

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205516

基于随机数编码的相位敏感光时域反射仪*

尹康¹ 王宇^{1,2} 李沛峰¹ 苏玉文¹ 白清¹ 刘昕¹ 靳宝全¹

(1. 太原理工大学新型传感器与智能控制教育部与山西省重点实验室 太原 030024;

2. 山西省交通科技研发有限公司 太原 030600)

摘要:相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)的传感距离与空间分辨率相互制约,为进一步提升系统性能,提出了光脉冲随机数编码方法,分析了基于编码的相干探测 Φ -OTDR的线性化理论,阐述了随机数编码与解码原理并推导了随机数编码的增益数学模型。实验证明,在1 kHz脉冲重复频率,与40 ns脉冲宽度的条件下,与单脉冲调制的 Φ -OTDR相比,使用128 bit 40 ns脉冲宽度的随机数编码可将传感距离从25 km提升至50.26 km,且在接近尾端处还原的振动信号信噪比可达17.51 dB,能够较好还原振动信号。研究表明随机数编码方法为提升 Φ -OTDR传感性能提供了有效的解决方案。

关键词:光纤传感; Φ -OTDR;传感距离;随机数编码

中图分类号: TP212.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Phase-sensitive OTDR based on random number coding

Yin Kang¹ Wang Yu^{1,2} Li Peifeng¹ Su Yuwen¹ Bai Qing¹ Liu Xin¹ Jin Baoquan¹

(1. Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Shanxi Transportation Technology Research & Development Co., Ltd., Taiyuan 030600, China)

Abstract: The sensing distance and spatial resolution of phase-sensitive optical time domain reflectometer (Φ -OTDR) are mutually restricted. In order to further improve the system performance, a random number coding method of optical pulse is proposed in this paper. The linearization theory analysis of the coherent detection Φ -OTDR based on coding and the principle of random number encoding and decoding are described, and the gain mathematical model of random number encoding is deduced. Experimental results show that compared with the single-pulse equivalent, the sensing distance can be increased from 25 km to 50.26 km by using 128 bit random number code with 40 ns pulse width and 1 kHz pulse repetition frequency, and the signal to noise ratio can reach 17.51 dB at 50.22 km, where the vibration signal can be well restored. The research shows that the random number coding method provides an effective solution for improving the performance of Φ -OTDR.

Keywords: optical fiber sensing; Φ -OTDR; sensing distance; random number coding

0 引言

分布式光纤传感器可以用来测量温度^[1]、振动^[2-3]、应变^[4]等物理参量,近年来被广泛关注。相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)作为一种典型的分布式光纤传感

器,抗电磁干扰、灵敏度高、响应速度快,已广泛应用于油气管道泄漏监测^[5]、火灾报警^[6]、入侵监测^[7-8]、大型建筑结构健康监测^[9-10]、火山状况检测^[11]等领域,具有重要的科研意义和实用价值。

然而单脉冲 Φ -OTDR的传感距离与空间分辨率相互制约,这一问题阻碍了它在长距离高空间分辨率振动测

收稿日期: 2022-05-21 Received Date: 2022-05-21

* 基金项目:国家自然科学基金(62175175)、山西省基础研究计划(202103021222010)、山西省基础研究计划(20210302124599)、山西省重点研发计划(202102130501021)项目资助

量场景中的应用。为了打破它们的制约关系,进一步提升系统性能,研究者们已经提出光脉冲编码技术。光脉冲编码技术通过向待测光纤中注入一定规律的编码脉冲光,并按照一定的解码步骤对后向散射信号进行解码,得到一个信噪比更高的等效单脉冲响应。2020年,北京邮电大学研究人员提出遗传优化码并将其应用于 BOTDA 系统和 ROTDR 系统,其中在 BOTDA 系统中使用 723 位遗传优化码测量的布里渊频移(BFS)频率精度(2.2 MHz)比单脉冲方案 BFS 频率精度(18.9 MHz)提升了 8.59 倍;在 ROTDR 系统中使用 177 bit 遗传优化码,验证了编码方案的温度精度是单脉冲方案的 3.5 倍^[12]。2016年,意大利比萨圣安娜高等学校研究人员将 255 bit 循环码引入直接探测 Φ -OTDR 中,测量超过 5 km 单模光纤,成功还原 500 Hz 的振动信号,并使空间分辨率达到了 5 m,与单脉冲相比,信噪比提高了约 9 dB^[13]。2019年电子科技大学研究人员使用单极性格雷码在 10 km 待测光纤上实现了 92 cm 的空间分辨率^[14]。2020年电子科技大学研究人员将双极性 Golay 码应用于 Φ -OTDR,在 10 km 待测光纤上实现了 0.92 m 的空间分辨率,且由于双极性 Golay 码只有两组,与单极性码相比系统信噪比提升了 7.1 dB,并减少了 1/2 测量时间^[15]。相较于随机数编码的直接互相关解码而言,遗传优化码使用解卷积的解码方式较为复杂。Golay 码需要多次注入编码脉冲序列,不仅占用了大量内存用于存储多组编码脉冲序列的响应信号,而且在实际测量中浪费了大量时间用于编码码字切换操作和译码^[12]。

本文首先从理论上推导了相干探测编码 Φ -OTDR 的线性化方法,其次,介绍了随机数编码的特点,详细阐述了随机数编码的解码过程并对随机数编码的编码增益进行理论分析和实验验证。最后在 1 kHz 脉冲重频与 40 ns 脉宽的条件下,与单脉冲调制的 Φ -OTDR 相比,使用 1 kHz 重频 128 bit 40 ns 脉宽的随机数编码将系统的传感距离从 25 km 提升到 50.26 km,并且解调出的振动信号信噪比可达 17.51 dB。该方法可以有效的提升 Φ -OTDR 性能。

1 基于随机数编码的 Φ -OTDR 理论分析

1.1 相干探测编码 Φ -OTDR 的线性化方法

相干探测 Φ -OTDR 使用窄线宽激光器,以脉冲光为探测光,利用瑞利后向散射(RBS)光的相位变化实现沿光纤链路的信息传感。单个脉冲光产生的 RBS 光可以看作是光纤中脉冲宽度内各散射点散射光的矢量和,可以表示为:

$$R(t) = A_s(t) \exp[i\omega_s t + i\varphi_s + i\varphi(t)] \quad (1)$$

其中, $A_s(t)$ 和 $\varphi(t)$ 分别是 RBS 信号的幅值和相位,

ω_s 是脉冲光的角频率, φ_s 是初始相位, i 是虚数单位。

相干探测 Φ -OTDR 的本振信号可以表示为:

$$E_{LO}(t) = A_l \exp(i\omega_l t + i\varphi_l) \quad (2)$$

其中, A_l 、 ω_l 和 φ_l 分别是本振信号的幅值、角频率和初相位。当移除直流分量并带通滤波后的拍频信号可表示为:

$$I(t) = rA_s(t)A_l \cos[\varphi_d + \varphi(t)] \quad (3)$$

其中, r 是响应系数, $\varphi_d = \varphi_s - \varphi_l$, $A_s(t)$ 和 $\varphi(t)$ 可以通过如下方式获取:

$$\begin{cases} A_s(t) \propto \sqrt{I^2(t) + Q^2(t)} \\ \varphi(t) \approx \text{angle}[I(t) + jQ(t)] - \varphi_d \end{cases} \quad (4)$$

式中: $Q(t)$ 是 $I(t)$ 的正交信号,可通过硬件 IQ 或希尔伯特变换进行解调^[16-17]。

随着温度的变化、激光器的频率漂移等因素的影响, RBS 信号实际上也在缓慢变化,但是对于很短时间内的测量, Φ -OTDR 可以看成是不变的^[18],即在动态测量过程中 Φ -OTDR 可以看成时不变系统。

对于编码 Φ -OTDR,需要将一连串的脉冲注入待测光纤中。假设这些编码序列是 $C = [C_1, C_2, \dots, C_{L+1}]$, $L+1$ 位光脉冲序列的 RBS 信号可以表示为:

$$E(t) = \sum_{p=0}^L C_p \exp(i\omega_s p \tau) R(t - p \tau) = \sum_{p=0}^L C_p A_s(t - p \tau) \exp[i\omega_s t + i\varphi_s + i\varphi(t - p \tau)] \quad (5)$$

在与 LO 进行拍频并移除拍频信号直流分量后得出的拍频信号可以表示为:

$$I_{code}(t) = \sum_{p=0}^L rC_p A_s(t - p \tau) A_l \cos[\Delta\omega t + \varphi_d + \varphi(t - p \tau)] + \sum_{p=0}^{L-1} \sum_{q=p+1}^L 2rC_p C_q A_s(t - p \tau) A_s(t - q \tau) \cos(\varphi_{pq}) \quad (6)$$

其中, $\Delta\omega = \omega_s - \omega_l$, $\varphi_{pq} = \varphi(t - p \tau) - \varphi(t - q \tau)$ 。

式(6)的第 1 项是脉冲内相干的结果,第 2 项是脉冲间相干的结果。由于脉冲间相干会导致相干探测编码 Φ -OTDR 的非线性,因此通过外差探测、带通滤波来消除脉冲间相干造成的负面影响。在带通滤波并降频转换后,拍频信号可以表示为:

$$I_{code}(t) = \sum_{p=0}^L rC_p A_s(t - p \tau) A_l \cos[\varphi_d + \varphi(t - p \tau)] = \sum_{p=0}^L C_p I(t - p \tau) = C * I(t) \quad (7)$$

式(7)表示编码脉冲的系统响应是编码序列与单脉冲响应的卷积,因此通过上述过程可以成功将相干探测编码 Φ -OTDR 线性化,进而解码出单脉冲响应。

1.2 随机数编码的解码原理和增益分析

随机数编码序列是一组“0”、“1”随机分布的序列,当码长较长时,“0”、“1”出现的次数几乎相同。一段码

长为 64 bit,脉宽为 20 ns 的随机数编码序列时域图如图 1(a)所示,可以看到该段序列中的“0”和“1”是随机分布的。本论文使用的 20 Mbit 物理随机数源已通过美国国家标准与技术研究所随机性测试,在 20 Mbit 物理随机数源中选取 150 kbit 随机数,并计算 150 kbit 随机数中“0”、“1”出现的概率,其结果如图 1(b)所示,可以看出“0”、“1”出现的概率都非常接近 0.5。

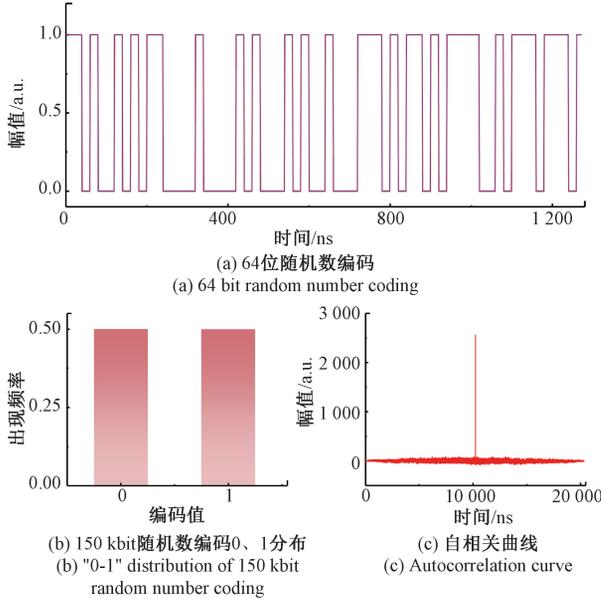


图1 随机数编码序列及其特性

Fig. 1 Random number coding and its properties

除了上述的时域特性以外,随机数编码还具有良好的自相关特性,由式(8)表示:

$$\eta(t) = Q(t) \otimes [Q(t) - \overline{Q(t)}] = \frac{L}{4} \cdot \delta(t) \quad (8)$$

式中: $\eta(t)$ 是旁瓣比较低的类 δ 函数, $Q(t)$ 是随机序列, $\overline{Q(t)}$ 是随机序列的平均值, \otimes 是相关运算, $\delta(t)$ 是冲激函数。图 1(c) 中可以看出此时的 $\eta(t)$ 旁瓣噪声很低,可以近似看成是冲激函数。低旁瓣的 $\eta(t)$ 函数是实现编码 Φ -OTDR 的重要基础。

对于 Φ -OTDR 传感系统,光纤中的 RBS 信号 $f(t)$ 可以表示为探测光信号 $Q(t)$ 和传感系统冲激响应 $P(t)$ 的卷积,如式(9)所示:

$$f(t) = Q(t) * P(t) \quad (9)$$

式中: $*$ 为卷积运算。对于随机数编码的解码运算,可由式(10)得出:

$$\begin{aligned} S(t) &= f(t) \otimes [Q(t) - \overline{Q(t)}] = \\ &P(t) * Q(t) \otimes [Q(t) - \overline{Q(t)}] = \\ &P(t) * \frac{L}{4} \cdot \delta(t) = \frac{L}{4} P(t) \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $S(t)$ 是解码后的信号。

当系统存在噪声 $e(t)$ 时,随机序列 $P(t)$ 所对应的系统响应 $f(t)$ 可表示为:

$$f(t) = Q(t) * P(t) + e(t) \quad (11)$$

式中: $*$ 为卷积运算, $P(t)$ 为单脉冲响应。假设解码所得的单脉冲响应估计值表示为 $\hat{P}(t)$, 如式(12)所示:

$$\hat{P}(t) = \frac{4}{L} S(t) = \frac{4}{L} f(t) \otimes [Q(t) - \overline{Q(t)}] \quad (12)$$

将式(9)代入(12)中并化简,所得结果如式(13)所示:

$$\begin{aligned} \hat{P}(t) &= \frac{4}{L} \cdot (Q(t) * P(t) + e(t)) \otimes [Q(t) - \overline{Q(t)}] = \\ &P(t) + \frac{4}{L} \cdot e(t) \otimes [Q(t) - \overline{Q(t)}] \end{aligned} \quad (13)$$

假设噪声呈均值为 0, 方差为 σ^2 的正态分布,则可以得出解码后的单脉冲响应估计值和理论值之差为:

$$E[\hat{P}(t) - P(t)]^2 = \frac{2}{L} \sigma^2 \quad (14)$$

则采用随机编码序列时系统的编码增益为:

$$G = \sqrt{\frac{\sigma^2 / \frac{2\sigma^2}{L}}{\sigma^2}} = \frac{\sqrt{2L}}{2} \quad (15)$$

2 编码 Φ -OTDR 实验研究

2.1 实验装置

本文的编码 Φ -OTDR 的实验结构如图 2 所示。使用线宽为 100 Hz 的超窄线宽激光器输出 1 550 nm 波长的连续光,经过 99 : 1 的光纤耦合器被分为探测光和本振光。随后,任意波形发生器(AWG)产生单脉冲或随机数编码以驱动移频为 200 MHz 的声光调制器(AOM),同时发出触发信号到 500 MSPS 数据采集卡(DAQ)上。AOM 将探测光调制成脉冲光,之后利用掺铒光纤放大器(EDFA)增强探测脉冲的光功率,以增加系统的传感距离。探测脉冲光从环形器输入待测光纤(FUT) FUT1 和 FUT2,在 FUT1 和 FUT2 中间放置压电陶瓷(PZT)以模拟施加在光纤上的振动信号。探测脉冲光进入待测光纤产生的 RBS 信号通过环形器返回,并与本振光相干后,利用带宽为 350 MHz 的平衡光电探测器(BPD)实现了光信号到电信号的转换。DAQ 采集 BPD 输出的电信号,并将其传输到上位机(PC)中以进一步解调和显示。

2.2 随机数编码脉冲光特性

随机数编码具有良好的自相关特性,实验使用的随机数编码位数为 128 bit,每个码元的宽度是 40 ns,为了确认经过 AOM 调制生成的编码脉冲光和经过 EDFA 放大后的编码脉冲光是否符合上述特性,分别将 AOM 输出

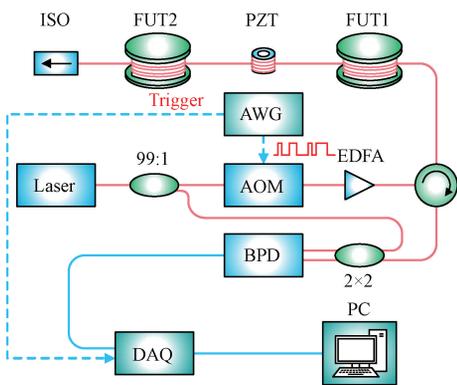


图 2 编码 Φ -OTDR 的实验结构

Fig. 2 Experiment structure of encoding Φ -OTDR

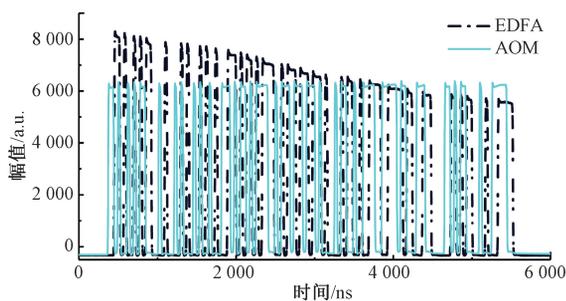
的编码脉冲光和经过 EDFA 放大后的编码脉冲光转化为电信号后进行采集和自相关运算,得到的结果分别如图 3(a)和(b)所示。其中图 3(a)中的实线是 AOM 输出的编码脉冲光信号,可以看到经过 AOM 输出的光功率较为平坦,无畸变现象。图 3(a)中的虚线是 EDFA 输出的放大后的编码脉冲光信号,因为 EDFA 的瞬态效应导致编码脉冲光光功率下降明显。图 3(b)中的虚线是 AOM 输出的编码脉冲光信号自相关结果,AOM 输出的编码脉冲光信号自相关特性的测试结果还是比较好的。图 3(b)中的实线是 EDFA 输出的放大后的编码脉冲光信号自相关结果,虽然 EDFA 输出的放大后的编码脉冲光信号畸变明显,但是其自相关测试结果和 AOM 自相关结果类似,符合类 δ 函数。

2.3 单脉冲和编码 Φ -OTDR 对比实验

为了分析单脉冲和编码 Φ -OTDR 的性能差异,从信噪比和传感距离方面进行测试。

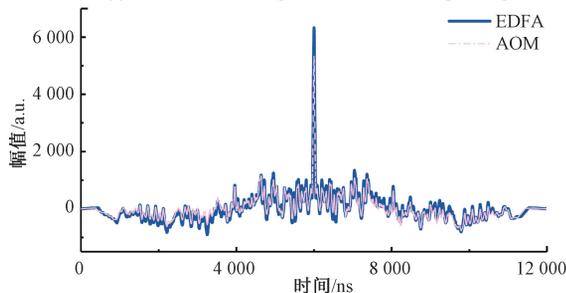
首先进行信噪比分析,保证随机数编码单个码元的峰值光功率和单脉冲的峰值光功率相同,脉冲宽度为 40 ns,且重频均为 4 kHz 的情况下,分别将 128 bit 的随机数编码脉冲光和单脉冲光注入待测光纤。FUT1 的长度为 20 km,FUT2 的长度为 50 m。

实验所得沿待测光纤 RBS 信号强度曲线的上包络如图 4 所示,其中①是单次随机数编码系统响应的上包络,其光纤末端 SNR 为 26.26 dB;②是单次单脉冲系统响应的上包络,其光纤末端 SNR 为 10.08 dB,即 128 bit 随机数编码的实际增益为 16.18 dB。当编码长度 L 为 128 时可以得出其理论编码增益为 $20\lg(\sqrt{2} \cdot 128/2) = 18.06$ dB。因为受到 EDFA 放大时瞬态效应的影响,实际编码增益略低于理论值。图 4 中同时展示了累加平均实验结果,其中③是单脉冲系统响应的上包络累加平均 1 722 次的实验结果,④是随机数编码系统响应的上包络累加平均 1 722 次的实验结果。实验使用的待测光纤长



(a) 编码脉冲光时域信号对比

(a) The time-domain signal contrast of coded pulse light



(b) 编码脉冲光自相关信号对比

(b) The autocorrelation signal contrast of coded pulse light

图 3 EDFA 和 AOM 输出的编码脉冲光特性对比

Fig. 3 The characteristics contrast of coded pulse light after the output of EDFA and AOM

度为 20.05 km,故图 4 中 20.05 km 后的信号为噪声信号,累加平均处理虽然能够有效降低系统噪声的方差,但是对系统 SNR 提升效果不明显。理论上经过 1 722 次平均的信号其 SNR 相较于原始信号可提升 16.18 dB ($10\lg\sqrt{1722} = 16.18$ dB)。而实验结果表明,即使经 1 722 次累加平均处理,单脉冲实验结果 SNR 仍没有明显提升,与采用 128 bit 随机数编码实验得到的 16.18 dB 的 SNR 提升差异显著。

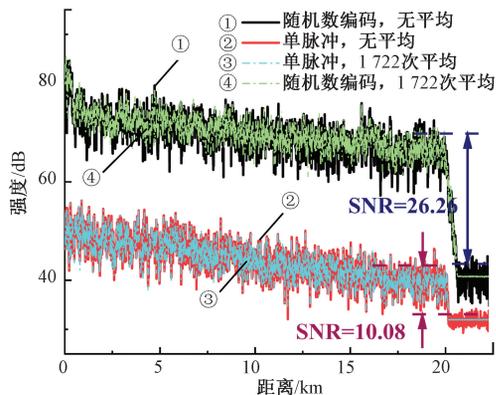


图 4 20.05 km 单脉冲和随机数编码的待测光纤强度曲线

Fig. 4 Intensity trace along the 20.05 km FUT of single pulse and random number coding

在 PZT 上施加幅值为 2 V, 频率为 100 Hz 的正弦信号, 解调结果如图 5 所示, 其中 5(a) 和 (c) 分别是向待测光纤中注入单脉冲后还原的振动波形及其功率谱密度 (PSD), 5(b) 和 (d) 分别是向待测光纤中注入随机数编码后还原的振动波形及其 PSD, 可以看出基于随机数编码的编码 Φ -OTDR 还原的振动波形信噪比比单脉冲还原的振动波形高 7.3 dB。

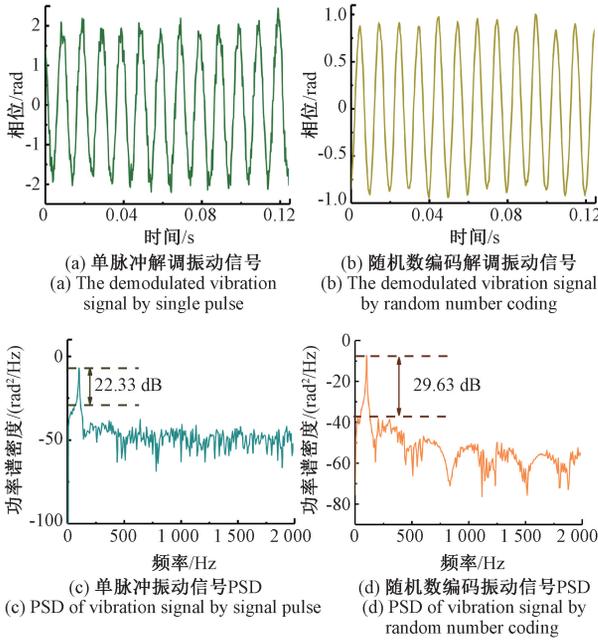


图 5 20 km 处单脉冲和随机数编码解调振动实验结果对比
Fig. 5 The contrast of vibration test results by single pulse and random number coding at 20 km

将 FUT1 的长度提升分别到 25 和 30 km, FUT2 长度保持 50 m 不变, 分时向光纤中注入 1 kHz 重频, 40 ns 脉宽的单脉冲和 1 kHz 重频, 128 bit 码长, 40 ns 脉宽的随机数编码, 对比光纤末端的强度信噪比。从图 6 中可以看出 25 km 时随机数编码比单脉冲的光纤末端信噪比提升了 16.13 dB, 30 km 时随机数编码比单脉冲的光纤末端信噪比提升了 16.98 dB。当待测光纤长度提升到 30 km 后单脉冲末端信号强度信噪比只有 4.09 dB, 此时已无法正常解调光纤末端的振动信号。

在 PZT 上施加幅值为 2 V, 频率为 100 Hz 的正弦信号, 分别向待测光纤中注入 1 kHz 重频, 40 ns 脉宽的单脉冲和 1 kHz 重频, 40 ns 脉宽, 128 bit 随机数编码, 图 7(a) 是向待测光纤中注入单脉冲后还原的振动信号相位, 图 7(b) 是向待测光纤中注入随机数编码后还原的振动信号相位, 可以看到随机数编码成功还原了 30 km 处的振动信号, 而单脉冲完全无法还原 30 km 处的振动信号。

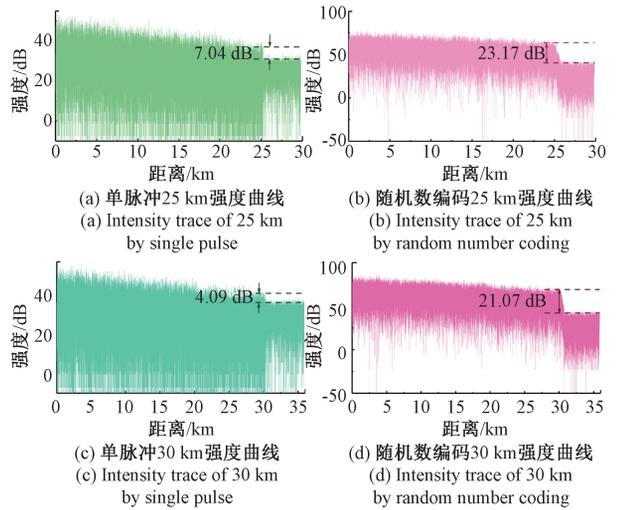


图 6 25 和 30 km 单脉冲和随机数编码的待测光纤强度
Fig. 6 Intensity trace along the 25 and 30 km FUT of single pulse and random number coding

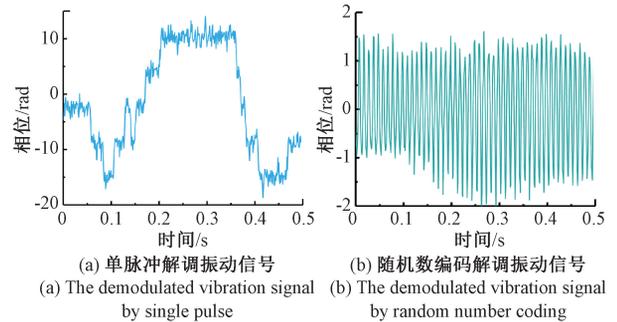


图 7 单脉冲和随机数编码还原 30 km 处的振动信号
Fig. 7 The vibration signal at 30 km was restored by single pulse and random number coding

2.4 长距离传感实验测试

为了测试 128 bit 码长, 40 ns 脉宽的随机数编码 Φ -OTDR 最远传感距离, 将重频保持 1 kHz 不变, 待测光纤 FUT1 的距离增加到 50.22 km, 待测光纤 FUT2 的距离保持 50 m 不变, 在 PZT 上施加幅值为 2 V, 频率为 100 Hz 的正弦信号, 得到的待测光纤末端强度如图 8(a) 所示, 振动信号波形及其 PSD 如图 8(b) 和 (c) 所示。当待测光纤长度为 50.27 km 时, 待测光纤末端的 RBS 信号强度信噪比也仍然有 12.7 dB, 且可以正常还原施加在 50.22 km 处的振动信号相位, 还原的振动信号信噪比达到了 17.51 dB。

3 结 论

为了提升相干探测 Φ -OTDR 的传感距离, 本文将随

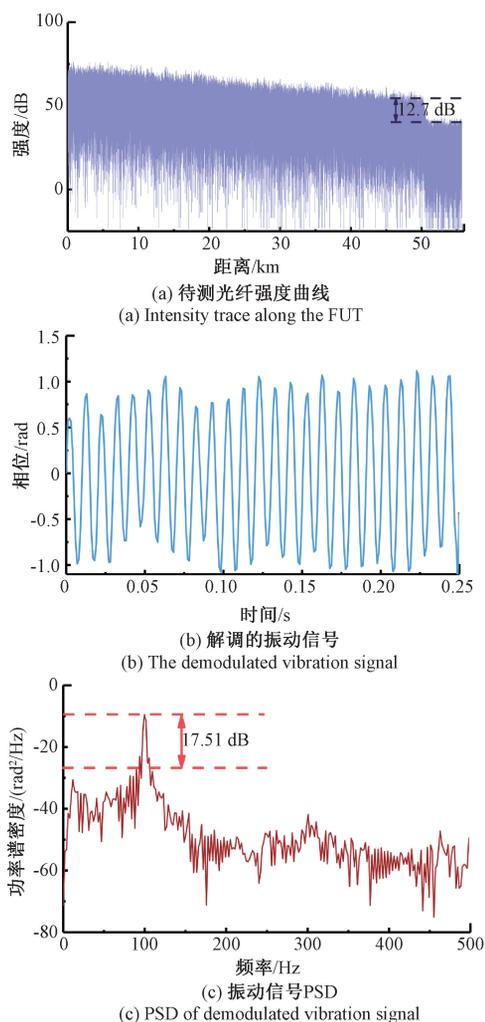


图 8 50.22 km 待测光纤处随机数编码实验结果

Fig. 8 The experiment results of random number coding at 50.22 km FUT

机数编码引入了相干探测 Φ -OTDR, 并分析了编码 Φ -OTDR 的线性化和随机数编码的特征。解码过程和编码增益。本文通过实验验证了基于随机数编码的编码 Φ -OTDR 可以提升系统信噪比。此外通过长距离传感实验测试, 相较于 1 kHz 重频, 40 ns 脉宽的单脉冲, 采用 1 kHz 重频, 128 bit 40 ns 脉宽的随机数编码可将振动信号还原距离从 25 km 提升到 50.26 km, 并且 50.22 km 处还原的振动信号信噪比达到了 17.51 dB。该编码方式已在 BOTDR 系统中进行了应用, 而在 BOTDA、ROTDR 等系统中进行应用则同样需要解决系统线性化等问题。后续可以将模式识别等方法引入 Φ -OTDR, 以在随机数编码 Φ -OTDR 还原振动信号相位的基础上, 准确识别振动事件。

参考文献

[1] 吴飞龙, 郑小莉, 李永倩. BOTDA 光纤传感技术在电

力电缆测温中的应用探讨[J]. 光通信技术, 2013, 37(2): 21-24.

WU L F, ZHEN X L, LI Y Q. Application investigation of BOTDA technology in power cable temperature monitoring [J]. Optical Communication Technology, 2013, 37(2): 21-24.

[2] 李培鸿, 王宇, 张建国, 等. 萨格奈克光纤振动传感系统的 FPGA 实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(11): 125-131.

LI P H, WANG Y, ZHANG J G, et al. Sagnac optical fiber vibration sensing system using FPGA technology [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(11): 125-131.

[3] 郑来芳, 张俊生, 梁海坚, 等. 基于时频混合特征提取算法的光纤传感信号识别研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9): 153-159.

ZHENG L F, ZHANG J SH, LIANG H J, et al. Time-frequency domain based hybrid feature extraction algorithm for fiber optic sensing events recognition [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(9): 153-159.

[4] 高明, 赵振刚, 李英娜, 等. 基于光纤传感的输电线路杆塔倾斜监测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(12): 51-59.

GAO M, ZHAO ZH G, LI Y N, et al. Monitoring and research on tilt of transmission line tower based on optical fiber sensing [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(12): 51-59.

[5] TEJEDOR J, MACIAS-GUARASA J, MARTINS H F, et al. A novel fiber optic based surveillance system for prevention of pipeline integrity threats [J]. Sensors, 2017, 17(2): 355.

[6] DOUGLAS C, CHRISTINE H, SCOTT T, et al. Use of distributed temperature sensing technology to characterize fire behavior [J]. Sensors, 2016, 16(10): 1712.

[7] 王鹏飞, 董齐, 刘昕, 等. 基于 Φ -OTDR 的煤层气管线外界入侵振动检测系统 [J]. 传感技术学报, 2019, 32(1): 144-149.

WANG P F, DONG Q, LIU X, et al. Coalbed methane transport pipeline intrusion detection system based on Φ -OTDR [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(1): 144-149.

[8] 胡泽, 崔源, 葛亮, 等. 分布式光纤的沙漠埋地油气管道入侵信号识别 [J]. 电子测量技术, 2021, 44(17): 93-100.

HU Z, CUI Y, GE L, et al. Distributed fiber optics for intrusion signal identification of desert buried oil and gas pipelines [J]. Electronic Measurement Technology,

- 2021, 44(17): 93-100.
- [9] KOWARIK S, HUSSELS T, CHRUSCICKI S, et al. Fiber optic train monitoring with distributed acoustic sensing: Conventional and neural network data analysis [J]. Sensors, 2020, 20(2): 450.
- [10] BARRIAS A, CASAS R, VILLALBA S. A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications[J]. Sensors, 2016, 16(5): 748.
- [11] PHILIPPE J, GILDA C, BENJAMIN S, et al. Fibre optic distributed acoustic sensing of volcanic events[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 1753.
- [12] SUN X Z, YANG Z S, HONG X B, et al. Genetic-optimised aperiodic code for distributed optical fibre sensors [J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 5774.
- [13] MUANENDA Y, OTON C J, FARALLI S, et al. A cost-effective distributed acoustic sensor using a commercial off-the-shelf DFB laser and direct detection phase-OTDR[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 1-10.
- [14] WANG Z, ZHANG B, JI X, et al. Distributed acoustic sensing based on pulse-coding phase-sensitive OTDR[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(4): 6117-6124.
- [15] WANG Z, WU Y, XIONG J, et al. Bipolar-coding ϕ -OTDR with interference fading elimination and frequency drift compensation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(21): 6121-6128.
- [16] ZHANG X, SUN Z, SHAN Y, et al. A High performance distributed optical fiber sensor based on Φ -

OTDR for dynamic strain measurement [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 6802412.

- [17] WANG Z, ZHANG L, WANG S, et al. Coherent Φ -OTDR based on I/Q demodulation and homodyne detection [J]. Optics Express, 2016, 24(2): 853-858.
- [18] LIKUMOVICH L, USHAKOV N, KOTOV O, et al. Fundamentals of optical fiber sensing schemes based on coherent optical time domain reflectometry: Signal model under static fiber conditions [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(17): 3660-3671.

作者简介



尹康, 2020 年于东北大学获得学士学位, 现为太原理工大学硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感器。

E-mail: 1466300955@qq.com

Yin Kang received his B. Sc. degree in 2020 from Northeastern University. Now he is a M. Sc. candidate in Taiyuan University of Technology. His main research interest includes fiber optic sensors.



王宇 (通信作者), 2014 年于塞吉-蓬图瓦兹大学获得博士学位, 现为太原理工大学副教授, 主要研究方向为光纤传感器。

E-mail: wangyu@tyut.edu.cn

Wang Yu (Corresponding author) received his Ph. D. degree in 2014 from Cergy-Pontoise University. Now he is an associate professor in Taiyuan University of Technology. His main research interest includes fiber optic sensors.