

偏振光时域反射技术对多点扰动检测的研究进展

王 峰 潘 运 王 威 张旭莘

(南京大学现代工程与应用科学学院 光通信工程研究中心 南京 210093)

摘 要 光波在光纤中传输时,其偏振态对光纤外界的变化十分敏感。基于偏振效应的光时域反射技术可以实现对光纤沿线挤压、弯曲、振动等事件的分布式传感。然而,由于光波偏振态的前后关联性,光纤中最靠前的扰动往往会掩盖其后续扰动对偏振态造成的影响,使得光时域反射技术对多点扰动的检测存在困难。文章综述了该技术在多点扰动分布式传感检测方面的研究进展,对频谱分析法、解析本地双折射矢量法和基于特殊光纤的传感方法等技术手段进行了对比和分析。

关键词 连续分布式光纤传感;偏振态;扰动;光时域反射计

中图分类号 O 436 O 438 **文献标志码** A

The Research Progress of Detecting Multi-Disturbing Events for Polarization Optical Time Domain Reflectometer

WANG Feng PAN Yun WANG Wei ZHANG Xuping

(The Institute of Optical Communication Engineering, College of Engineering and Applied Sciences,
Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract The state of polarization (SOP) of optical lightwave in fiber is very sensitive to the external events. Based on this phenomenon, the polarization time domain reflectometer (POTDR) can be used as a distributed sensing means for the detection of fiber pressing, bending, and vibration, etc. However, SOP of optical lightwave at a specific position is dependent to its previous status. That means the first disturbance nearest to the input end is usually fused with subsequent disturbances, which makes the POTDR method difficult to detect multi-disturbances. In this paper, research progress of multi-disturbances detection by POTDR was reviewed. Existing POTDR techniques like analyzing spectrum method, resolving local birefringence method and special sensing fiber method were introduced and analyzed.

Keywords distributed optical fiber sensor; state of polarization; disturbance detection; optical time domain reflectometer

收稿日期: 2016-05-09 修回日期: 2016-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(61540017、61307096、61107074)

作者简介: 王峰, 博士, 副教授, 研究方向为分布式光纤传感技术、光电信号检测与处理等; 潘运, 硕士研究生, 研究方向为分布式光纤传感技术; 王威, 硕士研究生, 研究方向为分布式光纤传感技术; 张旭莘(通讯作者), 博士, 教授, 博导, 研究方向为分布式光纤传感技术及其应用、光电信号探测与处理、光电集成传感等, E-mail: xpzhang@nju.edu.cn.

1 引言

分布式光纤传感技术将光纤作为信号的传感介质和传输介质,具有不带电、本质安全、传感距离长、可连续监测光纤沿线任意位置处的信息等优点,基于不同的传感原理,可应用于公路、桥梁、隧道、周界和电力等多种对象^[1-8]。

偏振是光波所具有的重要物理特性之一。当光波在光纤中传播时,其偏振态对光纤的形变、振动、电磁场等多种情况敏感,通过探测光波偏振态的变化可实现对光纤沿线相应变化的检测。基于偏振效应的光纤传感技术主要为偏振光时域反射计(Polarization Optical Time Domain Reflectometer, POTDR),最早由 Rogers 于 1980 年提出,用于测量光纤受到的电场、压力和温度等。随后, POTDR 更多被用于测量光纤中的整体偏振模色散(Polarization Mode Dispersion, PMD)及双折射等与光通信相关的参量,在光纤通信线路的性能评估、PMD 补偿、提高通信速率等方面起到了重要的作用。近年来,由于偏振态对光纤外界参量敏感的特性, POTDR 在光纤外界参量测量方面的研究也不断增多。

1992 年, Rogers 等^[9]提出了利用 POTDR 技术测量光纤中的双折射分布,从而有可能实现对光纤外部扰动的测量。2000 年, Rogers^[10]提出了利用 POTDR 测量光纤沿线应变的传感技术。2003 年,董贤子等^[11]通过数字平均和解卷积的方法提高了 POTDR 系统的信噪比和分辨率。2008 年, Zhang 等^[12]利用 POTDR 实现了对光纤沿线振动信号的分布式测量。2009 年,李建中等^[13]提出了一种基于 POTDR 传感技术的安防监测系统。2012 年, Chen 等^[14]利用偏振分集和平衡探测器相结合的接收系统,提高了 POTDR 传感系统的信噪比, Wang 等^[15]理论和实验分析了探测光脉宽对 POTDR 传感性能的影响。同年, Linze 等^[16]验证了 POTDR 系统在入侵监测中的

灵敏性。2014 年, Palmieri 等^[17]利用 POTDR 系统实现了对电流的分布式测量。2015 年, Wang 等^[18]提出了基于弱反射光栅阵列的 POTDR 传感系统,有效提升了 POTDR 中传感信号的信噪比。

POTDR 在分布式传感技术中有着自身的特点。相对于基于干涉效应的振动传感技术, POTDR 具有传感系统结构简单、成本低、线性响应的振幅范围大等优点;另外,可对电压电流进行传感也是 POTDR 所具有的独特特性。然而,由于光波偏振态的变化具有前后关联性,当光纤中某一位置由于外界影响而导致光波的偏振态发生变化后,其后所有位置的光波的偏振态均会随之发生改变。所以位于最前端的扰动往往会掩盖 POTDR 系统中后端事件产生的信号。因此, POTDR 通常只能对最前端的扰动进行判断和定位,而难以辨别其后的扰动。对于多点扰动辨识的研究是 POTDR 系统的一个重要内容。本文将主要介绍基于 POTDR 技术的多点扰动识别研究的进展。共分为四部分内容。第一部分介绍 POTDR 的相关背景,第二部分对 POTDR 的传感原理进行介绍,第三部分介绍 POTDR 在多点事件识别研究的进展,最后对 POTDR 的发展前景做出展望。

2 偏振光时域反射技术的传感原理

偏振光时域反射技术(POTDR)是从光时域反射技术(Optical Time Domain Reflectometer)的基础上发展起来的。由瑞利散射的性质可知,光波在光纤中产生的背向瑞利散射光会保持散射点处光波的偏振态特性和波长不发生变化,而光纤中光波的偏振态对温度、振动、应变、扭转以及电场磁场等变化非常敏感,故当外部有这些扰动作用在光纤上时,光纤的双折射会发生改变,使得光纤中光波的偏振态发生变化,进而导致瑞利背向散射光的偏振态发生变化。通过在光纤入射

端检测背向瑞利散射光偏振态的变化, 可以得到散射点处光波偏振态的变化情况。

用于测量扰动的 POTDR 基本结构如图 1 所示, 其基本结构与光时域反射技术传感系统相似, 不同之处在于在探测器前插入了一个检偏器以将光波偏振态的变化转换为探测功率的变化。脉冲激光器发出的探测脉冲经环行器入射到传感光纤中, 探测脉冲在光纤中向前传输过程中不断产生后向瑞利散射光。返回的瑞利散射光经过检偏器检偏, 其偏振态的变化会导致探测器接收到的光波功率的变化。再通过信号采集和处理单元对探测器输出信号进行分析, 从而实现基于偏振态的传感测量。

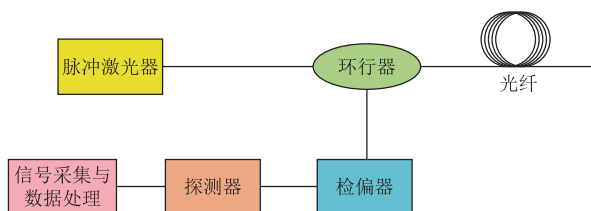


图 1 POTDR 结构示意图

Fig. 1 The scheme of POTDR

POTDR 对散射信号位置的判断是通过时域反射的原理实现的, 即某一时刻探测到的散射光对应的光纤位置为:

$$l=vt/2 \quad (1)$$

其中, v 为光纤中的光速; t 为该时刻与脉冲光入射时的时间差。

在 POTDR 系统中, 由于需要探测的是光纤中瑞利散射光偏振态的变化, 激光器的线宽不宜太宽, 否则容易发生退偏振效应; 但光源线宽过窄时, 传感脉冲光不同位置在光纤中产生的散射光叠加在一起时会相互干涉, 使光信号产生功率波动, 影响对光波偏振态的检测, 因此 POTDR 中激光器线宽通常选在 0.2 nm (波长为 1 550 nm 时, 对应 25 GHz 的频率) 左右。

由于普通单模光纤沿线的双折射本身就在随机变化, 单一的测量曲线很难反应出外界是否存

在扰动。然而, 当光纤不受扰动时, 不同探测脉冲光测得的信号不会发生变化。但当光纤在某一个位置受到扰动后, 由于扰动的影响, 该位置后产生的散射光的偏振态会发生相应的改变。通常 POTDR 系统在对外部扰动事件进行探测时, 多采用短时间内反复测量进行对比的方法进行检测。若光纤中存在扰动, 则从扰动前后两条曲线作差的结果可以发现扰动点前差值基本为零, 而扰动点后的位置由于光波偏振态受扰动发生变化, 偏振态与扰动之前完全不同, 作差的结果中存在明显的波动, 通过分析该曲线, 可以实现传感, 如图 2 所示。

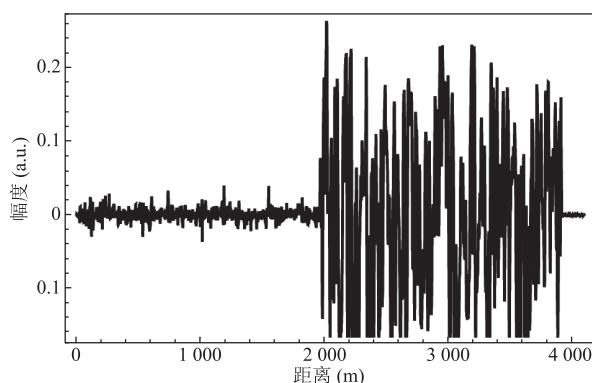


图 2 POTDR 测量曲线

Fig. 2 The measurement curve of POTDR

3 偏振光时域反射技术多点扰动传感的研究

从图 2 的结果可以看到, 由于通常情况下 POTDR 测得的结果从扰动点开始发生变化, 所以在第一个扰动点之后的所有其他扰动所造成的偏振态变化都会受到第一个扰动的影响。因此, 尽管 POTDR 可以对光纤沿线任意位置的扰动进行传感, 但一般来说只能对最靠前的事件点进行测量。为了扩展 POTDR 的测量能力, 使 POTDR 能够测量多个位置同时存在的扰动, 研究者们在 POTDR 的多点扰动传感研究方面做了大量的工作, 取得了许多研究成果。本节将这些研究成果

归为三类分别进行介绍。

3.1 基于频谱分析的多点扰动传感技术

基于频谱分析的 POTDR 传感技术由加拿大 Bao 的研究小组提出^[12,19]，它通过对 POTDR 获取的信号进行由时域到频域的变换，再通过对信号频谱在光纤沿线长度上变化状况的分析，可对光纤沿线的动态扰动事件进行测量。利用此传感技术可实现灵敏度很高的分布式振动传感器。

具体过程为首先使 POTDR 以相同的时间间隔 Δt 采集 N 条 POTDR 曲线，并将它们按照位置关系相互对齐。对于 POTDR 曲线上的每一个位置，均可取出由 N 个数据点组成的幅度-时间曲线，它代表了相应位置处偏振信号随时间的变化关系，各点对应的采样率为 $1/\Delta t$ 。对该位置处的信号进行离散傅里叶变换 (Discrete Fourier Transform)，可得到该位置处偏振信号的频谱。将 POTDR 曲线上每个位置的信号都进行相同的变换操作，可以得到光纤沿线所有位置上偏振信号的频谱。若光纤不受扰动，则所有频谱成分的功率均很小；若光纤中某个位置发生了扰动，则从该位置开始，会出现与扰动频率相对应的频谱成分；若光纤中靠后的位置存在另外的扰动，则从相应位置开始会出现与该扰动对应的新频率成分，如图 3 所示：表示的即为光纤 1 000 m 和 2 000 m 位置处分别存在 11 Hz 和 9 Hz 振动时得到的信号沿光纤分布的频谱图。因此通过对光纤沿线各位置处信号频谱的判断，可以实现对多个不同频率扰动点的分布式传感。利用该方法，Zhang 等^[12]在 1 km 的光纤上实现了对 25 Hz 和 37 Hz 两个振动频率的同时测量，同时利用该方法在 0.8 km 的光纤上实现了对 5 kHz 振动频率的测量。

基于频谱分析的 POTDR 传感技术具有传感系统结构简单、定位精确，特别适合测量振动等优点，但是对于可测量的振动参数具有一定的限制。为了避免不同位置处散射信号的混叠，光纤

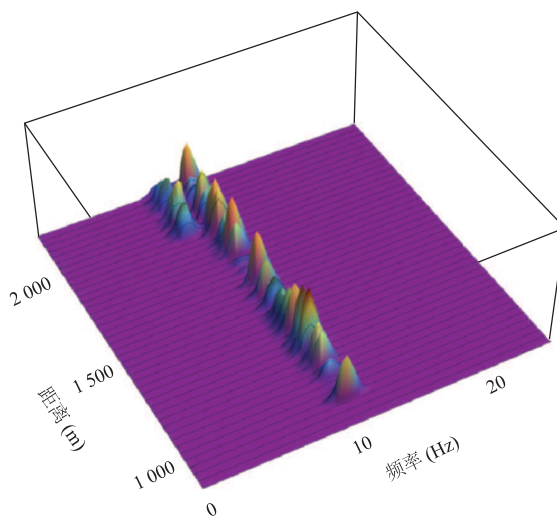


图 3 基于频谱分析的方法得到的 POTDR 信号

Fig. 3 The signal of POTDR obtained with spectrum analyzing method

中只能同时存在一个脉冲光产生的散射信号。因此，对于长度为 L 的光纤，时间间隔应满足 $\Delta t > 2L/v$ ，则根据奈奎斯特采样定理，该方法可以测量的振动频率上限为 $v/4L$ ，频谱的频率分辨率为 $\delta F = 1/N\Delta t$ 。在实际测量中，为了提高信噪比，往往还需要将连续 M 条 POTDR 曲线进行累加平均，这会使离散傅里叶变换时的采样率降低为 $1/M\Delta t$ ，所对应的可测量频率上限随之降低为 $v/4ML$ 。另外，该方法难以区分相同频率的振动。

当光纤中存在多个不同频率的振动时，各个振动信号之间会产生合频与差频，从而对准确判断频率造成影响。假设光纤中的两个位置分别存在频率为 ω_1 和 ω_2 的振动，则在第二个振动点之后信号的频率成分为：

$$\omega = \pm k_1\omega_1 \pm k_2\omega_2 \quad (2)$$

其中， $k_1=0,1,2,\dots$ ； $k_2=0,1,2,\dots$ 。Wang 等^[20]在利用上述频谱变换的方法得到光纤中偏振信号的频谱分布后，通过进一步分析各位置上频谱分量之间的线性组合关系，对出现新频率成分的位置利用其前端的频率成分信息和式(2)进行计算，可

得到新频率成分处的真实频率信息, 提高了对振动频率测量的准确性。他们利用该方法在 7 km 的光纤上准确测得了两个频率, 分别为 11 Hz 和 8 Hz 的振动。

3.2 基于解析本地双折射矢量的多点扰动传感技术

2000 年, Wulipart 等^[21]提出了通过利用 POTDR 计算光纤中本地双折射的方法来实现对多个位置扰动的分布式测量。不同于图 1 中的 POTDR 结构, 在该方法中需要利用偏振态分析器来代替检偏器, 以准确得到散射光偏振态的变化。

若用传输矩阵表示光纤对光波偏振态的作用, 需要三个参量, 分别为线双折射 δ 、圆双折射 ρ 以及光纤快轴和参考轴 x 轴的夹角 θ 。若能利用偏振信号将这三个参量求出, 则可准确地知道各位置处光纤的受扰动情况。为了求解整根光纤中各个位置的上述三个参量, 该技术中将整根光纤看作 N 段短光纤 (如图 4 所示), 每一段短光纤的前向传输矩阵可以用琼斯矩阵表示为:

$$M = \begin{bmatrix} \alpha + i\beta \cos 2\theta & -\gamma + i\beta \sin 2\theta \\ \gamma + i\beta \sin 2\theta & \alpha - i\beta \cos 2\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

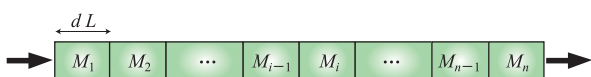


图 4 将整根光纤看作 N 段短光纤的示意图

Fig. 4 The schematic of treating the whole fiber as N

sections of short fiber

在式(3)中:

$$\begin{aligned} \alpha &= \cos(\Delta dL) \\ \beta &= \frac{\delta \sin(\Delta dL)}{2 \Delta} \\ \gamma &= \rho \frac{\sin(\Delta dL)}{\Delta} \\ \Delta &= \left(\rho^2 + \frac{\delta^2}{4} \right)^{1/2} \\ \alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 &= 1 \end{aligned} \quad (4)$$

所以光纤上第 N 段的末端的往返传输矩阵可以表示为 $(M_n M_{n-1} \cdots M_2 M_1)^T (M_n M_{n-1} \cdots M_2 M_1)$, 其中上

标 T 表示矩阵的转置。通过计算可以发现该传输矩阵可以表示成如下形式:

$$\begin{pmatrix} A+iB & iC \\ iC & A-iB \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中, $A^2 + B^2 + C^2 = 1$; $A = \alpha^2 + \gamma^2 - \beta^2$; $B = 2\beta(\alpha \cos 2\theta + \gamma \sin 2\theta)$; $C = 2\beta(\alpha \sin 2\theta - \gamma \cos 2\theta)$ 。式(5)中共有三个未知参量 δ 、 ρ 、 θ , 然而, 由于 A 、 B 和 C 具有关联性, 根据式(5)仅可以得到两个独立的方程, 所以为了求解出未知参量还需要一个独立的方程, 为此把每一段短光纤细分成等长的两段: 若每一段光纤长度 dL 足够短 ($\Delta \times dL < \pi$), 则可根据式(5)并利用 $dL/2$ 代替其中的 dL , 由第一段光纤末端的散射信号得到两个独立方程, 然后利用连续两段光纤末端往返光的偏振态可得到另外两个独立方程 $A_2 = 1 - 8\alpha^2 \beta^2$,

$$B_2 = 4\alpha\beta \left[(2\alpha^2 - 1) \cos 2\theta + 2\alpha\gamma \sin 2\theta \right],$$

$$C_2 = 4\alpha\beta \left[(2\alpha^2 - 1) \sin 2\theta - 2\alpha\gamma \cos 2\theta \right],$$

$A_2^2 + B_2^2 + C_2^2 = 1$ 最终解得三个未知参量 δ 、 ρ 、 θ 的值。以此类推, 最后可以得到全部 N 段光纤的传输矩阵参量。显然, 由于光纤某个位置发生扰动时, 仅会引起扰动点所在光纤段传输矩阵参量的改变, 这种方法可以实现对光纤沿线多个位置扰动信号的检测。

由于该方法需要利用各个光纤段的信息递推后面光纤段的信息, 容易造成误差的累积。因此, 他们又提出了改进的方法。在计算第 i 段短光纤的参量时, 可以将前面 $i-1$ 段的光纤看作一个整体, 由一个线延迟器和一个圆延迟器串联而成, 如图 5 所示。第 i 段短光纤的初始端, 中间位置, 末端的传输矩阵分别表示成 $L_e^T C_e^T C_e L_e$, $L_e^T C_e^T M_i^T M_i C_e L_e$, $L_e^T C_e M_i^T M_i^2 C_e L_e$, 其中,

$$L_e = \begin{pmatrix} \cos \frac{\delta_e}{2} + i \sin \frac{\delta_e}{2} \cos 2\theta_e & i \sin \frac{\delta_e}{2} \sin 2\theta_e \\ i \sin \frac{\delta_e}{2} \sin 2\theta_e & \cos \frac{\delta_e}{2} - i \sin \frac{\delta_e}{2} \cos 2\theta_e \end{pmatrix};$$

$C_e = \begin{pmatrix} \cos \rho_e & -\sin \rho_e \\ \sin \rho_e & \cos \rho_e \end{pmatrix}$ 。由于信号在往返过程中会将圆延迟器的作用抵消，短光纤中间位置和末端位置的往返矩阵可以表示为 $\begin{pmatrix} A_r + iB_r & iC_r \\ iC_r & A_r - iB_r \end{pmatrix}$ ，利用前述的等分小段光纤的方法，可分别得到两组方程：

$$\begin{aligned} A_r &= A \\ B_r &= B \cos 2\rho_e + C \sin 2\rho_e \\ C_r &= C \cos 2\rho_e + B \sin 2\rho_e \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} A_r &= A_2 \\ B_r &= B_2 \cos 2\rho_e + C_2 \sin 2\rho_e \\ C_r &= C_2 \cos 2\rho_e + B_2 \sin 2\rho_e \end{aligned} \quad (7)$$

通过利用式(6)和(7)，即可求的 δ_i 、 ρ_i 和 $\theta_i - \rho_e$ 的值，其中 ρ_e 为前 $i-1$ 段光纤整体对应的圆双折射。可见这一方式可以避免各段光纤中线双折射和圆双折射的误差传递。但 θ_i 的计算仍需要利用前面各段光纤的参数得到 ρ_e 后才能求出。

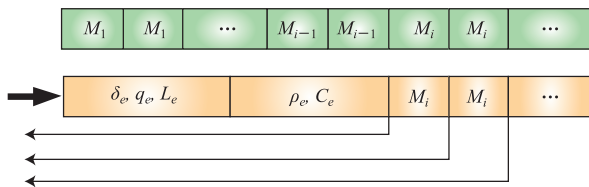


图5 将前面的 $i-1$ 段光纤等效为一个线延迟器和一个圆延迟器串联组合的示意图

Fig. 5 The schematic of treating the first $i-1$ sections of fiber as a series combination of a linear retarder and a circular retarder

基于解析本地双折射矢量的技术在扰动的定位，区分相同特征的扰动等方面具有优势。但由于利用偏振分析器测量传输矩阵时需要至少两种不同偏振状态的输入光，其测量速度较慢，难以用于高频的扰动测量。

3.3 基于特殊传感光纤的多事件点传感技术

研究者除了研究基于普通单模光纤进行多事件点传感的 POTDR 外，还有一些研究通过借助

特殊传感光纤，从而实现了利用 POTDR 对多事件点的传感测量。

2015年，Tong 等^[22]提出了一种基于保偏光纤的 POTDR 多事件点传感技术。在该技术中，利用保偏光纤替换普通的单模光纤作为传感光纤。在保偏光纤中，光波的电场矢量会沿着折射率为极大和极小的两个正交方向振动。通常情况下，光波在这两个方向上的能量不发生耦合。因此如果沿其中一个方向注入脉冲光并使用检偏器检测该方向的散射光波能量沿光纤的变化时，会呈现出仅仅由光纤衰减产生的能量递减曲线。但当光纤中某个位置受到外界扰动的影响时，光波在经过该位置时会在保偏光纤两个正交方向发生能量的耦合，导致在其中一个振动方向上的光波能量降低，而相垂直的方向上的光波能量增加，在探测曲线上会表现出在该位置能量的突变。Tong 等^[22]对比了弯曲、扭曲和挤压三种情况对保偏光纤中光波能量的耦合效果，结果表明挤压比较容易在保偏光纤的两个正交方向引起能量耦合，而弯曲和扭曲均较难引起能量耦合(弯曲直径为 2.5 cm 时才会引起较为明显的能量耦合，在 6 cm 长的光纤上施加 30π 的扭转并没有出现明显的能量耦合)。因此，Tong 等^[22]通过利用这一技术，他们在 1.2 km 的光纤上成功测得了三个位置处的入侵事件，如图 6 所示。从图 6 中可以看到，在 400 m、610 m 和 820 m 附近，测量曲线产生明显的下降，对应着这三个位置处有入侵事件发生，下降部分的宽度与探测脉冲宽度相关，而曲线开始下降的初始点的位置则对应入侵事件的位置，也就是说，入侵事件的定位精度与探测脉宽无关，只与系统的信噪比有关。

2013年，Linze 等^[23]在单模光纤中集成了若干光栅对，用作 POTDR 的传感光纤，实现多振动点的传感。该传感技术的实验装置如图 7 所示。光源为一宽带光源，发出的光波通过环形器进入传感光纤。传感光纤中共有三组光栅对，

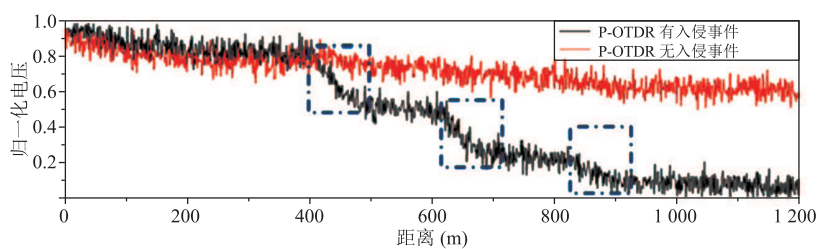


图 6 利用保偏光纤的偏振模耦合, 成功测得了光纤中三个位置处的入侵事件^[21]

Fig. 6 The measurement results with the POTDR based on the energy coupling effect of polarization maintaining fiber^[21]

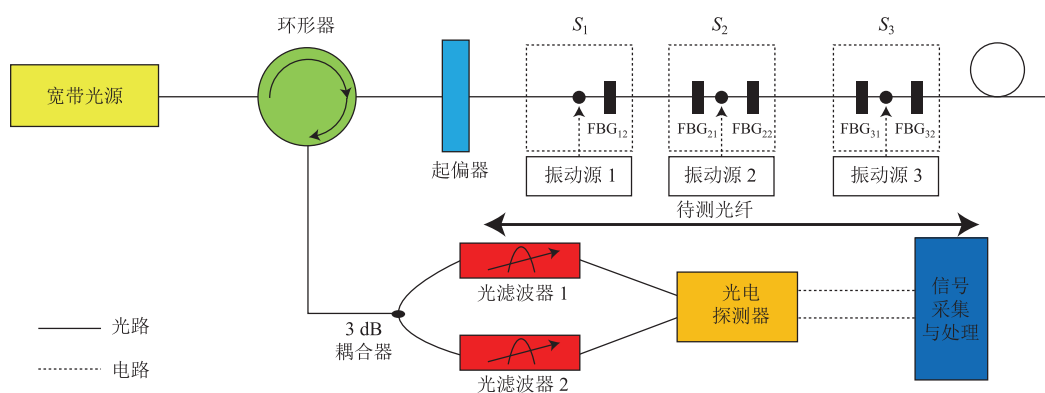


图 7 基于光栅对的多点扰动 POTDR 传感系统

Fig. 7 The scheme of multi-point vibration sensing based on FBG pair

其中最前方的光栅不需要与其他光栅组成光栅对。另外两个光栅对各自的间隔为 30 cm, 各个光栅均有不同的反射波长 ($\lambda_{12}=1\ 571.5\ \text{nm}$, $\lambda_{21}=1\ 560.8\ \text{nm}$, $\lambda_{22}=1\ 550.6\ \text{nm}$, $\lambda_{31}=1\ 540.3\ \text{nm}$, $\lambda_{32}=1\ 530.9\ \text{nm}$), 因此光纤中由各个光栅产生的反射光经过偏振器将偏振态的变化转换为功率的变化后, 再由两个光滤波器滤出与某一组光栅对中两个光栅相匹配的光波, 经探测器转换为电信号进行处理。通过调节光滤波器的波长, 可以分别得到不同光栅对反射回来的光信号。当某一组光栅对中第二个光栅得到的信号频率成分与第一个光栅不一致时, 表明该光栅对中间有振动频率与新出现率成分一致的振动事件; 再进一步对频率成分相同的信号进行相位分析, 由于光栅对内部的间隔只有 30 cm, 对应光波的往返时间约为 3 ns, 因此若光栅对前方存在振动时, 两个光栅上反射

的信号振动相位没有显著的区别。所以当两个光栅得到的相同频率的振动信号具有相同的相位关系时, 表明该组光栅对之间没有该频率的振动事件; 当两个光栅得到的相同频率的振动信号具有不同的相位关系时, 表明两个光栅对之间存在频率与该信号频率相同的振动事件。由两个振动事件共同作用引起的光波偏振信号的相位变化与输入光波的偏振态有关, 为了避免部分情况下对振动事件的漏判, Linze 等^[23]采用两种偏振态相差 22.5° 的探测光分别进行传感, 以消除所得到的相位变化对输入光偏振态的依赖。作为一种准分布式传感系统, 该技术的定位精度取决于同组的光栅对中两个光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 的间隔距离, 而可以设置的 FBG 对的最大数量 (对应于传感点数) 则取决于系统带宽。

1992年, Rogers^[9]提出了一种基于频率测量的 POTDR 技术, 该技术在 POTDR 传感系统基础上, 通过利用高双折射光纤作为传感光纤进行传感。其基本原理是: 向高双折射光纤中注入一个脉宽约为光纤拍长一半长度的脉冲光, 并使光纤两个偏振主态方向光脉冲的功率相等, 由于高双折射光纤在两个方向上存在折射率差, 脉冲光在光纤中前进过程中所产生的瑞利散射光的偏振态会不断地变化。当使用检偏器接收瑞利散射信号时, 会得到强度呈周期性变化的信号, 其频率为:

$$F = \frac{v}{b_z} \quad (8)$$

其中 b_z 为光纤在 z 位置处的拍长。若光纤中的双折射始终保持一致, 则光纤中各处的拍长相等, 所以 POTDR 测得的信号的变化频率始终恒定。但当光纤上存在扰动时, 均一的双折射会产生变化, 使得光纤中扰动位置处的局部拍长发生改变, 进而使 POTDR 测得的该位置处的散射信号的变化频率发生改变。因此通过分析信号的频率变化, 可实现对光纤沿线的多扰动点的分布式传感。由于高双折射光纤的拍长只有几毫米, 因此若要求脉冲光的脉宽为半个拍长的长度, 则需要脉冲光的持续时间在 10 ps 的量级, 同时为了有足够高的信噪比, 需要这样短的脉冲光有很大的功率, 这对光源提出了很高的要求。另外, 对于 10 mm 的拍长, 对应的信号变化频率高达 20 GHz, 探测这样高频率的信号是很困难的事情。

同年, 该课题组又提出了一种基于双端入射的频率测量 POTDR 技术^[24]。在该技术中, 传感光纤仍为高双折射光纤: 在传感光纤的一端入射功率较低的连续探测光, 并仍然使两个偏振主态方向的光波能量相等; 在传感光纤的另一端, 则入射一个具有不同波长、线偏振的、高功率的抽运脉冲光。该抽运光持续长度为多个拍长的长度, 并在两个偏振主态方向具有相同的能量。当

它与探测光相遇时, 由于高功率抽运光对光纤折射率的影响, 会导致探测光在两个偏振主态之间的能量发生耦合。如果探测其中一个偏振主态方向光波的能量时, 会得到能量以一定频率波动的光波, 该频率的大小取决于光纤的本征双折射及探测光与抽运光的波长, 具体可表示为:

$$F = vB_f \frac{\Delta\lambda}{\lambda_1\lambda_2} \quad (9)$$

其中, B_f 为光纤的双折射; λ_1 和 λ_2 分别为抽运光和探测光在真空中的波长; $\Delta\lambda$ 为它们的波长差。该课题组的在实验中, 采用 633 nm 的光波进行传感, 3.2 nm 的波长差产生了约 200 MHz 的变化频率。若光纤中某个位置存在扰动时, 会改变光纤在该位置的双折射, 从而使相应位置的光信号频率发生改变, 实现了多扰动点的传感。1997年, 该课题组基于该频率测量技术首次进行了 POTDR 对温度传感的测量^[25], 温度测量精度达到 $\pm 1.2^\circ\text{C}$, 系统空间分辨率是温度相关的, 在 150°C 附近达到最高, 约为 0.56 m。

4 总结与展望

POTDR 分布式扰动传感技术具有系统结构简单、成本低、灵敏度高优点, 有着极大的发展潜力和应用前景。由于光纤中光波偏振态的前后相关性, 从时域信号中 POTDR 一般只能判别最前端的事件点, 极大限制了 POTDR 技术在分布式扰动监测方面的应用。针对 POTDR 的多点扰动传感问题, 研究者们进行了大量的工作, 取得了较好的结果, 使得 POTDR 传感技术基本可以胜任大多数存在多点扰动的传感监测中。

在本文总结的几种传感技术中, 基于频谱分析的传感技术具有传感系统结构简单、数据处理简便的特点, 在振动传感中有较好的应用效果, 但难以应用于对静态变化和对同频率的多点振动传感; 基于解析本地双折射矢量的多点扰动传感

技术可以应用于静态或动态的扰动检测, 也可应用于同频率的振动传感, 但其传感系统结构和数据处理均较为复杂, 测量速度较慢; 基于特殊传感光纤的传感技术根据不同的传感光纤结构和技术特点, 可用于对多种扰动情况的传感, 但其传感光纤的制作成本较高, 同时数据处理也较为复杂。

由于光波偏振态对扰动的敏感性, 对于多扰动点的分布式测量仍是 POTDR 将来的重要研究方向之一。为了保证测量速度, 利用检偏器对偏振信号进行检测可能成为 POTDR 扰动传感系统主要的信号检测手段, 而对于多扰动点的分布式测量将主要通过从时域、频域等多种角度对信号进行分析或使 POTDR 系统与特殊的传感光纤进行结合来实现。另外, 由于光波的偏振态变化是光纤传感系统中普遍存在的现象, 通过合理设置传感系统的结构, 有效利用偏振态变化所包含的扰动信息, 可实现与其他传感信息的互补, 增强光纤传感系统的性能和效果。因此, 偏振和其他光学效应融合的传感系统也是光纤传感系统中一个重要的发展方向。

参 考 文 献

- [1] Bao XY, Smith J, Brown AW. Temperature and strain measurements using the power, linewidth, shape, and frequency shift of the Brillouin loss spectrum [C] // Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2002: 311-322.
- [2] Dong YK, Ba DX, Jiang TF, et al. High-spatial-resolution fast BOTDA for dynamic strain measurement based on differential double-pulse and second-order sideband of modulation [J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(3): 2600407.
- [3] Zhou L, Wang F, Wang XC, et al. Distributed strain and vibration sensing system based on phase-sensitive OTDR [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(17): 1884-1887.
- [4] Wang ZN, Zeng JJ, Li J, et al. Ultra-long phase-sensitive OTDR with hybrid distributed amplification [J]. Optics Letters, 2014, 39(20): 5866-5869.
- [5] Masoudi A, Newson TP. Distributed optical fiber dynamic magnetic field sensor based on magnetostriction [J]. Applied Optics, 2014, 53(13): 2833-2838.
- [6] Taki M, Muanenda YS, Toccafondo I, et al. Optimized hybrid raman/fast-BOTDA sensor for temperature and strain measurements in large infrastructures [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(12): 4297-4304.
- [7] Wang F, Zhang XP, Wang XC, et al. Distributed fiber strain and vibration sensor based on Brillouin optical time-domain reflectometry and polarization optical time-domain reflectometry [J]. Optics Letters, 2013, 38(14): 2437-2439.
- [8] 张旭莘, 王峰, 路元刚. 基于布里渊效应的连续分布式光纤传感技术 [J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(11): 14-20.
- [9] Rogers AJ, Handerek VA. Frequency-derived distributed optical-fiber sensing: rayleigh backscatter analysis [J]. Applied Optics, 1992, 31(21): 4091-4095.
- [10] Rogers AJ. Distributed measurement of strain using optical-fibre backscatter polarimetry [J]. Strain, 2000, 36(3): 135-142.
- [11] 董贤子, 吴重庆, 付松年, 等. 基于 P-OTDR 分布式光纤传感中信息提取的研究 [J]. 北方交通大学学报, 2003, 27(6): 106-110.
- [12] Zhang ZY, Bao XY. Distributed optical fiber vibration sensor based on spectrum analysis of polarization-OTDR system [J]. Optics Express, 2008, 16(14): 10240-10247.
- [13] 李建中, 饶云江, 冉曾令. POTDR 分布式光纤传感及其在安防监测中的应用 [J]. 光子学报, 2009, 38(11): 2789-2794.
- [14] Chen MM, Zhang XP, Wang F, et al. Development of distributed vibration sensing system based on polarization optical time domain reflectometry [J]. Sensor Letters, 2012, 10(7): 1534-1538.
- [15] Wang F, Wang XC, Zhang XP, et al. Influence of

- optical pulse width on the perturbation detection performance of polarization-optical time domain reflectometer [J]. *Applied Optics*, 2012, 51 (35): 8498-8504.
- [16] Linze N, Megret P, Wuilpart M. Development of an intrusion sensor based on a polarization-OTDR system [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12 (10): 3005-3009.
- [17] Palmieri L, Sarchi D, Galtarossa A. Polarization optical fiber sensor for distributed current monitoring [C] // *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2014: 91570.
- [18] Wang XC, Yan ZJ, Wang F, et al. SNR enhanced distributed vibration fiber sensing system employing polarization-OTDR and ultra-weak FBGs [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7 (1): 1-11.
- [19] Zhang ZY, Bao XY. Continuous and damped vibration detection based on fiber diversity detection sensor by rayleigh backscattering [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26 (7): 832-838.
- [20] Wang XC, Zhang XP, Wang F, et al. Application of frequency spectrum analysis in measuring multi-vibrations by using POTDR [C] // *International Conference on Optical Instruments and Technology*, 2011: 819808.
- [21] Wuilpart M, Rogers AJ, Megret P, et al. Fully distributed polarization properties of an optical fiber using the backscattering technique [C] // *International Conference on Application of Photonic Technology*, 2000: 396-404.
- [22] Tong YW, Dong H, Wang YX, et al. Distributed incomplete polarization-OTDR based on polarization maintaining fiber for multi-event detection [J]. *Optics Communications*, 2015, 357: 41-44.
- [23] Linze N, Tihon P, Verlinden O, et al. Development of a multi-point polarization-based vibration sensor [J]. *Optics Express*, 2013, 21 (5): 5606-5624.
- [24] Parvaneh F, Handerek VA, Rogers AJ. Frequency-derived remote measurement of birefringence in polarization-maintaining fiber by using the optical Kerr effect [J]. *Optics Letters*, 1992, 17 (19): 1346.
- [25] Parvaneh F, Farhadiroushan M, Handerek VA, et al. Single-shot distributed optical-fiber temperature sensing by the frequency-derived technique [J]. *Optics Letters*, 1997, 22 (5): 343-345.