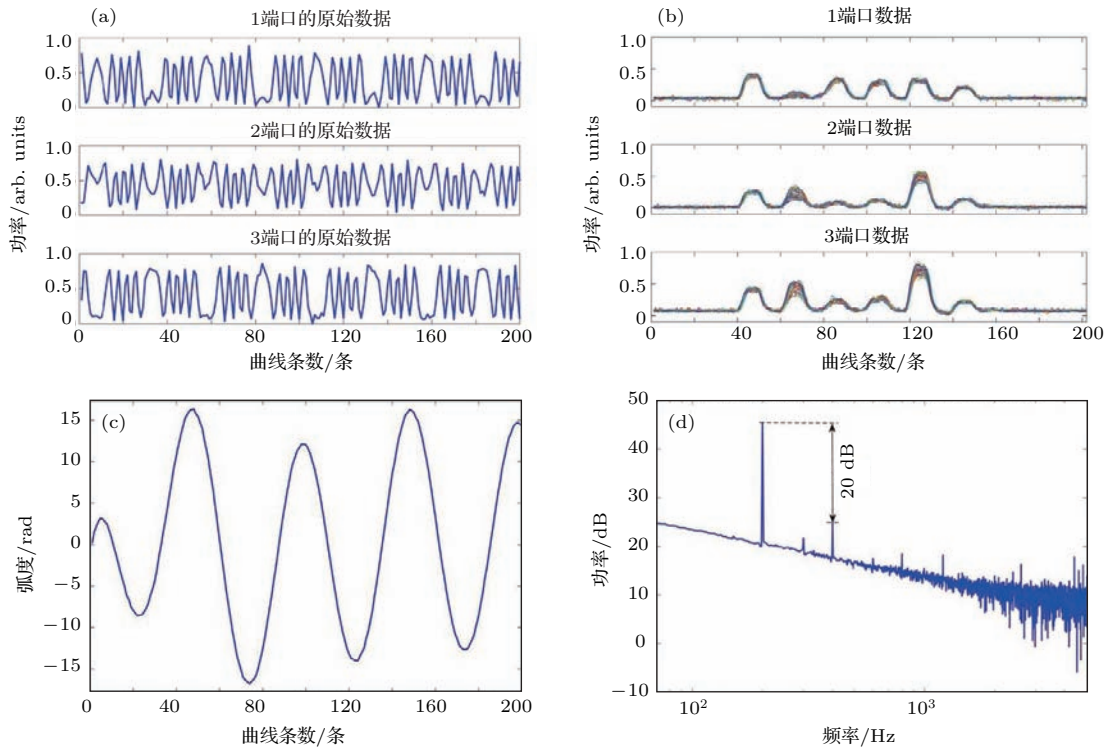


图 15 应变与干涉强度的对应关系 (a) 三端口输出的原始数据; (b) 位置三峰值点的强度变化; (c) 相位变化曲线; (d) 振动信号的功率谱
 Fig. 15. The linear relationship between strain and interference intensity: (a) Raw data of three ports; (b) intensity of three ports at the position 3; (c) time response of detected dynamic strain; (d) frequency response of detected dynamic strain.

我们提出的噪声抑制方案能够有效地抑制相应的光学背景噪声, 改善 Φ -OTDR 传感系统的性能, 但是这些方案还有进一步提升的空间. 首先, 文中提出的基于频漂补偿的方案所需时间较长, 这限制了系统的采样速度, 进而限制 Φ -OTDR 的频率探测范围. 我们设想, 可以采用弱反射光栅实时获得频漂测量结果, 进而进行光源频漂补偿, 提高系统对低频扰动事件的俘获能力; 也可以将光纤应变与干涉强度线性对应方案中的解调方法与频漂补偿的方案相结合, 以此提高频漂补偿速度. 在基于弱反射端面实现应变与干涉强度线性对应实验中, 虽然我们用光纤接头处作为弱反射端面, 但是实验结果能够验证这一理论的可行性. 因此在大规模工程应用中, 我们可以采用在线制备的方法在光纤拉丝的同时进行弱光栅刻写, 实现大规模嵌入弱反射端面, 以此扩大 Φ -OTDR 的实际应用范围.

5 结 论

本文对 Φ -OTDR 传感系统的工作原理进行了深入剖析, 并针对制约该类系统传感性能的几种主

要光学背景噪声的成因给出了较为完备的数学模型与理论分析. 传感系统光源的中心频率漂移、传感光纤的双折射特性变化以及瑞利散射光的相干衰落效应是产生光学背景噪声的主要原因. 根据上述噪声的产生机理, 本文提出了主动光频扫描法, 从而实现了激光光源频漂的动态补偿; 提出了基于正交偏振态探测脉冲的传感方法, 抑制了偏振相关噪声的产生; 通过引入弱反射端面阵列, 实现了光纤应变与散射光干涉强度的线性对应关系. 理论分析和实验结果表明, 本文提出的方法可以有效抑制 Φ -OTDR 传感系统中的光学背景噪声, 并显著改善系统的传感性能, 这对推动相位敏感型光时域反射传感系统走向工程化应用具有重大意义.

参考文献

[1] Taylor H F, Lee C E 1993 *U.S. Patent* 5194847 [1993-03-16]
 [2] Bucaro J, Carome E 1978 *Appl. Opt.* **17** 330
 [3] Ran Z L, Rao Y J, Liu W J, Liao X, Chiang K S 2008 *Opt. Express* **16** 2252

- [4] Tsai P, Sun F, Xiao G, Zhang Z 2008 *IEEE Photonics Tech. L.* **20** 300
- [5] Lu Y L, Zhu T, Chen L, Bao X 2010 *J. Lightwave Technol.* **28** 3243
- [6] Bao X Y, Chen L 2011 *Sensor* **11** 4152
- [7] Bi W H, Yang X P, Li J Y, Fu X H, Fu G B 2014 *Chinese Journal of Lasers* **41** 1205007 (in Chinese) [毕卫红, 杨希鹏, 李敬阳, 付兴虎, 付广博 2014 中国激光 **41** 1205007]
- [8] Martins H F, Martin-Lopez S, Corredera P, Filograno M L, Frazao O 2014 *J. Lightwave Technol.* **32** 1510
- [9] Wang Z N, Zeng J J, Li J, Fan M Q, Wu H, Peng F, Rao Y J 2014 *Opt. Lett.* **39** 5866
- [10] Juarez J C, Maier E W, Choi K N, Taylor H F 2005 *J. Lightwave Technol.* **23** 2081
- [11] Barnoski M, Jensen S 1976 *Appl. Opt.* **15** 2112
- [12] Aoyama K, Nakagawa K, Itoh T 1981 *IEEE J. Quantum Electron.* **17** 862
- [13] Gold M P 1985 *J. Lightwave Technol.* **3** 39
- [14] Healey P 1981 *Electron. Lett.* **17** 62
- [15] Healey P 1984 *Electron. Lett.* **20** 30
- [16] Healey P 1984 *Electron. Lett.* **20** 443
- [17] Li Q, Zhang C X, Li L J, Zhong X, Li C S 2014 *Chinese Journal of Laser* **41** 0305003 (in Chinese) [李勤, 张春熹, 李立京, 钟翔, 李传声 2014 中国激光 **41** 0305003]
- [18] Martins H F, Martin-Lopez S, Corredera P 2013 *J. Lightwave Technol.* **31** 3631
- [19] Mermelstein M D, Posey Jr R, Johnson G A, Vohra S T 2001 *Opt. Lett.* **26** 58
- [20] Zhong X, Zhang C, Li L, Liang S, Li Q, Lü Q 2014 *Appl. Opt.* **53** 4645
- [21] Andrea G, Luca P 2000 *Opt. Lett.* **25** 384
- [22] Jones R C 1941 *JOSA* **31** 488
- [23] Barlow A J 1985 *J. Lightwave Technol.* **3** 135
- [24] Wang F, Zhang X, Wang X, Chen H 2013 *Opt. Lett.* **38** 2437
- [25] Juan C, Taylor H F 2005 *Opt. Lett.* **30** 3284
- [26] Zhu F, Zhang X P, Xia L, Guo Z, Zhang Y X 2015 *IEEE Photonic Tech.* **27** 2523
- [27] Lu Y L, Zhu T, Chen L, Bao X Y 2010 *J. Lightwave Technol.* **28** 3243
- [28] Zhu F, Zhang Y X, Xia L, Wu X L, Zhang X P 2015 *J. Lightwave Technol.* **33** 4775

SPECIAL TOPIC — Optical Fiber Sensor

The mechanism and suppression methods of optical background noise in phase-sensitive optical time domain reflectometry*

Zhang Xu-Ping¹⁾²⁾ Zhang Yi-Xin^{1)2)†} Wang Feng¹⁾²⁾ Shan Yuan-Yuan¹⁾
Sun Zhen-Hong¹⁾ Hu Yan-Zhu³⁾

1) (*Institute of Optical Communication Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China*)

2) (*Key Laboratory of Modern Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093, China*)

3) (*Automation School, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China*)

(Received 23 January 2017; revised manuscript received 26 March 2017)

Abstract

Phase-sensitive optical time domain reflectometry (Φ -OTDR) has the advantages of fast response and high sensitivity. Therefore, it can realize fully distributed monitoring of weak vibrations along an optical fiber, which is of great value in many applications such as perimeter security and structural health monitoring. However, the optical background noise in the Φ -OTDR will disturb the extraction of effective signals and limit the performance of this system. The optical background noise mainly includes the laser center frequency drift, the polarization-relevance noise and the distortion measurement due to the nonlinear relationship between optical fiber strain and interference intensity. In this paper, the generating mechanism of these optical background noise was analyzed and the corresponding noise suppression methods were proposed. The experiment results showed that the proposed methods could suppress the optical background noise effectively and improve the sensing performance significantly.

Keywords: phase sensitive optical time domain reflectometry, optical background noise, laser frequency drift, polarization-relevance noise

PACS: 07.60.-j, 42.81.Wg, 42.25.Kb

DOI: [10.7498/aps.66.070707](https://doi.org/10.7498/aps.66.070707)

* Project supported by the National Natural Science Foundation (Grant Nos. 61627816, 61540017, 61405090, 61307096), and the Project of Beijing Financial, China.

† Corresponding author. E-mail: zyixin@nju.edu.cn