

光纤分布式声传感的动态范围扩展方法研究

马喆^{1,2**}, 王逸璇¹, 江俊峰^{1*}, 王双¹, 张建德³, 杨宁³, 徐天华¹, 丁振扬¹, 刘铁根¹

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室,

天津大学光纤传感研究所天津市光纤传感工程中心, 天津 300072;

²太原理工大学物理与光电工程学院新型传感器与智能控制教育部与山西省重点实验室, 山西 太原 030024;

³山东航天电子技术研究所, 山东 烟台 264000

摘要 提出一种基于线性调频(LFM)脉冲边带调制的光纤分布式传感动态应变范围扩展方法, 基于调频带宽与相干时域信号包络平移量之间的反比特性, 通过在单脉冲内产生具备不同调频带宽的多调制边带进行传感, 对各边带的相干时域信号进行数字带通滤波和分解, 以实现对不同动态应变范围事件的同时测量。实验中分别使用调频带宽为 40 MHz 和 200 MHz 的 LFM 信号对边带进行调制, 结果表明系统可以同时测量最大幅值为 7 ne 和 350 ne 的正弦动态应变事件, 这为光纤分布式声传感系统提供一种动态范围拓展方案。

关键词 光纤光学; 光纤分布式声传感; 线性调频脉冲; 边带调制; 动态范围

中图分类号 TP212

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1306008

Research on Dynamic Range Expansion Method of Fiber-Optic Distributed Acoustic Sensing

Ma Zhe^{1,2**}, Wang Yixuan¹, Jiang Junfeng^{1*}, Wang Shuang¹, Zhang Jiande³,
Yang Ning³, Xu Tianhua¹, Ding Zhenyang¹, Liu Tiegeng¹

¹Tianjin Optical Fiber Sensing Engineering Center, Institute of Optical Fiber Sensing of Tianjin University,
Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Ministry of Education,

School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education and Shanxi Province,
College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

³Shandong Institute of Aerospace Electronic Technology, Yantai, Shandong 264000, China

Abstract A method is proposed to extend the dynamic strain range of fiber-optic distributed sensing based on linear frequency modulation (LFM) pulse sideband modulation. Based on inverse ratio between the frequency-modulated bandwidth and the coherent time-domain signal envelope shift, multiple modulated sidebands with different frequency-modulated bandwidths are generated in a single pulse for sensing. Coherent time-domain signals of each sideband are digitally band-pass filtered and decomposed to achieve simultaneous measurements of events with different dynamic strain ranges. LFM signals with frequency modulated bandwidths of 40 MHz and 200 MHz are used to modulate sidebands in experiments, respectively. The results show that the system can simultaneously measure the maximum amplitude of 7 ne and 350 ne sinusoidal dynamic strain events, which provides a dynamic range expansion scheme for fiber-optic distributed acoustic sensor system.

Key words fiber optics; fiber-optic distributed acoustic sensing; linear frequency modulation pulse; sideband

收稿日期: 2021-03-15; 修回日期: 2021-04-17; 录用日期: 2021-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(61735011, 61675152)、科技部重大科学仪器开发专项(2013YQ030915)、载人四期预研项目、天津市高层次创新创业团队人才发展特支计划、天津 131 创新人才第一层次培养计划

通信作者: *jiangjfxu@tju.edu.cn; **mazhe315@tju.edu.cn

modulation; dynamic range

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.2630

1 引言

光纤分布式声传感(DAS)技术可沿整个光纤链路长度提取声事件的连续空间分布,在地质活动监测^[1-2]、石油勘探开采^[3-4]和轨道交通监测^[5-7]等领域有着重要的应用和发展前景。其中,基于相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)^[8-12]的 DAS 系统是一种重要的基于瑞利散射的动态光纤传感技术,该技术通过相位解调出声致光纤应变进而实现对待测声事件的波形重构。然而,由于待测声振信号被调制成为光学相位,DAS 解调的相位信息往往缠绕在 $(-\pi, \pi]$ 之间,通常只有在相邻轨迹之间的相位变化绝对值小于 π 时使用相位展开算法才有效。因此,常见的相位解调方案如 3×3 耦合器解调法^[13]、相位生成载波调制法^[14]和 I/Q 解调法^[15]等对于不同动态范围事件的同时测量将受到约束。线性频率调制(LFM)是一种综合连续波形和脉冲波形优势的扩频调制技术,被广泛应用于雷达、激光雷达的距离和速度测量^[16-17],近年来这项技术陆续被研究人员引入到 DAS 中。Zhou 等^[18]研究了基于激光步进调谐系列脉冲的分布式振动和应变测量方法,实现了对 490 ne 和 1 kHz 振动的测量,系列脉冲的激光步进调谐使得测量时间相对较长。Yuan 等^[19]利用二次差分计算对激光频率漂移的影响进行补偿,实现了 5.9 ne 的应变测量分辨率。Chen 等^[20]基于时间门控光频域反射技术实现了 14.7 ne 峰峰值的应变测量。Zhang 等^[21]使用频率调制脉冲法通过向光纤中注入啁啾脉冲实现了峰峰值为 130 $\mu\epsilon$ 的动态应变信号的提取。Bhatta 等^[22]通过中值滤波消除解调结果中的大噪声尖峰,利用啁啾脉冲探测系统在步进叠加应变的基础上实现了 1190 $\mu\epsilon$ 峰峰值的正弦应变波形测量。上述研究主要针对单一振幅的应变进行探测研究,即只关注动态应变分辨率,或者只关注应变的动态范围。然而在实际应用中光纤沿线声事件引起的光纤应变范围可能相差较大,为了保证波形的不失真恢复,既需要高灵敏度应变分辨率,也需要大动态范围,因此同时平衡这两方面的要求非常关键。

本文针对上述问题,充分利用数字边带调制的灵活性,提出动态范围扩展的异构 LFM 边带调

制的 DAS 方法。在不增加 DAS 系统复杂程度的前提下,通过注入异构 LFM 边带的单脉冲,即在不同边带采用不同的 LFM 参数,进而可实现对不同幅值动态应变的高分辨率和大动态范围的同时测量。实验中使用带宽为 40 MHz 和 200 MHz 的 LFM 信号进行单脉冲异构边带调制,实现了对最大幅值为 7 ne 和 350 ne 正弦动态应变事件传感的同时测量。

2 传感系统与原理

动态范围扩展的分布式光纤传感实验系统结构如图 1(a)所示,窄线宽激光器发出的连续光波(CW)作为光源被耦合器分成两路,一路作为探测光,另一路作为参考光。使用任意波形发生器(AWG)和双平行马赫-曾德尔调制器(DPMZM)将探测光调制成为异构多边带 LFM 脉冲作为探测光脉冲,经过掺铒光纤放大器(EDFA)放大且使用光滤波器滤除自发辐射噪声后,通过光环行器注入传感光纤中。探测光脉冲在传感光纤中传输产生的后向瑞利散射(RBS)光通过光环行器返回,与本地参考光进行合束干涉,干涉信号由平衡光电探测器(BPD)接收后转换成电信号,利用数字带通滤波对不同边带信号分离并进行相位解调,即可得到光纤沿线的 RBS 光相位变化信息。LFM 边带调制脉冲示意图如图 1(b)所示,单个脉冲内包含不同线性调频范围的多个边带调制信号,每个 LFM 边带的起止频率均不发生重叠。

给 DPMZM 的两个子调制器分别加载同相驱动电压 $V_1(t)$ 和正交驱动电压 $V_Q(t)$,即

$$V_1(t) = V_D \sum_j \cos\left(2\pi f_{\text{start}}^j t + \pi \frac{f_{\text{end}}^j - f_{\text{start}}^j}{T} t^2\right), \quad (1)$$

$$V_Q(t) = -V_D \sum_j \sin\left(2\pi f_{\text{start}}^j t + \pi \frac{f_{\text{end}}^j - f_{\text{start}}^j}{T} t^2\right), \quad (2)$$

式中, V_D 是调制电压信号的振幅, f_{start}^j 表示第 j 个 LFM 脉冲边带的调制起始频率, f_{end}^j 表示第 j 个 LFM 脉冲边带的调制截止频率。每个线性调频边带的干涉输出 I_{coherent} 是每个离散散射单元的 RBS 光与参考光 $E_{\text{LO}} \cdot \exp(j2\pi f_0 t)$ 的干涉叠加之和,可表示为^[23]

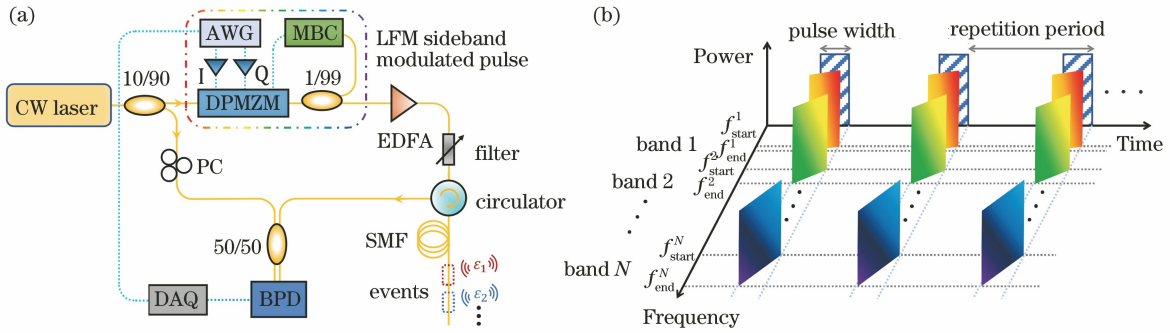


图 1 实验系统示意图。(a) 动态范围扩展的分布式光纤传感实验装置；(b) LFM 边带调制脉冲示意图
 Fig. 1 Schematic diagrams of experimental system. (a) Dynamic range extended distributed optical-fiber sensing experimental device; (b) Schematic diagram of LFM sideband modulation pulse

$$I_{\text{coherent}} = 2E_{\text{LO}} \cdot \exp(j2\pi f_0 t) \sum_{i=1}^n \rho_i \cos \Phi_i, \quad (3)$$

$$\Phi_i = \varphi_i + \varphi_0 = \frac{4\pi(f_i - f_1) \cdot n \cdot (z_i - z_1)}{c} = \frac{4\pi(f_i - f_1)}{c} L_{\text{OPD}_i}, \quad (4)$$

式中, E_{LO} 表示参考光的振幅, f_0 代表相干激光的光学频率, ρ_i 表示光纤中第 i 个离散单元的散射系数。 φ_0 表示探测脉冲当前位置的公共相位, 对于特定待测位置其为一个常数。 n 表示光纤的折射率, c 表示光在真空中的速度。 f_i 和 L_{OPD_i} 分别表示第 i 个离散散射单元对应瞬时频移和光程差 (OPD)。 由应变引起的光纤 OPD 变化可通过频率变化 Δf 来补偿,

$$\Delta f / f_0 = \Delta L_{\text{OPD}} / L_{\text{OPD}} = K_\epsilon \cdot \epsilon, \quad (5)$$

式中, f_0 为激光载频, K_ϵ 表示应变系数, ϵ 表示应

变值。 单个 LFM 脉冲的光纤 DAS 离散理论模型示意图如图 2 所示, 当光纤中某个位置的应变发生变化时, 相应位置处的干涉图样发生横向移动 Δt_j 。 线性调频光脉冲中的频率变化 Δf 与时移 Δt_j 的关系为

$$\Delta f = \mu_j \cdot \Delta t_j, \quad (6)$$

式中, μ_j 代表第 j 个 LFM 脉冲边带调制斜率, $\mu_j = B_j / T = \pm |B_j| / T$, $B_j = f_{\text{end}}^j - f_{\text{start}}^j$, T 表示脉冲宽度。 因此, 由 (5) 式和 (6) 式可得干涉图样横向移动 Δt_j 与应变 ϵ 的关系为

$$\Delta t_j = \pm \frac{K_\epsilon T f_0}{|B_j|} \cdot \epsilon, \quad (7)$$

当在单个脉冲内调制多个具有不同调频带宽 $|B_j|$ 的异构线性调频边带脉冲时, 可以实现对单个脉冲内不同应变灵敏度的同时探测。 采样后使用数

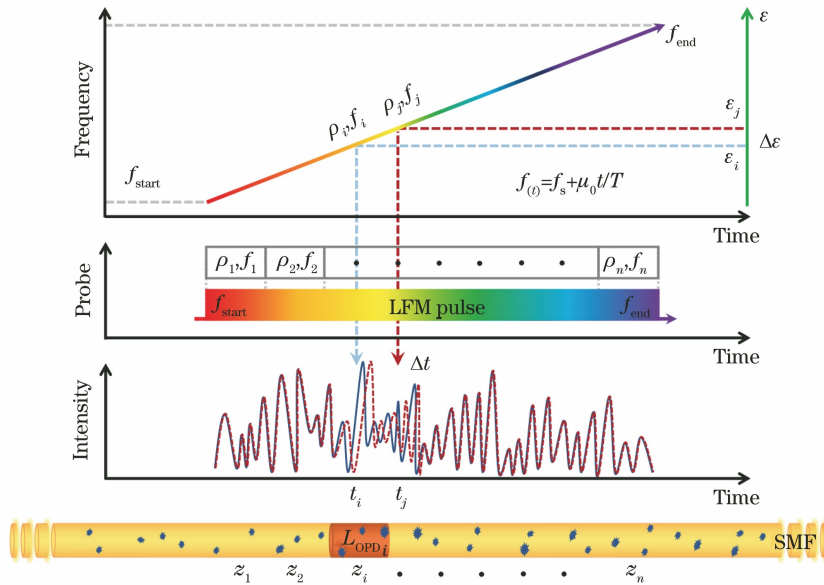


图 2 LFM 脉冲的 DAS 离散理论模型

Fig. 2 Discrete theoretical model of LFM pulse DAS

字带滤波的方法分别对各边带信号进行滤波和滑动窗互相关处理^[24],解调出各边带测量结果。对应较大调频带宽边带的相干时域信号包络的应变灵敏度较低,用于大动态应变事件的测量;对应较小调频带宽边带的相干时域信号包络则反之,从而可实现对单次注入探测脉冲不同幅度应变事件的同时测量。

3 仿真与实验结果分析

3.1 相干时域信号及包络特征数值仿真分析

对调频带宽为 40 MHz(线性调频范围为 480~520 MHz)和 200 MHz(线性调频范围为 400~600 MHz)的脉冲进行相干探测仿真,图 3(a)和

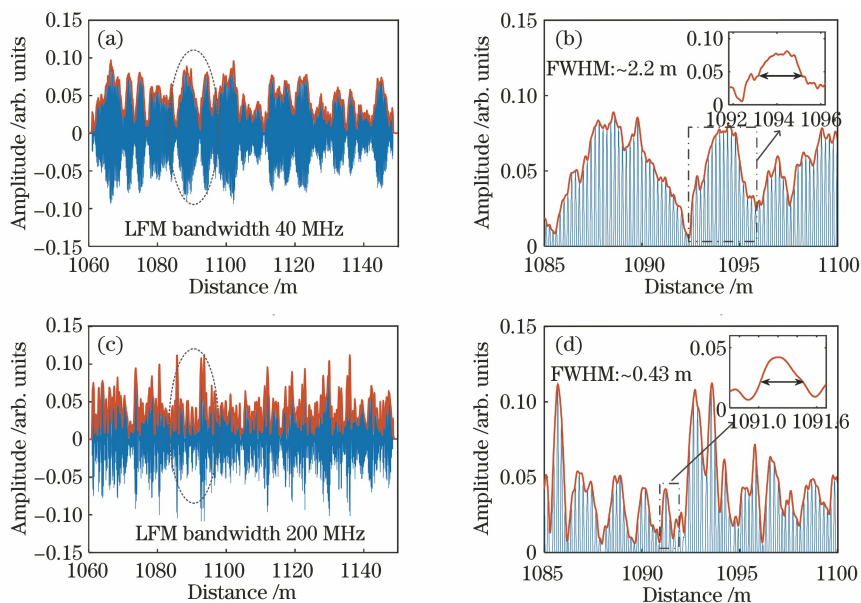


图 3 相干时域信号及包络的仿真结果。(a) 40 MHz 调频带宽整体展示;(b) 40 MHz 调频带宽局部展示;

(c) 200 MHz 调频带宽整体展示;(d) 200 MHz 调频带宽局部展示,(b)和(d)分别对应于(a)和(c)中的虚线椭圆部分

Fig. 3 Coherent time domain signal and envelope simulation results. (a) 40 MHz frequency-modulated bandwidth overall display; (b) 40 MHz frequency-modulated bandwidth local display; (c) 200 MHz frequency-modulated bandwidth overall display; (d) 200 MHz frequency-modulated bandwidth local display, (b) and (d) correspond to dotted ellipse parts in (a) and (c), respectively

3.2 实验研究与分析

按照图 1(a)搭建实验系统并开展实验研究。所用窄线宽激光器的线宽为 3 kHz、中心波长为 1559.72 nm。在实验中使用线性调频带宽分别为 40、120、200、400 MHz,脉冲宽度为 100 ns,重复周期为 20 ms 的单个 LFM 脉冲开展实验,使用实时示波器进行相干时域信号的采集。图 4 为调频带宽从 40 MHz 逐渐增大到 400 MHz 的相干时域信号及其包络,随着 LFM 脉冲调频带宽的不断增大,相干时域信号包络的 FWHM 变窄,与仿真结果呈现相同的特征。值得注意的是,当调频带宽增大到一

图 3(c)所示为 1060~1150 m 位置的相干时域信号及其包络。可以发现,调频带宽为 40 MHz 的相干时域信号包络比调频带宽为 200 MHz 的包络要宽,由于部分信号重叠导致不同位置的包络产生差异。对 1085~1110 m 区域进行分析,选择各自非重叠部分具有代表性的包络信号来计算半峰全宽(FWHM),图 3(b)和图 3(d)中的插图展示了两个调频带宽下的 FWHM。结果表明,当调频带宽为 40 MHz 时相干时域信号包络的典型 FWHM 对应的长度为 2.2 m,调频带宽为 200 MHz 时相干时域信号包络的典型 FWHM 对应的长度为 0.43 m,前者约为后者的 5 倍。

定程度后,相干时域信号包络的 FWHM 过窄,灵敏度降低,其包络时移特征不再明显。

基于调频带宽与相干时域信号时移灵敏度有关的特性,实验中使用具有两个异构 LFM 边带的单脉冲,其参数:第一光学边带的调频带宽为 200 MHz,频率调制范围从 200 MHz 线性变化到 400 MHz;第二光学边带的调频带宽为 40 MHz,频率调制范围从 480 MHz 线性变化到 520 MHz。为了保证实验中给待测光纤施加应变的一致性,将两个应变系数均为 14 ne/V 的商用压电陶瓷(PZT)(拉伸区长度均为 10 m)连接在传感光纤尾部作为

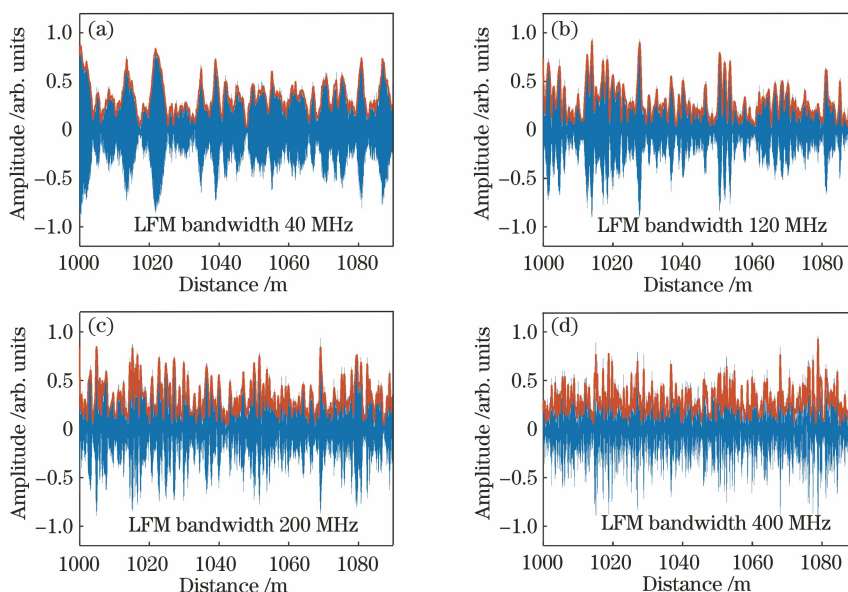


图 4 不同 LFM 带宽条件下的相干时域信号及包络的实验结果。(a) 40 MHz; (b) 120 MHz; (c) 200 MHz; (d) 400 MHz
 Fig. 4 Experimental results of coherent time domain signals and envelopes under different LFM bandwidths.

(a) 40 MHz; (b) 120 MHz; (c) 200 MHz; (d) 400 MHz

两个待测事件, 二者的间隔为 30 m。探测脉冲光先到达的 PZT 记为 1 号, 加载频率为 1 kHz、电压范围为 0~0.5 V 的正弦电信号; 另一只 PZT 记作 2 号, 加载频率为 1 kHz、电压范围为 0~25 V 的正弦电信号。根据所使用的两个光学边带的调频范围, 选择对应频率带宽的数字带通滤波器对采集到的相干时域信号从频域进行分离处理, 通过对各光学边带的相干时域信号的数据处理便可以获得两个边带的解调结果。

调制带宽为 40 MHz 边带的解调结果如图 5 所示, 从图 5(a) 的瀑布图中可以分辨两个事件的位置。由于 PZT1 为微小应变的事件, 为了更清晰地观察, 调整应变颜色栏后如图 5(b) 所示, 从瀑布图中可以清晰观察到两个不同应变动态范围的事件。通过提取两个事件的重构波形, 分别如图 5(c)~图 5(d) 所示。计算可知调频带宽为 40 MHz 的 LFM 脉冲在 0.5 V 和 25 V 条件下的理论时移采样点数分别为 52.85 和 2642.5。与实验结果对比可

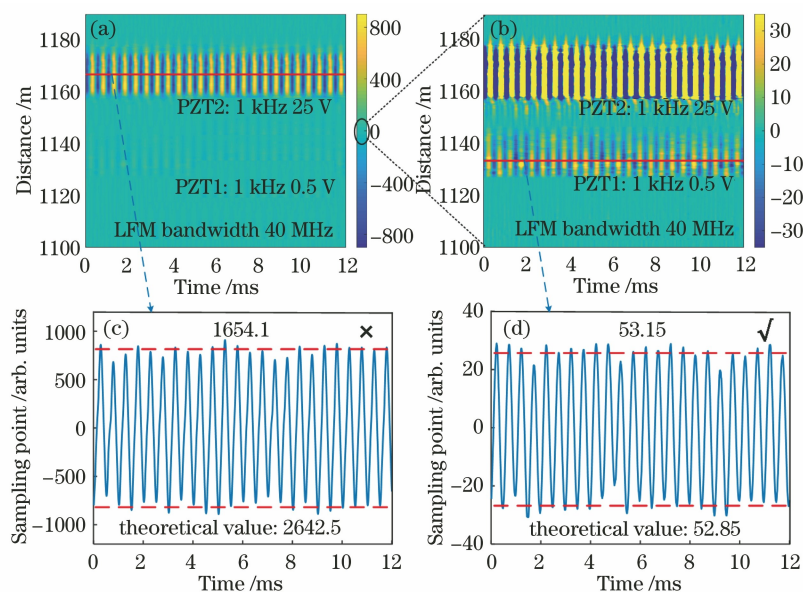


图 5 调频带宽为 40 MHz 的实验结果

Fig. 5 Experimental results with frequency-modulated bandwidth of 40 MHz

知, PZT1 的重构波形的平均峰值与理论计算相吻合, 误差为 0.3 采样点。PZT2 为大应变动态范围事件, 其相干时域信号包络的时移超出了调频带宽为 40 MHz 的 LFM 脉冲的理论测量范围。调制带宽为 200 MHz 的理论时移采样点数分别为 10.57 和 528.5, 实验解调结果如图 6 所示。观察结果图中的瀑布图和重构波形图可知, 仅较大应变事件

PZT2 被成功解调, 其重构波形的应变值与理论计算值基本相符, 重构波形的误差为 44.8 采样点。而微小应变事件 PZT1 的波形已无法完整恢复, 对于 PZT1 事件来说时移过于微小, 信号淹没在噪声中无法进行传感测量。因此, 利用两个边带实现了最大幅值分别为 7 ne 和 350 ne 的正弦动态应变波形的同时恢复。

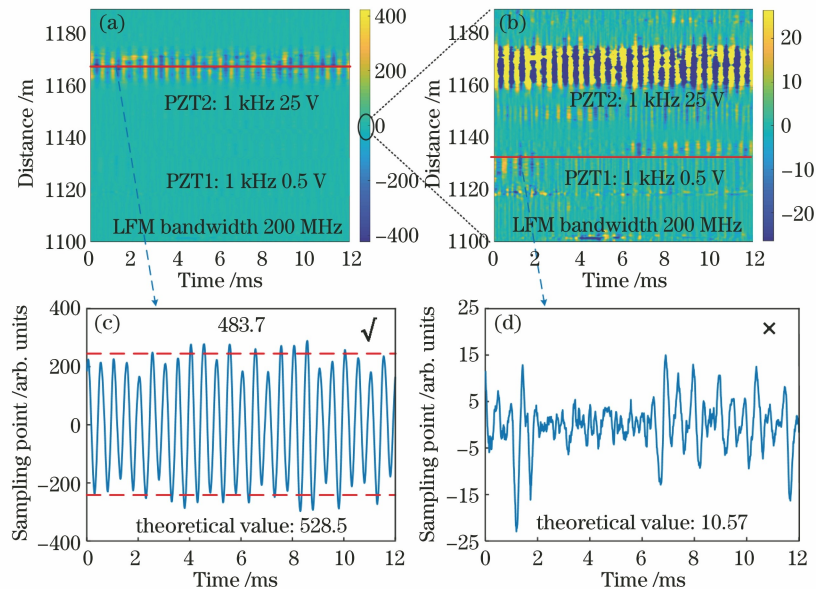


图 6 调频带宽为 200 MHz 的实验结果

Fig. 6 Experimental results with frequency-modulated bandwidth of 200 MHz

根据仿真和实验研究可知, 不同调频带宽的 LFM 脉冲边带直接影响对应相干时域信号包络的 FWHM。当探测脉冲的脉宽保持不变, 不同调频带宽直接引起 LFM 的调频斜率大小不同, 对于固定应变大小的事件, 相干时域信号包络的时移大小与调频带宽呈反比例关系。针对实际复杂应用环境中不同动态范围的事件, 利用高带宽的调制器可在单脉冲内产生具备不同调频带宽的多个调制边带, 根据各边带的灵敏度不同的特点可实现复杂环境事件动态范围的拓展测量。对于所提的方法, 解调结果的保真度取决于多调制边带 LFM 脉冲信号的调制稳定性和数字带通滤波器的滤波效果。多调制边带 LFM 脉冲信号的调制稳定性可通过精确控制调制器的偏压来实现探测脉冲光的稳定输出, 实验结果中重构波形的误差则主要是由于数字滤波器的设计造成的, 后续可通过优化数字滤波器来降低波形重构的误差。

4 结 论

针对不同传感动态范围事件同时测量的应用需

求, 提出一种基于 LFM 脉冲边带调制的动态应变范围扩展传感方法, 利用数字边带调制的灵活性产生异构 LFM 边带的单脉冲, 在不增加系统复杂性的前提下实现了对不同动态应变范围事件的同时测量。实验结果表明, 使用带宽为 40 MHz 和 200 MHz 的 LFM 信号进行单脉冲异构边带调制可实现最大幅值分别为 7 ne 和 350 ne 的正弦动态应变事件传感的同时测量。与现有仅提高应变测量灵敏度或仅提高最大动态应变测量值的传感方法相比, 所提的方法可实现二者兼顾。尤其是, 在特殊环境下需要对具有多个动态范围的事件进行信息提取时, 可充分利用高带宽的调制器同时产生调频带宽递增的 LFM 脉冲系列边带, 进而实现对不同动态范围事件的同时测量, 为光纤 DAS 系统提供一种可靠的动态范围提升方案。

参 考 文 献

- [1] Sladen A, Rivet D, Ampuero J P, et al. Distributed sensing of earthquakes and ocean-solid Earth interactions on seafloor telecom cables [J]. Nature

- Communications, 2019, 10(1): 5777.
- [2] Lindsey N J, Dawe T C, Ajo-Franklin J B. Illuminating seafloor faults and ocean dynamics with dark fiber distributed acoustic sensing [J]. Science, 2019, 366(6469): 1103-1107.
- [3] Raab T, Reinsch T, Aldaz Cifuentes S R, et al. Real-time well-integrity monitoring using fiber-optic distributed acoustic sensing [J]. SPE Journal, 2019, 24(5): 1997-2009.
- [4] Tejedor J, Macias-Guarasa J, Martins H F, et al. Real field deployment of a smart fiber-optic surveillance system for pipeline integrity threat detection: architectural issues and blind field test results [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(4): 1052-1062.
- [5] Milne D, Masoudi A, Ferro E, et al. An analysis of railway track behaviour based on distributed optical fibre acoustic sensing [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 142: 106769.
- [6] Kowarik S, Hussels M T, Chruscicki S, et al. Fiber optic train monitoring with distributed acoustic sensing: conventional and neural network data analysis [J]. Sensors, 2020, 20(2): 450-461.
- [7] Wang C, Liu Q W, Chen D, et al. Monitoring pipeline leakage using fiber-optic distributed acoustic sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1006005.
王辰, 刘庆文, 陈典, 等. 基于分布式光纤声波传感的管道泄漏监测 [J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1006005.
- [8] Zhang X P, Ding Z W, Hong R, et al. Phase sensitive optical time-domain reflective distributed optical fiber sensing technology [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106004.
张旭苹, 丁哲文, 洪瑞, 等. 相位敏感光时域反射分布式光纤传感技术 [J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0106004.
- [9] Li L C, Lu B, Wang X, et al. Internally modulated chirped pulse based direct detection type φ -OTDR system with high signal-to-noise ratio and low cost [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0806003.
李鲁川, 卢斌, 王校, 等. 基于内调制啁啾脉冲的高信噪比低成本直接探测型 φ -OTDR 系统 [J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0806003.
- [10] Sheng Q H, Yu Z, Lu B, et al. Real-time phase-sensitive optical time-domain reflectometry signal processing system based on heterogeneous accelerated computing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0104002.
盛庆华, 俞钊, 卢斌, 等. 基于异构加速的 Φ -OTDR 实时信号处理系统 [J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0104002.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Song M P, Yin C, Lu Y, et al. Four-channel detecting phase demodulation Φ -OTDR based on 3×3 Michelson interferometer [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0806001.
宋牟平, 尹聪, 陆燕, 等. 基于 3×3 迈克耳孙干涉仪的四路检测相位解调 Φ -OTDR [J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0806001.
- [14] Fang G S, Xu T W, Feng S W, et al. Phase-sensitive optical time domain reflectometer based on phase-generated carrier algorithm [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(13): 2811-2816.
- [15] Wang Z N, 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.
- [16] Zhang J X, Jiang W J, Yu Y, et al. Photonics-based simultaneous measurement of distance and velocity using multi-band LFM microwave signals with opposite chirps [J]. Optics Express, 2019, 27(20): 27580-27591.
- [17] Xu Z Y, Tang L Z, Zhang H X, et al. Simultaneous real-time ranging and velocimetry via a dual-sideband chirped lidar [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(24): 2254-2257.
- [18] Zhou L, Wang F, Wang X C, et al. Distributed strain and vibration sensing system based on phase-sensitive OTDR [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(17): 1884-1887.
- [19] Yuan Q, Wang F, Liu T, et al. Compensating for influence of laser-frequency-drift in phase-sensitive OTDR with twice differential method [J]. Optics Express, 2019, 27(3): 3664-3671.
- [20] Chen D, Liu Q W, He Z Y. 108-km distributed acoustic sensor with $220\text{-}\mu\text{e}/\sqrt{\text{Hz}}$ strain resolution and 5-m spatial resolution [J]. Journal of Lightwave

- Technology, 2019, 37(18): 4462-4468.
- [21] Zhang J D, Wu H T, Huang J S, et al. Extending the dynamic strain sensing rang of phase-OTDR with frequency modulation pulse and frequency interrogation[EB/OL]. (2019-11-24) [2021-03-10]. <https://arxiv.org/abs/1911.10468v1>.
- [22] Bhatta H D, Costa L, Garcia-Ruiz A, et al. Dynamic measurements of 1000 microstrains using chirped-pulse phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(18): 4888-4895.
- [23] Ma Z, Jiang J F, Wang S, et al. High performance distributed acoustic sensor based on digital LFM pulse coherent-optical time domain reflectometer for intrapulse event[J]. Applied Physics Express, 2020, 13(1): 012016.
- [24] Jacovitti G, Scarano G. Discrete time techniques for time delay estimation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(2): 525-533.