

多芯光纤分布式声传感

顾金凤^{1,2}, 卢斌^{1**}, 杨竣淇^{1,2}, 王照勇¹, 叶蕾¹, 叶青^{1,2}, 瞿荣辉^{1,2}, 蔡海文^{1,2*}¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 多芯光纤中有多个独立并行的空间信道, 利用其实现空间分集, 以解决基于传统单模光纤的分布式光纤声波传感系统所面临的信号衰落和信噪比受限问题。通过扇入扇出模块, 在多芯光纤的其中四个纤芯中进行信号的独立传输和分集探测, 并采用相干合并技术对多路信号进行有效合并。实验结果表明, 外部扰动信号得到了很好的重构, 信号衰落被抑制, 系统的底噪较优化后单模光纤系统降低了 5.2 dB。传感器表现出高水平的性能, 带宽可达 10 kHz, 最低底噪达 -85 dB。

关键词 光纤光学; 多芯光纤; 分布式声波传感; 底噪

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0706003

Distributed Acoustic Sensing Based on Multi-Core Fiber

Gu Jinfeng^{1,2}, Lu Bin^{1**}, Yang Junqi^{1,2}, Wang Zhaoyong¹,
Ye Lei¹, Ye Qing^{1,2}, Qu Ronghui^{1,2}, Cai Haiwen^{1,2*}¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In this study, we use multiple independent parallel spatial channels in multi-core fibers to achieve spatial diversity in solving the signal fading and limited signal-to-noise ratio of distributed fiber acoustic sensing systems based on traditional single-mode fibers. We use the fan-in and fan-out modules for independent transmission and centralized reception of signals in four cores of the multi-core fiber, and multiple signals can be aggregated effectively using a coherent aggregation method. The experimental results show a well-reconstructed external disturbance signal, suppressed signal fading, and reduced noise floor by 5.2 dB compared with that of the optimized single-mode fiber system. The sensor exhibits high-level performance: lowest noise floor of -85 dB and bandwidth of 10 kHz.

Key words fiber optics; multi-core fiber; distributed acoustic sensing; noise floor

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.4230

收稿日期: 2020-10-13; 修回日期: 2020-11-02; 录用日期: 2020-11-23

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405500, 2020YFC1522901)、国家自然科学基金(61535014, 61675216, 61805260, 61905260, 61905262)、中科院战略先导专项(XDB43000000)、中科院 STS 区域重点项目(KFJ-STQYZD-084)、上海市自然科学基金(19YF1453400, 18ZR1444600)、中国科学院促进发展局项目(KFJSTS-QYZD-084)、中国科学院创新基金(CXJJ-19-C16)

* E-mail: hwcai@siom. sc. cn; ** E-mail: lubin@siom. ac. cn

1 引言

网络和宽带业务的快速发展使得用户对带宽的需求与日俱增,单芯单模光纤(SMF)传输容量已经接近物理极限,利用多芯光纤(MCF)的空分复用技术为进一步提高光纤的传输容量和频谱效率提供了可能性。多芯光纤能够提供多个独立并行的空间信道,而且不需要复杂的多入多出(MIMO)解耦算法。由于自身的空间结构优势,多芯光纤已成为近年来研究的最有可能实现商用的新型传输光纤,具有良好的应用前景,受到了多个领域研究学者的广泛关注。

多芯光纤具备弯曲敏感、温度自补偿和信道集成等特性^[1],提供了传统单模光纤无法实现的功能,可制成不同的传感器实现不同参数的测量。随着多芯光纤的制作工艺、多芯光纤放大器^[2]等各种相应器件的不断发展,许多研究学者们也开始探索多芯光纤在分布式光纤传感领域的更多可能性。2007年,Duncan等^[3]在多芯光纤中采用光频域反射仪(OFDR)技术进行分布式应变测量,实现了三维空间中光纤形状和位置的估计。2020年,Yin等^[4]利用螺旋型多芯光纤设计了基于OFDR的分布式定向扭转传感器,该传感器实现了线性灵敏度为 $1.9 \mu\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}\cdot\text{m}$ 的分布式定向扭转传感。2016年,Zhao等^[5]提出了一种基于多芯光纤的空分复用混合拉曼和布里渊分布式传感器,该传感器实现了温度和应变的多参量同时测量。2018年,Zhao等^[6]通过多芯光纤将相位敏感光时域反射计(Φ -OTDR)和马赫-曾德尔干涉仪(MZI)相结合,实现了更宽的振动频率响应范围和更高的空间分辨率。

在本次工作中,将多芯光纤应用于基于 Φ -OTDR技术的分布式光纤声波传感(DAS)系统中。多芯光纤特有的空间结构优势,可实现多路光信号的长距离低串扰传输。同时,考虑到多芯光纤中的各个纤芯对外界扰动的响应一致性和折射率分布的空间随机性,可将其应用于分布式声传感的空间分集技术,来解决传统单模光纤 Φ -OTDR系统所面临的一些技术挑战。基于传统单模光纤的 Φ -OTDR系统由于具有固有的瑞利散射系数低^[7]和易遭受信号衰落^[8]的问题,系统的信噪比受限,相比于传统基于反射点的离散光纤传感器^[9-10]要差得多,此外衰落位置处的相位无法正确解调,影响系统的可靠性。采取的解决方案是通过分集技术,利用各个独立探测分量之间的正交互异性来降低干涉衰落的影响,

如相移双脉冲法^[11]、差分相移脉冲法^[12]、多频脉冲法^[13-14]、内脉冲分频法^[15-16]和多波长注入法^[17]等。分集方案的基础是不同探测脉冲的背向瑞利散射光(RBS)之间的弱相关性,从分集的维度上来讲,光信号可以被分为不同的偏振、频率、相位、空间分布等。而多芯光纤就为分集技术提供了一种新的可能性,通过在一根光纤的多个独立的纤芯中同时传输光信号来实现芯间分集。不仅如此,在沿单根光纤的不同空间纤芯中提供平行传输路径,可以显著提高注入光纤中的光能量,从而减轻单模光纤非线性效应阈值的限制。

本文报道了一种基于多芯光纤的分布式声传感系统,介绍了多芯光纤的传输特性和串扰抑制。从理论上验证了基于多芯光纤的分集技术在解决DAS系统信号衰落问题时的有效性,并分析了多个纤芯信号合并后信噪比提升与分集数目(纤芯个数)的关系。实验结果表明,通过分集合并技术,衰落噪声得以有效抑制,信噪比一致性更高,散射信号强度增加,系统底噪得以大幅降低。实验中系统带宽可达10 kHz,最低底噪达-85 dB,为进一步满足高级声学应用的需求提供了技术支持。

2 多芯光纤声传感系统原理分析

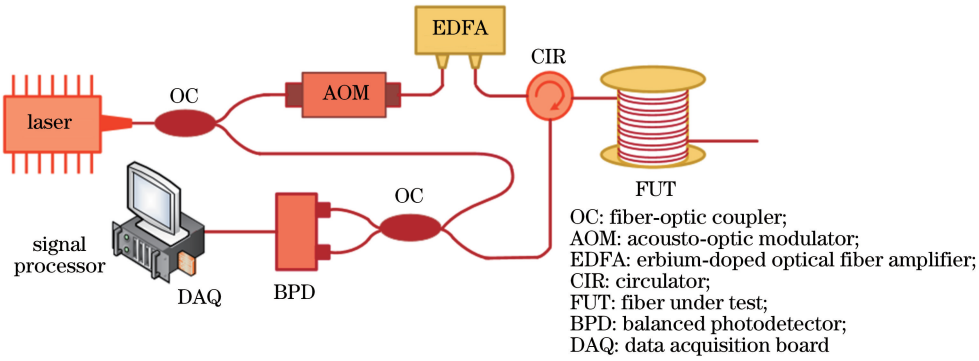
2.1 Φ -OTDR 系统的结构和原理

外差相干差分相位型 Φ -OTDR结构如图1所示。窄线宽激光器输出的连续光经光纤耦合器(OC)分成探测光和本地参考光两路。其中,探测光经过声光调制器(AOM)调制后,斩波成脉冲光,并产生频移 $\Delta\omega$ 。探测脉冲经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后通过环形器(CIR)注入到被测光纤(FUT)中进行传输。脉冲光在光纤传输过程中发生瑞利散射,产生的背向瑞利散射光(RBS)经过CIR与本地参考光一起通过分光比为50:50的OC进行拍频。拍频后的信号由双平衡探测器(BPD)接收并进行探测,BPD输出的交流电信号由数据采集卡(DAQ)进行采集,最后由信号处理器进行振幅和相位信息解调^[18],并进行进一步的信号处理。

背向散射光电场的表达式为

$$E_B(t_z) = E_0 |\hat{r}_{\text{Ray}}| e^{-\alpha z} e^{-j\omega t_z} \exp[j(\phi_z + \phi_{\text{Ray}})], \quad (1)$$

式中: E_0 为入射光电场; α 为光纤衰减系数; ω 为探测光的频率; t_z 为光在光纤中传输的往返时间; $\hat{r}_{\text{Ray}} = |\hat{r}_{\text{Ray}}| \exp(j\phi_{\text{Ray}})$ 为综合瑞利散射系数; ϕ_z 为传

图 1 外差相干差分相位型 Φ -OTDR 结构示意图Fig. 1 Schematic of phase-demodulated Φ -OTDR structure based on heterodyne coherent detection

输相位。在外差相干探测方案中, RBS 信号通过与本振参考光进行拍频可以实现相干放大, 从而获得较高的信噪比和达到更大的动态范围。经过相干探测后, BPD 的输出信号表示为

$$P_{\text{BPD}} = 4E_L E_O |\hat{r}_{\text{Ray}}| e^{-\alpha z} \sin(\Delta\omega t + \phi_z + \phi_{\text{Ray}}), \quad (2)$$

式中: AOM 的移频 $\Delta\omega = \omega - \omega_L$; ω_L 和 E_L 分别为本地参考光的频率和幅度。经数据采集卡采集后, 电信号转换为数字信号, 并进行 I/Q 解调, 再经过低通滤波器后, 可解调出散射信号的幅值和相位, 输出信号表示为

$$\hat{r}(k, z) = A(k, z) \exp[j\phi(k, z)], \quad (3)$$

式中: k 为时间, $t_k = k/f_o$, f_o 为脉冲重复频率; z 为距离, $t_z = 1/f_s$, f_s 为采样速率。其中, 散射幅度 $A = 2E_L E_O |\hat{r}_{\text{Ray}}| e^{-\alpha z}$, 散射相位 $\phi = \phi_z + \phi_{\text{Ray}}$ 。外界扰动信息就包含在相位 ϕ 中。当光纤链路上存在扰动时, 可通过移动差分 $\phi(z_2) - \phi(z_1)$ 来消除共性传输相位的影响, 以获得扰动引起的相位变化。由于光相位变化与外界作用于光纤上的动态应变呈线性关系, 可以实现定量相位解调。差分相位与外界扰动引起的光纤轴向应变的关系可以表示为

$$\Delta\phi = (1 + \gamma)nk \Delta L e_z \approx 0.78n_{\text{eff}}k \Delta L e_z, \quad (4)$$

式中: γ 为有效弹光系数; n_{eff} 为光纤有效折射率; e_z 为轴向应变; ΔL 为差分长度。差分长度(空间分辨率)可在信号后处理中灵活选取, 可提高不同场景不同对象的鲁棒性。

然而, 由于瑞利散射信号比较弱 (~ -70 dB/m), Φ -OTDR 系统的底噪相对较高, 从而限制了对弱信号的探测能力。此外, 由于光纤折射率的空间非均匀分布^[14], 传输常数 $\beta(z)$ 随距离随机变化, 导致光纤链路上干涉幅值随机起伏, 在幅

值很小的位置处相位噪声被放大, 系统易受到相干衰落的影响, 此时相位解调出现错误, 信噪比恶化, 极大地影响了系统的可靠性^[19]。

2.2 多芯光纤与空间分集原理

多芯光纤是一种在一个共同的包层区中存在多个纤芯的新型光纤, 每个纤芯都可以作为一个独立的物理传输信道。一般将具有相同纤芯参数和芯间距, 但各纤芯折射率存在微小起伏的多芯光纤称为准均匀性多芯光纤^[20]。在准均匀性多芯光纤中, 光场可以表示为多个纤芯空间分布的总和:

$$E(z, t) = \sum_{n=1}^N A_n \psi_n \exp[j(\omega t - \beta_n z + \phi_n)], \quad (5)$$

式中: A_n , ψ_n 和 β_n 分别为第 n 个纤芯光信号的振幅, 空间分布和传播常数。当多芯光纤用于大容量长距离传输时, 相邻纤芯间的串扰问题是最需要关注的因素^[21]。纤芯间的串扰水平即纤芯之间的最大光功率转换, 是纤芯和包层的几何特性及芯间距所决定的。多芯光纤中各纤芯波导之间的串扰^[20]可以表示为

$$C = [1 - \exp(-2\eta L/L_c)] / [1 + \exp(-2zL/L_c)], \quad (6)$$

式中: η 为功率转换效率; L 为光纤传输长度; L_c 为耦合长度。从(6)式可以看出, 若光纤耦合长度远大于传输距离, 则纤芯间串扰可忽略不计。可以通过控制纤芯之间合理的参数排布, 增大相邻纤芯之间的间距, 以减小功率转换效率, 增加光纤耦合长度。目前, 已有大量研究报道了将弱耦合多芯光纤和低串扰低损耗扇入扇出耦合器用于实现大容量长距离的传输, 且空间信道的解复用无需采用额外复杂的信号处理技术的内容。因此, 可以将多芯光纤应用于分布式光纤传感领域的空间分集技术, 使光信号在各个纤芯中进行独立传输, 并在接收端实现分集

探测,这可以解决 Φ -OTDR 系统的相干衰落问题。此外,在信号后处理中采用相干合并技术对多路信号进行有效合并,可以达到增强瑞利散射光信号强度的效果,从而提高 Φ -OTDR 系统的信噪比。

光信号传输过程中,传输常数的变化量为 $\Delta\beta = \omega \cdot \Delta n / c + d\omega \cdot n_{\text{eff}} / c$,其中 Δn 为光纤折射率在空间上的非均匀分布, $d\omega$ 为激光器频率的漂移。由于幅值随机起伏,出现相干衰落现象。假设光频率不变,相干衰落产生的原因主要是光纤链路上折射率随距离的随机分布。在拉锥制造过程中,多芯光纤的各个纤芯的有效折射率有细微的差别,在实际长距离光纤传输链路中,由于外界温度和应变的变化,多芯光纤中各个纤芯的有效折射率变化各不相同。对不同纤芯的干涉衰落情况进行仿真实验,结果如图 2 所示,这充分说明多芯光纤中不同纤芯(光纤有效折射率变化不同)的干涉衰落位置是不相关的,具有空间独立性。故可以通过综合判别不同纤芯的衰落情况,减弱甚至消除干涉衰落引起的不良影响,提高系统的可靠性。

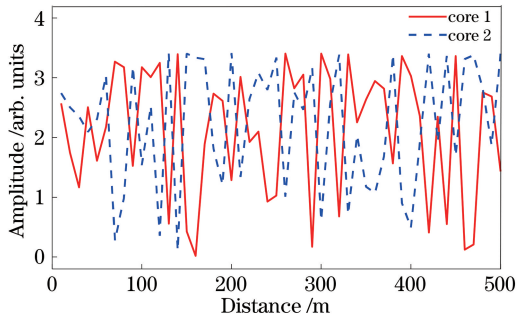


图 2 不同纤芯信号的模拟干涉衰落情况

Fig. 2 Simulated interference fading of signals in different cores

不考虑激光器相位噪声等其他限制因素的影响,假设 Φ -OTDR 系统噪声的主要成分是加性噪声,例如脉冲的消光比(ER)引入的噪声、热噪声、散粒噪声等,此类噪声都遵循零均值和方差 σ_n^2 的高斯分布。散射光输出信号可以改写为

$$\hat{r}(k, z) = A(k, z) \exp[j\phi(k, z)] + N(k, z). \quad (7)$$

故差分相位 $\Delta\tilde{\phi}$ 可以表示为

$$\Delta\tilde{\phi} = \Delta\phi(z_2, z_1) + \Delta\phi_n(z_2, z_1). \quad (8)$$

测得的差分相位包含真实差分相位和相位噪声项,其中相位噪声项 $\Delta\phi_n(z_2, z_1)$ 的方差可以表示为

$$\langle \Delta\phi_n(z_2, z_1)^2 \rangle = 0.5\sigma_n^2 \left[\frac{1}{A^2(z_1)} + \frac{1}{A^2(z_2)} \right], \quad (9)$$

式中: σ_n^2 为噪声 $N(k, z)$ 的方差。从(9)式可看出,散射信号的幅度越小,相位噪声项越大,瑞利散射信号强度较弱,限制了 Φ -OTDR 系统的底噪水平。此外,消光比、散粒噪声等引起的 σ_n^2 也是限制声传感系统底噪的重要因素。

基于传统单模光纤的 Φ -OTDR 系统的信噪比(SNR)^[22]可表示为

$$R_{\text{SN}} = 10 \lg \left\{ 2\sigma_\phi^2 / \left[\sigma_n^2 \left(\frac{1}{A^2(z_1)} + \frac{1}{A^2(z_2)} \right) \right] \right\} \approx 10 \lg \left(A^2 \frac{\sigma_\phi^2}{\sigma_n^2} \right), \quad (10)$$

式中:假设 z_1 和 z_2 足够近,可以忽略光纤损耗,即 $A^2(z_1) = A^2(z_2) = A^2$; σ_ϕ^2 为信号的方差。

由于多芯光纤的各个纤芯中传输的光信号可以通过扇入扇出模块进行分集探测,此时各个纤芯的散射光信号可以表示为

$$\hat{r}_i(k, z) = A_i(k, z) \exp[j\phi_i(k, z)] + N_i(k, z), \quad (11)$$

式中:分集数目 $i = 1, 2, 3, \dots, N$, 即多芯光纤中的纤芯个数。将来自第一个时刻光脉冲的归一化共轭作为参考,以补偿来自其他时刻探测脉冲的公共传输相位^[15],表达式为

$$\hat{R}_i(k, z) = \frac{\hat{r}_i^*(1, z)}{|\hat{r}_i(1, z)|} \cdot \hat{r}_i(k, z) = A_i(k, z) \cdot e^{j\phi_i(k, z)}. \quad (12)$$

此时,所有位置处的初始相位 $\phi_i(1, z)$ 都被设置为 0。此外,由于多芯光纤中的各个纤芯的有效折射率仅有细微的差别,各个纤芯的信号对外界环境变化的响应是几乎一致的。此时,各个纤芯中的光信号频率相同、振动方向相同,且在测量的时间内具有恒定的相位差,故可以对多路纤芯中的信号进行相干合并。此时,相干合并后的合矢量大小可以表示为

$$\hat{R}_{\text{sum}}(k, z) = \sum_{i=1}^N \hat{R}_i(k, z). \quad (13)$$

采用芯间分集技术后,一次测量相当于是 N 次(分集数目即使用的纤芯数)测量的叠加, N 次分集合并后的信噪比可以表示为

$$R'_{\text{SN}}(N) = 10 \lg \left(A_{\text{sum}}^2 \cdot \frac{\sigma_\phi'^2}{\sigma_n^2} \right), \quad (14)$$

式中: $A_{\text{sum}} = |\hat{R}_{\text{sum}}(k, z)| = N \cdot A$; 相位信号的方差就是每个信号方差的平均结果, $\sigma_\phi'^2 = \sigma_\phi^2$ 。假设噪声主要成分是高斯分布的加性噪声,通过分集合并

之后,噪声方差增加 N 倍, $\sigma_n'^2 = \sum_{i=1}^N \sigma_{ni}^2 = N \cdot \sigma_n^2$ 。故(14)式可以最终表示为

$$R'_{SN}(N) = 10 \lg \left[(N \cdot A)^2 \frac{\sigma_\phi^2}{N \cdot \sigma_n^2} \right] = R_{SN} + 10 \lg N. \quad (15)$$

可见,在不考虑激光器相位噪声等影响的情况下,通过使用多芯光纤中的多个纤芯进行空间分集,信噪比的提升与分集数目呈指数关系,如图 3 所示。

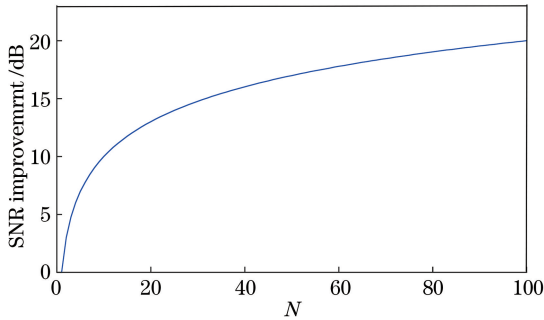


图 3 信噪比的提升与分集数目的关系

Fig. 3 Relationship between the SNR improvement and number of diversity

3 实验系统与结果

3.1 实验装置

多芯光纤分布式声传感系统结构如图 4 所示,通过使用多芯光纤中的其中 4 个纤芯进行空间分集。实验中,施加在 AOM 上的电压幅度为 4.8 V(峰峰值),产生的脉冲宽度为 100 ns,脉冲重复频率为 20 kHz,并产生 160 MHz 的上频移。与传统基于单模光纤的 Φ -OTDR 系统不同的是,探测光与本地参考光都经过 1×4 耦合器后分成四路。四路探测光分别经过环形器后通过多芯光纤扇入模块注入到多芯光纤(长度为 2 km),将多芯光纤放置在隔温隔振箱中,以去除环境中温度或声波导致的相位变化引入的噪声。信号在多芯光纤的 4 个纤芯中进行独立传输,各个纤芯中产生的 RBS 信号经多芯光纤扇出模块后通过环形器和四路本振参考光一起通过分光比为 50:50 的 OC 进行拍频,拍频后的信号经过 BPD 进行探测,输出的交流电信号由采集卡进行采集。实验中,BPD 的探测带宽为 800 MHz,采集卡的采样速率为 500 MSa/s。本文采样 8200 个点,即 1.6 km 长的光纤。相位解调后,可以从轨迹中提取振动信息。

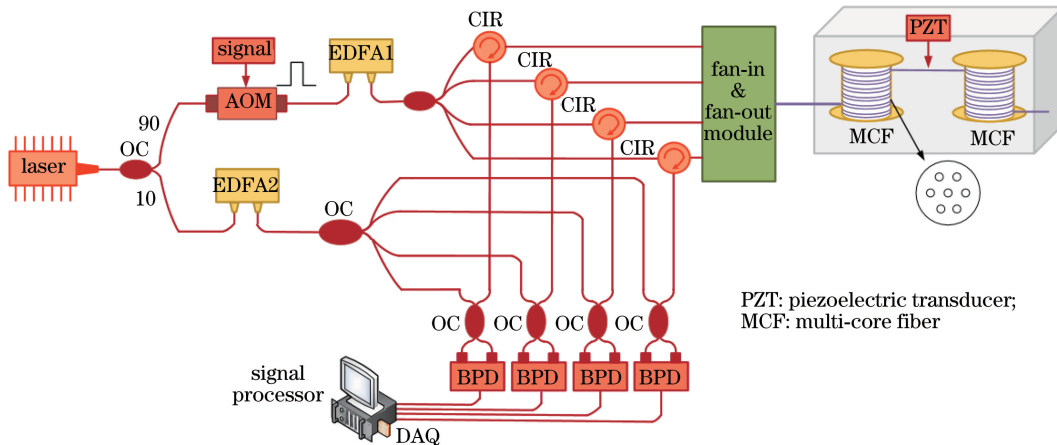


图 4 基于多芯光纤的分布式声传感实验装置图

Fig. 4 Experimental setup of distributed acoustic sensing based on a multi-core fiber

在光传输过程中,为了保证传输能量和信号,必须抑制纤芯间的模式耦合。在一根多芯光纤中同时实现多路光信号的长距离低串扰传输的前提是保证纤芯之间合理的参数排布,使得相邻纤芯被很好地隔开,以减少模场之间的交叠。在实验中,采用的多芯光纤和扇入扇出模块为长飞公司研制的七芯光纤(MCF 7-42/150/250 SM)及七芯光纤扇入扇出模块(FAN-7-42),它们的参数如表 1、2 所示。

表 1 七芯光纤的参数

Parameter	Value
Fiber length	2 km
Wavelength	1550 nm
Attenuation coefficient	0.25 dB/km
Core diameter	7.9 μm
Mode field diameter	9.6 μm
Core spacing	41.5 μm
Crosstalk index (Adjacent core)	-50 dB/100 km

表 2 扇入扇出模块的参数

Table 2 Parameters of the fan-in and fan-out module

Parameter	Value
Average insertion loss @1550 nm	1 dB
Maximum insertion loss @1550 nm	1.5 dB
Crosstalk index (Adjacent core)	-55 dB

3.2 结果与分析

为了与传统的基于单模光纤的 Φ -OTDR 系统进行对比实验,优化了系统硬件性能后,选取了相同长度(2 km)的普通单模光纤,控制其他实验参数不变,保证系统在不产生非线性效应的前提下,通过调节脉冲 EDFA1 增加注入到单模光纤中的光能量。同时,为了模拟外界的扰动信号,手动缠绕了一段大约为几十厘米的多芯光纤在压电陶瓷(PZT)上,给 PZT 施加频率为 1250 Hz、幅度为 1 V(峰峰值)的正弦波信号。图 5 为单个纤芯和四个纤芯信号合并后的差分相位随距离的关系,可以清楚地看出,单个纤芯的信号与传统的单模光纤解调出的信号类似,有非常多的干涉衰落点(表现为相位突变点),导致外界扰动被淹没在衰落点中无法正确识别,影响了系统的可靠性。而通过基于多芯光纤的空间分集技术,四个纤芯信号合并后可抑制信号衰落现象,差分相位都接近为 0,唯一的相位突变位置即 PZT 缠绕的位置,从而可以获得更可靠的外界扰动定位测量。

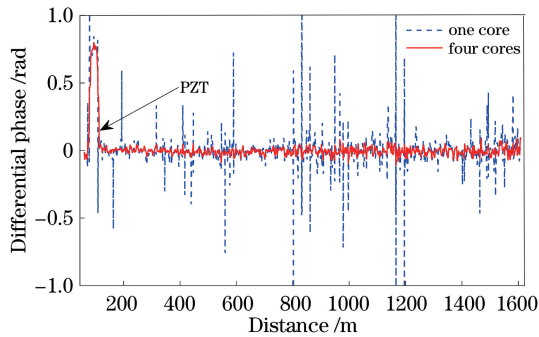


图 5 单个纤芯和四个纤芯信号合并后的差分相位随距离的关系

Fig. 5 Relationship between the differential phase of one core and four cores and distance

通过信号解调和相位解卷绕,如图 6 所示,扰动位置处的差分相位呈现为周期为 16 个采样点的正弦信号,由于本实验中设定的脉冲重复频率为 20 kHz,解调得到的正弦信号的频率与施加到 PZT 上的频率一致,扰动信号被很好地重建。

由于系统的底噪水平在低频处主要受限于激光器的相位噪声,通过分集合并技术提高散射信号的强度对低频处的底噪抑制效果有限,故随机选取

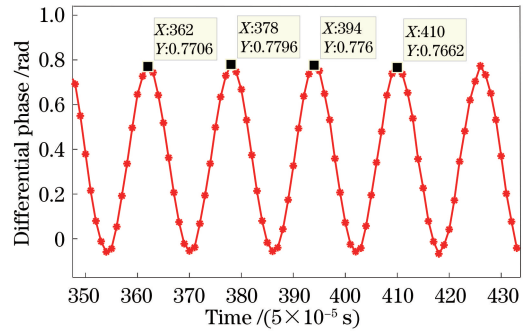


图 6 扰动位置处四个纤芯合并后信号的差分相位

Fig. 6 Differential phase of the aggregated signal in four cores at the disturbance location

2.5 kHz 频率处的功率谱密度函数(PSD)来说明系统的底噪水平。如图 7 所示,在 1.6 km 内,单模光纤存在很多信号衰落点,系统的平均底噪(干扰衰落导致噪声尖峰的位置除外)为 -73.9 dB。多芯光纤(其中一个纤芯)在 2.5 kHz 频率处系统的平均底噪为 -73.2 dB。这是因为多芯光纤中的每个纤芯直径($\sim 7.9 \mu\text{m}$)略小于传统单模光纤的芯径($\sim 9 \mu\text{m}$),模场有效面积小,导致注入光能量略小于单模光纤中的光能量。而多芯光纤中 4 个纤芯分集合并后(图 7 实线所示),衰落噪声得以抑制,信噪比一致性更好,在 2.5 kHz 频率处,系统的平均底噪可达 -79.1 dB。相较于多芯光纤中一个纤芯的结果,系统底噪降低了约 5.9 dB,与理论分析值基本一致($10\log 4 = 6 \text{ dB}$),相较于传统单模光纤,系统底噪降低了 5.2 dB。

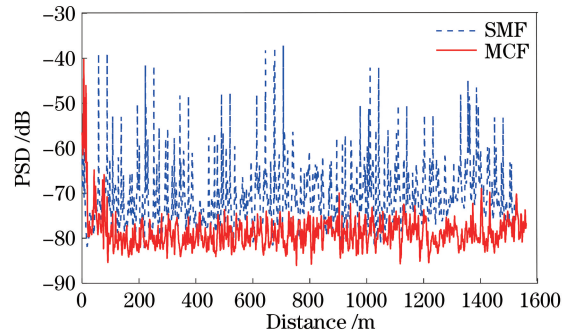


图 7 单模光纤与多芯光纤在 2.5 kHz 频率处的 PSD

Fig. 7 PSD of SMF and MCF at the frequency of 2.5 kHz

图 8 为扰动位置处测量的功率谱密度函数,可以进一步看出,外界扰动信号频率为 1.25 kHz,多芯光纤中多个纤芯信号合并后的结果在保留了振动相位信息的前提下,有效地降低了系统的底噪,最低底噪达 -85 dB。根据 Nyquist 频率极限,实验中设置的脉冲重复频率为 20 kHz,系统带宽可达

10 kHz。此外,为了更好地说明系统的带宽性能,补充了一组 8 kHz 频率的 PZT 扰动测试数据,如图 9 所示。为了便于对比,给出了非扰动位置处的功率谱密度函数,如图 10 所示。在无扰动位置处,4 个纤芯信号合并后系统在低频(200 Hz)处的底噪可达到 -75 dB,频率大于 1 kHz 处底噪均达 -80 dB 以下。

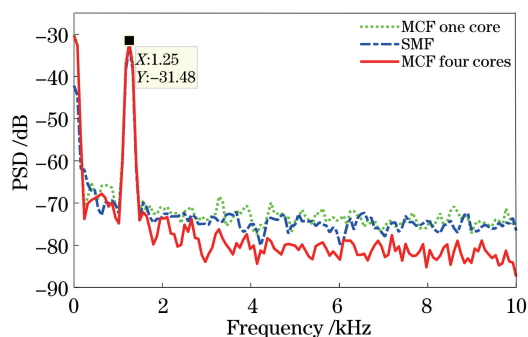


图 8 扰动位置处,单模光纤、多芯光纤中一个纤芯与四个纤芯信号合并后的 PSD

Fig. 8 PSD between SMF, one core and four cores in MCF at the disturbance location

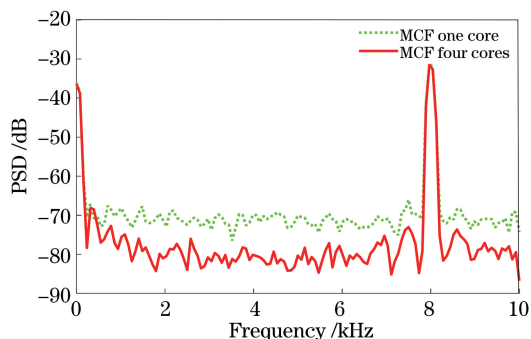


图 9 扰动频率为 8 kHz,多芯光纤中一个纤芯与四个纤芯信号合并后的 PSD

Fig. 9 PSD between one core and four cores in MCF with the 8 kHz disturbance frequency

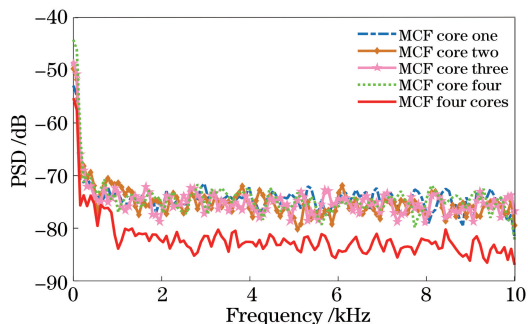


图 10 无扰动处多芯光纤中各个纤芯与四个纤芯信号合并后的 PSD

Fig. 10 PSD between each core and four cores in MCF without disturbance

4 结 论

拓展了多芯光纤在分布式光纤传感领域的应用,利用了多芯光纤具备多个独立传输信道的优势,将其应用于芯间分集,提出了一种新的基于多芯光纤的空间分集技术。通过扇入扇出模块,在多芯光纤的 4 个纤芯中进行信号的独立传输和分集探测,并在信号后处理中对多路信号进行有效合并。实验结果表明,基于多芯光纤的声传感系统克服了单模 DAS 系统性能的限制,有效地抑制了信号衰落,实现了更可靠的外界扰动信号的重构。4 个纤芯信号有效合并后,在不牺牲系统空间分辨率的前提下,系统底噪较优化后单模光纤 DAS 系统降低了 5.2 dB,系统带宽可达 10 kHz,系统最低底噪达 -85 dB。传感系统表现出高水平的性能,无芯间串扰诱发的问题,也不需要校准传感器。多芯光纤独立的空间结构优势使得多芯光纤声传感系统成为一个很有吸引力的研究领域,为实现更高信噪比的声传感系统提供了新的思路。

参 考 文 献

- [1] Yuan L B. Multi-core fiber characteristics and its sensing applications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 170612.
苑立波. 多芯光纤特性及其传感应用[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170612.
- [2] Chi R H, Zhou Y P, Li L Y. Research status and development analysis of multicore fiber amplifier[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(19): 190005.
迟荣华, 周燕萍, 李立亚. 多芯光纤放大器研究现状及发展分析[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(19): 190005.
- [3] Duncan R G, Froggatt M E, Kreger S T, et al. High-accuracy fiber-optic shape sensing [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6530: 65301S.
- [4] Yin G L, Lu L, Zhou L, et al. Distributed directional torsion sensing based on an optical frequency domain reflectometer and a helical multicore fiber[J]. Optics Express, 2020, 28(11): 16140-16150.
- [5] Zhao Z Y, Dang Y L, Tang M, et al. Spatial-division multiplexed hybrid Raman and Brillouin optical time-domain reflectometry based on multi-core fiber[J]. Optics Express, 2016, 24(22): 25111-25118.
- [6] Zhao Z Y, Tang M, Wang L, et al. Distributed vibration sensor based on space-division multiplexed reflectometer and interferometer in multicore fiber

- [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(24): 5764-5772.
- [7] Nakazawa M. Rayleigh backscattering theory for single-mode optical fibers[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1983, 73(9): 1175-1180.
- [8] Healey P. Fading in heterodyne OTDR [J]. *Electronics Letters*, 1984, 20(1): 30-32.
- [9] Gabai H, Shpatz I, Eyal A. Lumped Rayleigh reflectors[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(21): 4529-4532.
- [10] Redding B, Murray M J, Donko A, et al. Low-noise distributed acoustic sensing using enhanced backscattering fiber with ultra-low-loss point reflectors[J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 14638-14647.
- [11] Pan Z Q, Liang K Z, Zhou J, et al. Interference-fading-free phase-demodulated OTDR system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8421: 842129.
- [12] Wang X, Lu B, Wang Z Y, et al. Interference-fading-free Phi-OTDR based on differential phase shift pulsing technology [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(1): 39-42.
- [13] Zhou J, Pan Z Q, Ye Q, et al. Phase demodulation technology using a multi-frequency source for discrimination of interference-fading induced false alarms in a φ -OTDR system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(9): 0905003.
周俊, 潘政清, 叶青, 等. 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[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0905003.
- [14] Zhou J, Pan Z Q, Ye Q, et al. Characteristics and explanations of interference fading of a Φ -OTDR with a multi-frequency source[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(17): 2947-2954.
- [15] Chen D A, Liu Q W, He Z Y. Phase-detection distributed fiber-optic vibration sensor without fading-noise based on time-gated digital OFDR [J]. *Optics Express*, 2017, 25(7): 8315-8325.
- [16] 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(S1): 192-202.
- [17] Liang C L, Lu Y, Zhang X L, et al. Fading noise reduction utilizing multi-wavelength scheme in phase interrogation based phase-sensitive optical time domain reflectometry [C] // 2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), October 26-29, 2018, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2018.
- [18] Ma H Y, Wang X X, Ma F, et al. Research progress of Φ -OTDR distributed optical fiber acoustic sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 130005.
马皓钰, 王夏霄, 马福, 等. Φ -OTDR 型分布式光纤声波传感器研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(13): 130005.
- [19] Cai H W, Ye Q, Wang Z Y, et al. Distributed optical fiber acoustic sensing technology based on coherent Rayleigh scattering [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(5): 050001.
蔡海文, 叶青, 王照勇, 等. 基于相干瑞利散射的分布式光纤声波传感技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(5): 050001.
- [20] Takenaga K, Tanigawa S, Guan N, et al. Reduction of crosstalk by quasi-homogeneous solid multi-core fiber [C] // 2010 Conference on Optical Fiber Communication (OFC/NFOEC), Collocated National Fiber Optic Engineers Conference, March 21-25, 2010, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2010.
- [21] Liu C, Pei L, Xie Y H, et al. Design of low crosstalk few mode multi-core fiber based on heterogeneous structure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1106004.
刘畅, 裴丽, 解宇恒, 等. 异质结构的低串扰少模多芯光纤设计 [J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1106004.
- [22] Gabai H, Eyal A. On the sensitivity of distributed acoustic sensing[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(24): 5648-5651.