

# 一种频分复用和偏振分集融合的 $\Phi$ -OTDR系统

李云飞<sup>1</sup>, 刘静霄<sup>2</sup>, 赵世松<sup>1</sup>, 陈晓红<sup>3</sup>, 佟 帅<sup>2</sup>, 王 顺<sup>2\*</sup>

(1. 南京法艾博光电科技有限公司, 南京 211100; 2. 南京大学 现代工程与应用科学学院, 南京 210046;  
3. 南京邮电大学 电子与光学工程学院 南京 210046)

**摘 要:** 提出了一种频分复用(FDM)和偏振分集接收(PDR)融合的 $\Phi$ -OTDR结构, 可以提升 $\Phi$ -OTDR系统扰动信号无失真重构的能力。期望利用这种融合技术, 有效实现对干涉衰落和偏振衰落的同时抑制。通过验证性实验, 将10 s数据的重构信号平均失真率由15.55%降低至1.10%。对比单独使用FDM技术抑制干涉衰落和单独使用PDR技术抑制偏振衰落, 具有更好的衰落噪声抑制效果。为 $\Phi$ -OTDR系统的工程推广提供了一种有效的抗衰落噪声方式。

**关键词:** 相位敏感光时域反射; 衰落噪声; 频分复用; 偏振分集接收

**中图分类号:** TN29; TP212.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2021)04-0283-06

## An $\Phi$ -OTDR System Combining Frequency Division Multiplexing and Polarization Diversity Technology

LI Yunfei<sup>1</sup>, LIU Jingxiao<sup>2</sup>, ZHAO Shisong<sup>1</sup>, CHEN Xiaohong<sup>3</sup>, TONG Shuai<sup>2</sup>, WANG Shun<sup>2</sup>  
(1. Nanjing Fiber Technology Co. Ltd., Nanjing 211100, CHN; 2. College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210046, CHN; 3. College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, CHN)

**Abstract:** In order to improve the ability of distortion-free reconstruction of the disturbance signal of the  $\Phi$ -OTDR system, a  $\Phi$ -OTDR structure was proposed to combine frequency division multiplexing (FDM) and polarization diversity reception (PDR). It was expected that the use of this fusion technology could effectively achieve simultaneous suppression of interference fading and polarization fading. Through a confirmatory experiment, the average distortion rate of the reconstructed signal of the 10 s data was reduced from 15.55% to 1.10%. Compared with using FDM technology alone to suppress interference fading and using PDR technology alone to suppress polarization fading, it had better fading noise suppression effect, which could provide an effective anti-fading noise method for the engineering promotion of the  $\Phi$ -OTDR system.

**Key words:** phase-sensitive optical time-domain reflection system; fading noise; frequency division multiplexing; polarization diversity reception

**收稿日期:** 2021-09-30

**作者简介:** 李云飞(1993—), 男, 主要从事分布式光纤传感系统的研发工作;

刘静霄(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为分布式光纤传感相关工作;

赵世松(1991—), 男, 硕士, 主要从事分布式光纤传感系统的研发工作。

\* **通讯作者:** 王 顺(1973—), 男, 副教授, 主要从事测试计量、图像处理、数据采集与光电信号检测等方面的研究。(E-mail: wshun@nju.edu.cn)

## 引 言

相位敏感光时域反射系统( $\Phi$ -OTDR)因其高灵敏度、响应速度快的特点,自1993年被Taylor等提出后<sup>[1]</sup>,在光纤动态特征测量中取得了显著进步。近年来, $\Phi$ -OTDR在入侵监测、地质灾害监测、结构健康监测<sup>[2-5]</sup>等诸多领域逐步发展为一种重要的监测手段。然而, $\Phi$ -OTDR系统中存在的衰落噪声是影响其信噪比提升的关键问题。衰落噪声包括干涉衰落和偏振衰落,会导致 $\Phi$ -OTDR系统的解调结果恶化,信噪比(SNR)降低,引起解调结果失真等问题。随着 $\Phi$ -OTDR系统的不断深入研究,各种抗衰落噪声技术被提出。

为消除系统中衰落的影响,最常用的方法是将多组独立测量的信号叠加。2013年,蔡海文等人指出不同频率的脉冲产生的RBS曲线衰落点位置不同,多频 $\Phi$ -OTDR系统可以消除干涉衰落<sup>[6]</sup>。随后,Hartog等人将这一方法运用在了地震波探测领域,提出了一种多探测频率同时测量的 $\Phi$ -OTDR系统<sup>[7]</sup>。2019年,张旭莘等人利用三组声光调制器搭建多频 $\Phi$ -OTDR系统,并结合以幅度为依据的最优追踪算法,实现了动态衰落抑制,重构无失真相位<sup>[8]</sup>。1984年,N.J.Frigo等人提出了偏振分集接收(PDR)技术<sup>[9]</sup>。2016年,鲍晓毅等人将PDR技术应用于 $\Phi$ -OTDR系统中有效抑制了偏振衰落的影响,相较于传统的相干探测结构,系统信噪比明显提升<sup>[10]</sup>。2020年,孙廷玺等人设计了一套基于偏振分集技术的分布式光纤声波传感系统,减少了DAS系统的漏报、误报率<sup>[11]</sup>。但这些研究中,都仅单一针对干涉衰落或偏振衰落,并未同时实现两种衰落噪声的抑制。

为同时抑制相干衰落和偏振衰落,获得更好的衰落噪声抑制效果,文章考虑将两种复用方式融合,搭建频分复用(FDM)和PDR融合的 $\Phi$ -OTDR系统,以获得良好的衰落噪声抑制效果,为 $\Phi$ -OTDR系统提供了一种可靠的抗衰落噪声手段。

## 1 基本原理

### 1.1 衰落噪声

$\Phi$ -OTDR系统中,衰落噪声包括相干衰落噪声和偏振衰落噪声。由于 $\Phi$ -OTDR使用了窄线宽激光光源,光源的相干长度远大于探测长度,脉冲宽度内各散射点产生的瑞利背向散射光(RBS)间会相互干涉,导致接收端获得的RBS信号曲线呈现锯齿

状轮廓。在某些位置发生干涉相消时,RBS信号幅度明显降低甚至趋近于零,被称为干涉衰落。在 $\Phi$ -OTDR系统中,衰落噪声的主要来源是干涉衰落,但在相干探测结构中,由于光脉冲在待测光纤中产生的背向散射光返回后还需与本征光发生混频。此时,光纤中的不均匀性会引起双折射效应,导致本征光和信号光之间的偏振态随机变化,存在不一致性。干涉光的相位和偏振态会影响干涉结果,因此某些位置信号幅度会因偏振态的随机变化发生减弱甚至淹没在噪声中,出现偏振衰落。

在相干探测 $\Phi$ -OTDR系统中,根据一维散射模型,并考虑本征光和信号光的偏振态,光电探测器接收的光电流可以表示为:

$$I = \sum_{i=1}^n (E_s r_i)^2 \exp(-4\alpha z_i) + E_1^2 + 2 \sum_{i=1}^n E_s r_i E_1 \exp(-4\alpha z_i) \cos[2\pi\Delta f t + \Delta\varphi_i(t)] \cos[\theta_i(t)] \quad (1)$$

其中, $E_s$ 为信号光的电场强度, $i$ 表示光纤中分布的第*i*个散射点, $r_i$ 为对应散射点的散射系数, $z_i$ 为随机分布的位置, $\alpha$ 为平均衰减系数, $E_1$ 为本征光的电场强度, $\Delta f$ 为声光调制器(AOM)引入的频移量, $\Delta\varphi_i(t)$ 和 $\theta_i(t)$ 代表在短脉冲的空间长度上存在的*n*个瑞利散射中心总数中的第*i*个反射点的参考光和反射光之间的相对相位和偏振,相对相位会由于 $\Phi$ -OTDR的内部不稳定性和感测光纤上的外部干扰引起随时间变化的相位扰动。根据上述公式,偏振衰落体现在 $\cos[\theta_i(t)]$ 上。相干衰落则与光纤内散射点特性和探测脉冲光的参数密切相关。根据公式(1)可以明显看出光频 $\Delta f$ 和偏振态 $\theta_i$ 都会影响接收光强。

当偏振衰落或相干衰落导致信号幅度趋近于零时,信号淹没在噪声中。研究表明输出信号中存在的强度噪声在相位解调过程中会转换成相位噪声<sup>[12]</sup>,从而降低解调相位的信噪比,导致相位解调结果出现误差甚至错误,在 $\Phi$ -OTDR系统中,常采用差分鉴相的处理方法<sup>[13]</sup>。其解调出的相位信噪比与参与差分两位置处的信号强度相关:

$$\text{SNR}_\varphi = \frac{\sigma_\varphi^2}{\sigma_n^2 \left[ 1/A^2(t_1) + 1/A^2(t_2) \right]} \quad (2)$$

根据上式,解调出的相位的信噪比会随着信号强度的波动而波动。这也解释了信号落入衰落时,解调出的相位信号信噪比降低,会出现较大误差。

### 1.2 频分复用和偏振分集

两个非相关的独立信号同时处于衰落的概率

是极小的,当这些信号携带同一信息时,通过接收并处理多路独立信号就可以实现衰落抑制。在Φ-OTDR系统中,通过FDM技术或者PDR技术则可以获得多个不相关的或相关性低的独立信号。然而在多频Φ-OTDR中,为获得独立的多频测量信号,不同频率间的频率差必须要满足以下条件<sup>[14]</sup>:

$$\Delta f = f_2 - f_1 \geq \frac{V_g}{4L} \quad (3)$$

式中,  $f_1$ 、 $f_2$ 是探测脉冲频率,  $V_g$ 是光在光纤中传输的群速度,  $L$ 是差分鉴相的间隔。当各探测频率的频率差满足上式时,各探测频率获得的RBS信号间的相位具有较低的相关性,此时可被视为不同的独立测量信号。其中多探测频率光可以通过不同的方式获得,在通信上常使用多个激光器或光学频率梳,其中利用相位调制来实现FDM较为广泛。

PDR通常是利用偏振分集接收器在接收端进行检测。其中双态偏振分集接收是使用两个偏振分束器(PBS)将信号光与本征光分别分解为两组偏振态正交的光束,相同偏振态的光分别进行耦合后由平衡光电探测器(BPD)接收。根据琼斯矩阵,信号光和本征光的电场矢量可以分别表示为:

$$\begin{pmatrix} E_{sx} \\ E_{sy} \end{pmatrix} = E_s \exp[j(\omega_s t + \varphi_s)] \begin{pmatrix} \cos\theta_s \cos\epsilon_s - j \sin\theta_s \sin\epsilon_s \\ \sin\theta_s \cos\epsilon_s + j \cos\theta_s \sin\epsilon_s \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} E_{lx} \\ E_{ly} \end{pmatrix} = E_l \exp[j(\omega_l t + \varphi_l)] \begin{pmatrix} \cos\theta_l \cos\epsilon_l - j \sin\theta_l \sin\epsilon_l \\ \sin\theta_l \cos\epsilon_l + j \cos\theta_l \sin\epsilon_l \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中,  $\omega_s$ 、 $\varphi_s$ 、 $\theta_s$ 和  $\epsilon_s$ 分别为信号光的角频率、相位、方位角和椭圆率角,  $\omega_l$ 、 $\varphi_l$ 、 $\theta_l$ 和  $\epsilon_l$ 则分别为本征光的角频率、相位、方位角和椭圆率角。当通过与  $x$ 轴夹角为  $\theta$ 的检偏器后,干涉信号输出强度可以表示为:

$$\begin{cases} I = \frac{1}{2}(E_s^2 + E_l^2) + E_s E_l \sqrt{a^2 + b^2} \cos(\Delta\omega t + \varphi - \phi) \\ a = \cos(\theta_s - \theta_l) \cos(\epsilon_s - \epsilon_l) + \cos(\theta_s + \theta_l - 2\theta) \cos(\epsilon_s + \epsilon_l) \\ b = \sin(\theta_l - \theta_s) \sin(\epsilon_s + \epsilon_l) + \sin(\theta_s + \theta_l - 2\theta) \sin(\epsilon_l - \epsilon_s) \\ \phi = \arctan\left(\frac{b}{a}\right) \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\varphi$ 为本征光和信号的相位差,  $\varphi = \varphi_s - \varphi_l$ ;  $\Delta\omega$ 为本征光和信号光之间的角频率差,  $\Delta\omega = \omega_s - \omega_l$ 。当假设本征光和信号光都为线偏振光时,有  $\epsilon_s = \epsilon_l = 0$ 。由于双态偏振分集接收中使用的是正交偏振态,  $\theta = k \frac{\pi}{2}$ ,  $k$ 取值为0、1,因此接收端接收的干涉

信号可表示为:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{1}{2} E_s E_l [\cos(\theta_s - \theta_l) + \cos(\theta_s + \theta_l)] \cos(\Delta\omega t + \varphi) \\ I_2 = \frac{1}{2} E_s E_l [\cos(\theta_s - \theta_l) - \cos(\theta_s + \theta_l)] \cos(\Delta\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (7)$$

从式(7)中可以看到两路信号的幅度部分并不相同,由此可以通过综合两路信号的方式实现衰落噪声的抑制。

## 2 实验与结果分析

实验系统结构如图1所示。通过使用两个具有不同移频量的AOM实现双频率光脉冲的注入,两个AOM分别为80 MHz和200 MHz。窄线宽激光器输出中心波长1550 nm,线宽为15 kHz的连续光,经耦合器分成两束,其中90%的一路作为探测光,10%一路作为本振光,再分别经过AOM进行移频与斩波,获得两个不同探测频率的光脉冲。两个探测光脉冲经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后,通过环形器注入待测光纤。手动光纤偏振控制器(FPC)对本征光的偏振态进行调控。待测光纤中的背向散射光与偏振控制器调控后的本征光进入偏振分集双平衡光电探测器(PBPD)进行检测。通过FPC调控本征光偏振态以使得PBPD输出的两路信号的平均强度基本相当。实验中使用的PBPD模块简化了系统结构,该模块内部结构如图2所示,包含了PBS和BPD。PBS将输入的光信号分为正交的两个偏振态,两路不同偏振态的信号将分别由

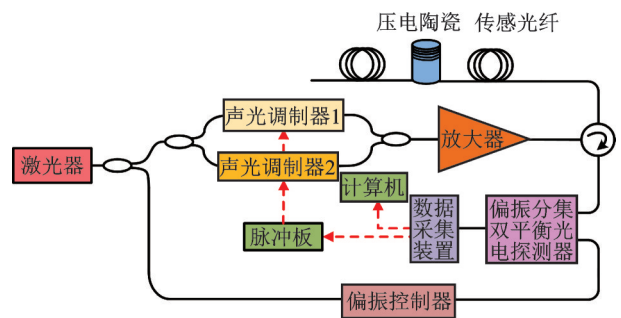


图1 实验结构示意图

Fig.1 Schematic of experimental structure

两个BPD接收,实现两路正交偏振态信号的输出。实验中使用数据采集卡(DAQ)对PBPD获得的两路输出结果进行采集,采样率为250 MHz。PBPD输出结果如图3所示,通过FPC的调控,两路输出的信号平均强度差距较小,但两路信号的曲线起伏



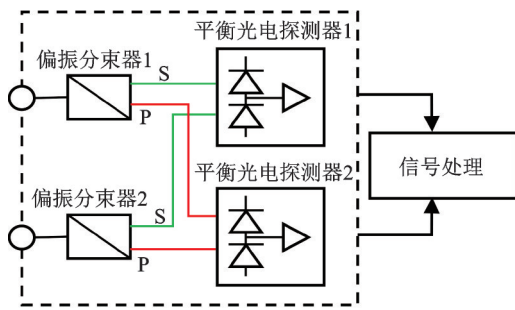
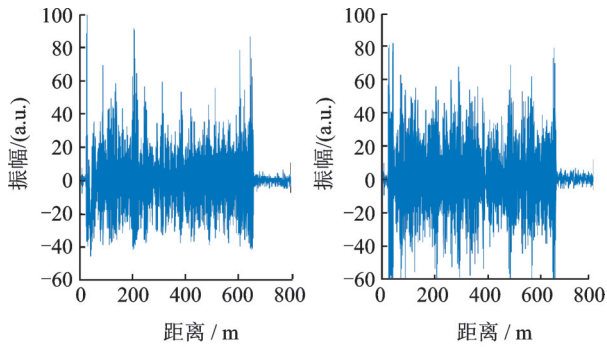


图2 PBPD结构示意图

Fig.2 Schematic of PBPD structure



(a) 偏振态1的输出信号 (b) 偏振态2的输出信号

图3 两偏振态输出原始信号

Fig.3 The original output signal under two polarization states

不完全一致,具有不同的衰落分布。

实验中通过对压电陶瓷(PZT)施加 20 Hz 的正弦信号以模拟外部扰动。对采集到的数据通过合理的滤波将两个不同频率的信号分离,最终获得四组独立测量信号。随后,基于南京大学张旭莘课题组提出的优选算法对四组独立测量信号进行了处理<sup>[3]</sup>,以获得最终的振动重构信号。

图4展示了四组独立测量信号分别使用传统方法重构出的扰动信号。由于偏振态随机变化,该实验结构中只能在较短的时间范围内保持两偏振态信号输出强度的稳定性,因此这里仅对时长为 10 s 的数据进行了处理。图4从上至下分别展示了 200 MHz 下两个偏振态(P1 和 P2)的解调结果与 80 MHz 下两个偏振态的解调结果,每组结果都有在部分时刻出现相位失真。同一频率下不同偏振态的信号获得的结果出现失真的位置并不相同,同时同一偏振态下不同频率的信号获得结果的失真位置也同样不完全相同。由于四组独立测量信号的衰落位置不完全一致,可以综合四组信号实现解调信号失真的规避。图5展示了基于FDM和PDR融合技术获得重构信号与该方法下重构信号的来源以及各个独立测量信号的幅度随时间的变化情况。

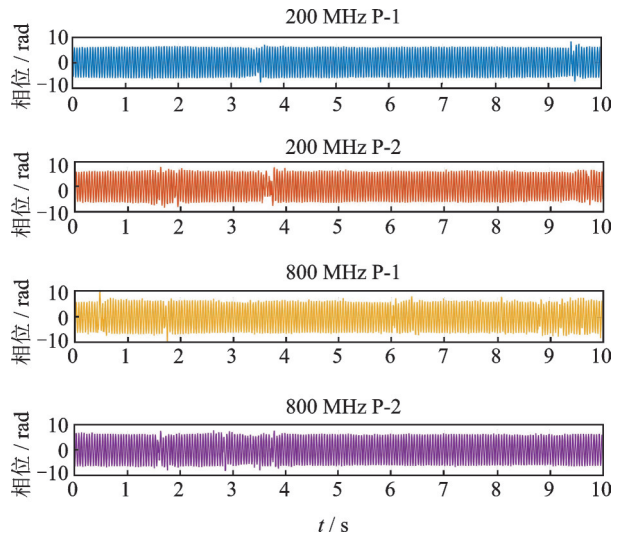
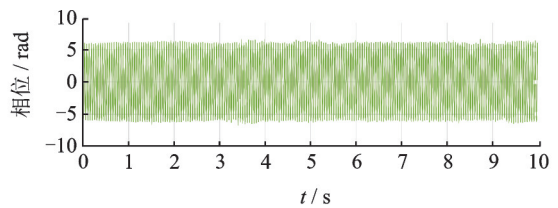


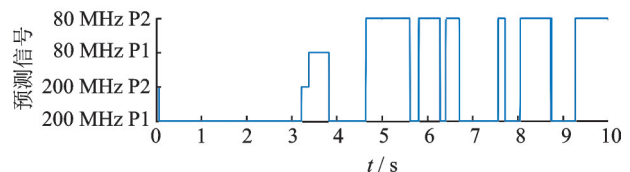
图4 四组信号通过传统算法获得的重构结果

Fig.4 Reconstruction results of four sets of signals obtained by traditional algorithms

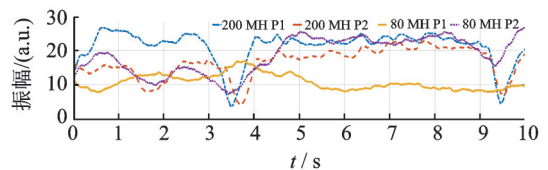
在 10 s 的数据长度内,图 5(a)中的相位结果基本呈现出平稳的正弦信号,没有明显的缓变包络和解调



(a) 重构信号时域图



(b) 重构信号来源曲线



(c) 独立测量信号幅度曲线

图5 基于FDM和PDR融合技术获得的结果

Fig.5 The results based on FDM and PDR fusion technology

错误出现,相较于图4中的四组重构结果,相位失真程度明显降低。图5(b)中的信号来源曲线随着幅度最大值的变化在四组独立测量信号中来回变换,及时避免强度衰落区域。图5(c)展示了四组独立测量信号的强度变化,分别用不同的线型进行表示:点划线表示 200 MHz 在偏振态 1 下的输出信号幅度,虚

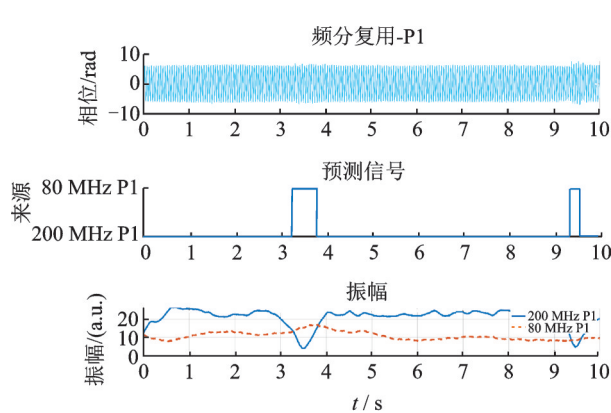
线表示 200 MHz 在偏振态 2 下的输出信号幅度,实线表示 80 MHz 在偏振态 1 下的输出信号幅度,点线表示 80 MHz 在偏振态 2 下的输出信号幅度。四组信号的幅度起伏并不完全一致,随时间变化其最强幅度对应的来源数据也在变化。该图展示的结果证明了 FDM 和 PDR 融合技术对衰落噪声具有抑制效果。

尽管 FDM 和 PDR 融合技术能抑制衰落噪声,但其相较于单独使用 FDM 或 PDR 技术,能否实现衰落抑制效果的提升需要进行进一步对比。图 6 展示了只采用 FDM 时重构获得的扰动信号。基于 FDM 的衰落噪声抑制是对不同频率的独立测量信号进行处理,由于本实验中获得了两个正交偏振态下的数据,因此这里选择相同偏振态下的两个不同频率信号进行处理,最终分别获得了两组使用 FDM 技术的重构扰动信号(P1 和 P2 下的两组 FDM 结果),可以看到这两组信号相比于四组独立测量信号获得的解调结果,失真程度都有所降低,其中从偏振态 1 下的两个频率信号基于 FDM 方法获得的重构信号相比于偏振态 2 下的波形更加优良,仅在

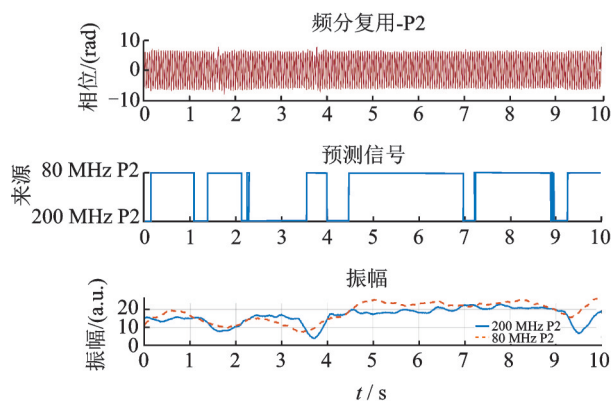
尾端出现短时的失真。根据图中的信号来源曲线,可以看出未能避免的位置其幅度最高值对应的解调相位并不是最优的,从而导致出现衰落未能及时避免的现象。尽管两组信号仍存在部分失真未能避免,但还是能够进行衰落噪声抑制。

图 7 是使用 PDR 技术获得的重构扰动信号。同样的,由于实验中涉及两个不同频率的探测脉冲信号,因此这里分别展示了 80 MHz 信号使用 PDR 技术时和 200 MHz 信号使用 PDR 技术时获得的重构信号。两组使用 PDR 技术获得的重构信号也都存在部分失真位置未能及时避免的情况,但相较于原始解调方法获得的重构信号,信号波形失真明显降低,仅存在少量失真。图 7 中也分别展示了重构信号的来源和原始信号的幅度随时间的波动情况,出现失真的位置大概率都位于低幅度值处。比较上述三种方法获得的重构信号时域图,分别采用 FDM 和 PDR 技术获得的重构信号与融合 FDM 和 PDR 技术获得的重构信号相比,融合技术下获得的重构信号出现失真的位置明显更少,波形更优。

为更加清晰地反映出单独使用 FDM 和 PDR 技



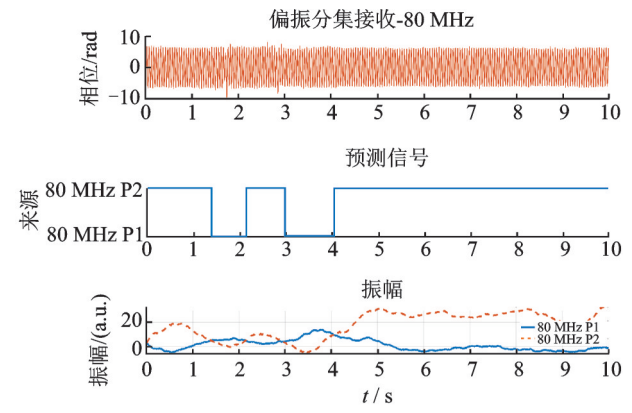
(a) 偏振态1下的数据基于FDM获得的结果



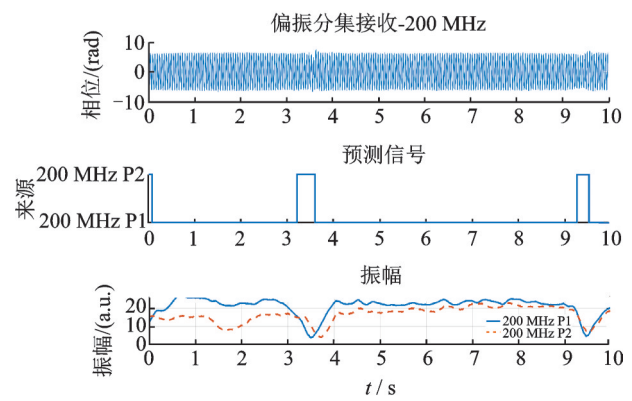
(b) 偏振态2下的数据基于FDM获得的结果

图6 仅使用FDM技术获得的结果。

Fig. 6 Results obtained using FDM technology only



(a) 80 MHz的数据基于PDR获得的结果



(b) 200 MHz的数据基于PDR获得的结果

图7 仅使用PDR技术的输出结果

Fig. 7 Results obtained using PDR technology only

术进行衰落噪声抑制与融合两者进行衰落噪声抑制的效果差异,对获得的重构信号的失真率进行了统计。图8展示了三种方法得到的结果的失真率与四组独立测量信号使用传统解调方法获得的结果的失真率。四组独立测量信号获得的重构信号的失真率分别为7.42%,17.12%,26.75%和10.91%。当采用FDM时,偏振态1下综合两个频率信号获得的重构信号的失真率为2.76%,偏振态2下的重构信号失真率为8.30%;当采用PDR技术时,200 MHz下的综合两正交偏振态信号获得的重构信号失真率为5.76%,80 MHz下的重构信号失真率为7.07%;当采用FDM和PDR融合技术时,获得的重构信号失真率仅为1.10%,有明显降低。融合技术相比于单独使用两种方法,衰落噪声抑制效果更加明显。

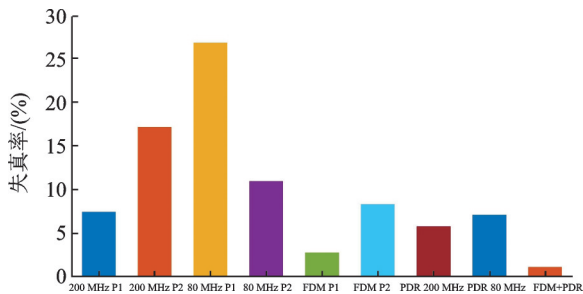


图8 重构信号失真率统计

Fig.8 Statistics of reconstructed signal distortion rate

### 3 结 论

通过验证性实验,表明FDM和PDR技术融合的 $\Phi$ -OTDR系统具有良好的衰落噪声抑制效果,其相比于单独使用FDM或PDR技术的抑制效果更加明显,可以实现对干涉衰落和偏振衰落的同步抑制。在10 s的监测时间内,将四组信号的重构信号平均失真率从15.55%降低至了1.10%,为 $\Phi$ -OTDR系统提供了一种有效可靠的抗衰落手段。但由于偏振态随机变化的特点,该系统只能在较短监测时间内实现良好的衰落噪声抑制,提升干涉衰落和偏振衰落同时长时间抑制的能力将成为未来的研究方向。此外,文章直接使用了已有的优选方式,但在某些衰落位置处仍存在由于处理方式导致的衰落噪声未及时避免的情况。因此,今后对于多组独立数据的处理方式还可以展开进一步的研究工作,以获得更加优良的抑制效果。

### 参 考 文 献

- [1] Taylo R H F, Lee C E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing [P]. US Patent. 1993,3:194847.
- [2] Ye X W, Su Y H, Han J P. Structural health monitoring of civil infrastructure using optical fiber sensing technology: A comprehensive review [J]. The Scientific World Journal, 2014, 1: 652329.
- [3] Li M, Wang H, Tao G. Current and future applications of distributed acoustic sensing as a new reservoir geophysics tool [J]. Open Petroleum Engineering Journal, 2015, 8:272-281.
- [4] Daley T M, Miller D E, Dodds K, et al. Field testing of modular borehole monitoring with simultaneous distributed acoustic sensing and geophone vertical seismic profiles at Citronelle, Alabama [J]. Geophysical Prospecting, 2016, 64(5): 1318-1334.
- [5] Owen A, Duckworth G, Worsley J. Opta Sense: Fibre optic distributed acoustic sensing for border monitoring [C]. Intelligence and Security Informatics Conference, Odense, Denmark, 2012: 362-364.
- [6] Zhou J, Pan Z, Ye Q, et al. Characteristics and explanations of interference fading of a  $\phi$ -OTDR with a multi-frequency source [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(17): 2947-2954.
- [7] Hartog A H, Liokumovich L B, Ushakov N A, et al. The use of multi-frequency acquisition to significantly improve the quality of fibre-optic-distributed vibration sensing [J]. Geophysical Prospecting, 2018, 66:192-202.
- [8] Zabihi M, Chen Y, Zhou T, et al. Continuous fading suppression method for phi-OTDR systems using optimum tracking over multiple probe frequencies [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(14): 3602-3610.
- [9] Frigo N J, Dandridge A, Tveten A B. Technique for elimination of polarization fading in fiber interferometers [J]. Electronics Letters, 1984, 20(8): 319-320.
- [10] Ren M, Lu P, Chen L, et al. Theoretical and experimental analysis of Phi-OTDR based on polarization diversity detection [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28 (6) : 697-700.
- [11] 孙廷玺, 徐龙海, 王升, 等. 基于偏振分集技术的分布式光纤声波传感系统 [J]. 光通信技术, 2020, 44(8): 5-9.
- [12] Lin S, Wang Z, Xiong J, et al. Rayleigh fading suppression in one-dimensional optical scatters [J]. IEEE Access, 2019, 7: 17125-17132.
- [13] Masoudi A, Belal M, Newson T P. A distributed optical fibre dynamic strain sensor based on phase-OTDR [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(8):085204.
- [14] Shimizu K, Horiguchi T, Koyamada Y. Characteristics and reduction of coherent fading noise in Rayleigh backscattering measurement for optical fibers and components [J]. Journal of Lightwave Technology, 1992, 10(7): 982-988.