

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

李鲁川^{1,2}, 卢斌^{2*}, 王校^{2,3}, 梁嘉靖^{2,3}, 郑汉荣^{2,3}, 王照勇², 叶青^{2,3},
方祖捷², 庞拂飞¹, 蔡海文^{2,3**}

¹上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室培育基地, 上海 200444;

²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;

³中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 提出一种新型的基于内调制啁啾脉冲的高信噪比(SNR)直接探测型相位敏感光时域反射计(φ -OTDR)。通过理论分析可得,利用啁啾脉冲的方法并通过提高受激布里渊阈值可提高注入光能量,提高探测信号中的直流分量可使信号与噪声分离,进而提升 SNR。提出一种 φ -OTDR 系统信噪比的综合评判方法,对 SNR 的统计特性进行分析。同时,开展了基于分布式反馈激光器的内调制直接探测型 φ -OTDR 系统实验研究,利用可调谐滤波器对内调制产生的频率啁啾范围进行控制,经对比实验验证,可得所提系统与传统 φ -OTDR 系统的信噪比期望相当,分布方差更小,测量可靠度更高的结论。此外,该系统还具有成本低、结构简单等优点,实际应用时可以利用光纤布拉格光栅代替可调谐滤波器,提升其应用的灵活性,为工程应用提供新的解决方案。

关键词 光通信; 相位敏感光时域反射计; 内调制; 啁啾脉冲; 信噪比; 低成本

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0806003

Internally Modulated Chirped Pulse Based Direct Detection Type φ -OTDR System with High Signal-to-Noise Ratio and Low Cost

Li Luchuan^{1,2}, Lu Bin^{2*}, Wang Xiao^{2,3}, Liang Jiajing^{2,3}, Zheng Hanrong^{2,3},
Wang Zhaoyong², Ye Qing^{2,3}, Fang Zujie², Pang Fufei¹, Cai Haiwen^{2,3**}

¹Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University,
Shanghai 200444, China;

²Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and
Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of
Sciences, Beijing 100049, China

Abstract This paper proposes an internally modulated chirped pulse based direct detection type phase sensitive time domain reflectometer (φ -OTDR) system with high signal-to-noise ratio (SNR). Based on theoretical analysis, we find that the stimulated Brillouin threshold increases with the increasing injection pulse energy, the high direct current component of the detection signal keeps the signal and noise separate, and the SNR can be enhanced. Then a statistical evaluation method is proposed to calculate the SNR of the sensing system. Meanwhile, an internally modulated direct detection type φ -OTDR system based on the distributed feedback laser is experimentally studied. The frequency chirp range introduced by internal modulation is controlled by the tunable filter. Compared with the traditional φ -OTDR system, the proposed system can obtain similar SNR and smaller distribution variance and

收稿日期: 2019-03-14; 修回日期: 2019-04-03; 录用日期: 2019-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(61675216,61775225,61535014)、国家重点研发计划(2017YFB0405502)、上海市自然科学基金(18ZR1444600)、上海市科技委员会(19YF1453400,18DZ1201303)

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

realize higher measurement reliability. Additionally, The proposed system has the advantages of low cost and small volume, and the tunable filter can be replaced by fiber Bragg grating in practical application. It can improve the flexibility of application and provide a new idea for engineering.

Key words optical communications; phase sensitive time domain reflectometer; internal modulation; chirped pulse; signal-to-noise ratio; low cost

OCIS codes 060.2370; 060.2310; 060.2630

1 引 言

相位敏感光时域反射计(φ -OTDR)作为一种新型的分布式光纤传感技术,具有可连续分布式测量、高灵敏度、抗电磁干扰等诸多优点,在周界安防、油气管道监测、地震波检测等领域具有广泛的应用前景,成为近年来的研究热点^[1-2]。该技术在1993年由Taylor等^[3]提出,主要用于入侵检测。该技术采用窄线宽激光器作为光源,通过光纤中的后向瑞利散射光进行传感,利用脉冲的往返时间差进行扰动事件定位。

根据 φ -OTDR系统的探测结构和信号解调方式,可将其分为定量化相位解调型系统与直接强度探测型系统。相位解调型系统可提取相位信息,能够实现定量测量,主要结构有相干探测型^[4]、双脉冲^[5]、 3×3 干涉仪型^[6]等。直接强度探测型系统可测量光强度信息,可对外界扰动进行定性分析以及扰动定位^[7]。相位解调型系统虽可实现定量测量,但其结构复杂,成本较高;而直接强度探测型系统结构简单、成本低、便于集成,其性能足以满足许多无需定量测量的应用场景,如安防领域^[8]等的应用需求。直接强度探测型 φ -OTDR在目前光纤传感领域具有发展潜力^[9-11],如何进一步提高系统的传感性能,并简化系统结构,降低系统成本,是 φ -OTDR系统研究的重要方向之一。

本文提出一种新型的基于内调制分布式反馈(DFB)激光器的直接探测型 φ -OTDR系统,同时提出一种利用统计手段对 φ -OTDR系统的信噪比(SNR)进行综合评判的方法,并通过实验对所提系统与传统直接探测型 φ -OTDR系统的综合SNR进行对比。这种新型的传感系统利用DFB内调制所产生的频率啁啾效应^[12-13],在脉冲中增加频率成分,提高受激布里渊阈值(SBS)^[14],有效增加注入光脉冲能量,同时提升了探测信号中的直流成分,使噪声与信号保持相对独立,并使系统的SNR分布更加稳定,可靠性更高;此外,该系统还降低了传统系统的复杂性和成本。

2 理论部分

在连续光条件下,受激布里渊阈值 $P_{th(CW)}$ 表达式为

$$P_{th(CW)} = \frac{21A_{eff}}{g_b L_{eff}} \left(1 + \frac{v_p}{v_b} \right), \quad (1)$$

式中: A_{eff} 为光纤有效截面积; g_b 为布里渊增益峰值; v_p 为种子激光的谱宽(连续光时 v_p 约为0); v_b 为布里渊增益带宽; L_{eff} 为光纤有效长度。在 φ -OTDR系统中,对于脉冲光而言,设脉冲占空比为1:N,且注入脉冲光峰值为 $(N+1)T$,则该光脉冲在光功率计上的读数为 T 。当光纤中受激布里渊散射阈值为 T_1 ,且 $T < T_1$ 时,该脉冲可顺利通过光纤而不会引起受激布里渊散射,从而把能输出的最大功率提高 $N+1$ 倍。得到的脉冲下阈值 $P_{th(Pulse)}$ 为

$$P_{th(Pulse)} = (1 + N)P_{th(CW)}. \quad (2)$$

在直接探测型 φ -OTDR系统中,接收端的强度信号 I_{det} 主要由 I_{DC} 与 I_{AC} 两部分组成,即

$$I_{det} = I_{DC} + I_{AC}, \quad (3)$$

式中, I_{DC} 为直流成分, I_{AC} 为交流成分。根据(1)~(3)式,当注入光为啁啾脉冲时,其频率成分增加,可以有效地提高SBS阈值,进而能够提升注入光能量。对于传统直接探测型 φ -OTDR而言,在高相干光注入的情况下, I_{AC} 随时间具有一定的不稳定性,进而导致SNR不稳定,当 $I_{DC} + I_{AC}$ 的强度很低时, I_{AC} 会淹没在噪声中,从而严重影响系统SNR。而在内调制直接探测型 φ -OTDR系统中,啁啾脉冲提高了注入光能量,且多频率的注入导致光脉冲内的相干性降低,直流成分 I_{DC} 增大,交流成分 I_{AC} 降低。 I_{DC} 增大了探测信号强度,并易使信号与噪声分离,提高了系统的抗干扰能力;而 I_{AC} 的降低会使SNR有所降低。因此,需要对光源的相干性进行最优化选择,且需要一种方法对 φ -OTDR系统的SNR进行综合评判。

Gabai等^[15]利用统计的方法,对相干探测中解调的相位进行了SNR分析,Fernández-Ruiz等^[16]利用统计的方法,对比了扫频脉冲 φ -OTDR系统的SNR与相干探测的SNR。因此,对于直接探测型

φ -OTDR 系统,同样可以使用统计的方法,利用系统对外界扰动的响应情况,对 SNR(R_{SN})进行评判:

$$R_{SN}(z_0) = \frac{\sigma_1^2(z_0, t)}{\sigma_2^2 \cdot (\mu_2/\mu_1)}, \quad (4)$$

式中: z_0 为受到外界扰动的位置; $\sigma_1^2(z_0, t)$ 为外界扰动位置所探测到的信号的方差; σ_2^2 为噪声的方差; μ_1 为信号的期望值; μ_2 为噪声信号的期望值。在探测端,可以获得强度的空间-时间矩阵 $\mathbf{I}(z, t)$, z 为空间位置, t 为时间。当光纤某一特定位置 z_0 受到周期性扰动时(如正弦型振动),同样会导致向量 $\mathbf{I}(z_0, t)$ 产生与外界扰动相似的周期性强度变化。对于扰动位置,有

$$\mathbf{I}(z_0, t) = I_0 + \Delta\mathbf{I}(t) + \mathbf{I}_{noise}(t), \quad (5)$$

式中: I_0 表示扰动信号中的直流信号,其值由探测信号中的直流项 I_{DC} 决定,可近似为常数; $\Delta\mathbf{I}(t)$ 表示外界扰动所导致的强度变化, $I_0 + \Delta\mathbf{I}(t)$ 为信号项; $\mathbf{I}_{noise}(t)$ 表示系统噪声,即噪声项。

对于传统直接探测型 φ -OTDR 系统而言,高相干光源保证 $\Delta\mathbf{I}(t)$ 的方差 σ_1^2 增加。但受到光脉冲能量的限制, I_0 的大小受到限制, $\Delta\mathbf{I}(t)$ 随时间具有一定的不稳定性。 $\Delta\mathbf{I}(t)$ 在一段时间内处于低强度状态,导致 $\mu[I_0 + \Delta\mathbf{I}(t)] < \mu[I_{noise}(t)]$ (即 $\mu_1 < \mu_2$), 此时信号淹没于噪声中,严重影响系统的性能;对于内调制直接探测型 φ -OTDR 系统而言,高能量的注入可以保证信号项中的 I_0 较高,因此其与噪声项的对比度较高, $I_0 \gg \mu[I_{noise}(t)]$, 即信号与噪声保证相对独立,这保证了信号不会由于强度较低而淹没于噪声中。忽略噪声项 $\mathbf{I}_{noise}(t)$ 的影响,由于啁啾脉冲会降低脉冲的相干性(即 σ_1^2 减小),若信号的波动较小,同样无法有效地解调出扰动。因此一个高 SNR 系统既需要令信号与噪声保持相对独立(即保

证 I_0, μ_1 大于 μ_2),同时需保证信号项 $\Delta\mathbf{I}(t)$ 的波动大于噪声的波动(即 $\sigma_1^2 > \sigma_2^2$)。在实验中,可通过可调谐滤波器或特定带宽的光纤光栅(FBG)滤波器选择脉冲啁啾范围,进而对脉冲的相干性进行控制,以保证满足上述条件。

3 实验部分

3.1 实验设置

实验系统如图 1 所示,使用的激光器为内调制 DFB 激光器模块。在实验中,当 DFB 激光器连续输出线宽为 10 MHz 时,通过上位机直接对 DFB 激光器进行控制,利用电流对 DFB 直接进行脉冲调制,所使用的脉冲长度为 80 ns,脉冲重复频率为 1 kHz。在 DFB 激光器后连接耦合器(coupler),其中一路 a 接入测试系统(chirp measure),对 DFB 调制所产生的频率啁啾进行实时测量,另一路 b 为探测光。由于可调谐滤波器的损耗较高, b 路探测光首先通过掺铒光纤放大器(EDFA₁)进行预放大。实验中滤波器使用的中心波长为 1549.078 nm,带宽为 0.02 nm(2.5 GHz)。光脉冲依次经过滤波(filter)、EDFA₂放大和环形器(circulator)后,进入传感光纤(FUT)中,实验中的传感光纤为普通单模(SMF),实验中的 FUT 的长度为 3.5 km。在 550 m 处设置一个被正弦电压所驱动的压电陶瓷片(PZT)作为扰动源,正弦驱动信号由信号发生器产生,其频率为 200 Hz,驱动电压为 ± 1 V。探测光在 FUT 中传播时,其散射光沿探测光反方向传输,之后返回环形器,通过一个雪崩光电二极管(APD)对信号进行探测,通过高速数据采集卡(DAQ)将模拟信号转换为数字信号。DFB 调制脉冲接入采集卡并作为触发信号,信号采集完成后,利用上位机对数据进行处理。

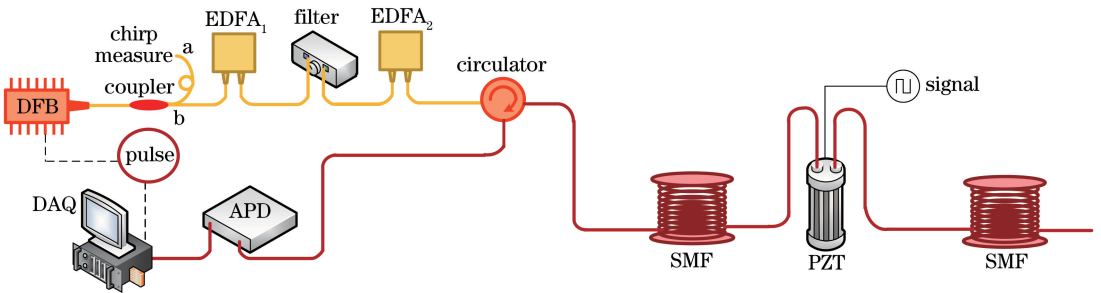


图 1 实验系统

Fig. 1 Experimental setup

3.2 频率啁啾测量

为获得由内调制产生的频率啁啾变化情况,设计了如图 2 所示的 DFB 频率啁啾测量系统。激光

器发出波长可调节的连续光(CW light),将其作为参考光,DFB 为脉冲激光器,设置与实验中参数保持一致(脉冲波长为 80 ns,重复频率为 1 kHz)。两

束光经过耦合器后的拍频信号被高带宽探测器接收,探测器的响应带宽为 18 GHz,示波器的采样率为 20 GHz。

为 20 GHz。

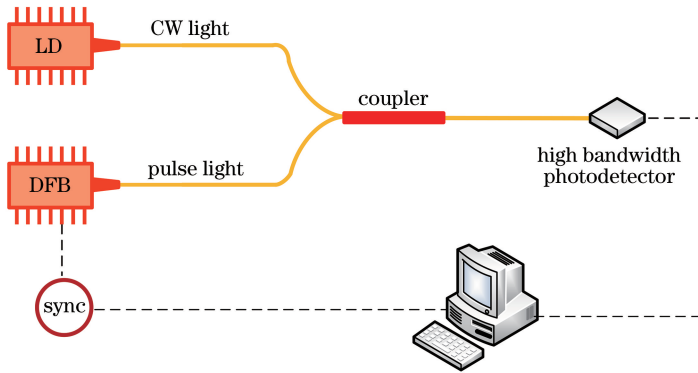


图 2 DFB 频率啁啾测量系统

Fig. 2 Measurement system for DFB frequency chirp

首先根据输出脉冲光的光谱,获得内调制产生的高速扫频范围。利用光谱仪测量,获得啁啾展宽的范围为 1548.973~1549.088 nm,产生的啁啾范围为 0.115 nm(约 14 GHz)。分别设置连续光波长为两个临界波长,通过示波器获得拍频图样。拍频信号受到强直流信号影响。为得到一个较为明显的频

率变化,对时域信号取导数,这样可有效地去除强直流信号,同时经过微分后的信号不会改变其频率信息。当连续光的波长为 1548.973 nm 时,连续光与脉冲光的拍频图样如图 3(a)所示。当连续光波长为 1549.088 nm 时,所获得的拍频图样如图 3(b)所示。

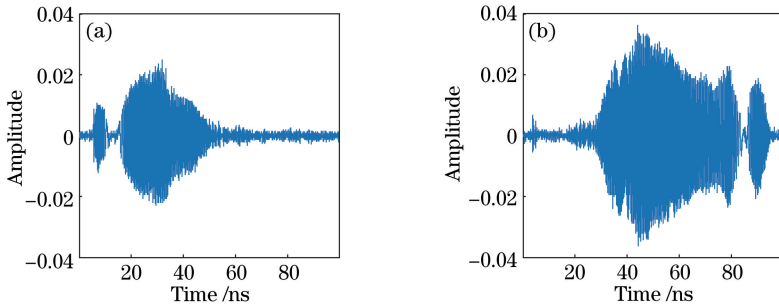


图 3 不同参考光波长下的拍频图样。(a)参考波长为 1548.973 nm 的拍频图样;(b)参考波长为 1549.088 nm 时的拍频图样

Fig. 3 Beat signals under different reference wavelengths. (a) Beat signal when reference wavelength $\lambda = 1548.973$ nm; (b) beat signal when reference wavelength $\lambda = 1549.088$ nm

随后利用短时傅里叶变换(STFT)获得频谱信息,如图 4(a)和图 4(b)所示,经过两图的拼接,可获得脉冲宽度大致为 80 ns 内的频率变化,如图 4(c)所示。可以明显看出,内调制使得频谱发生红移和蓝移现象^[13]。

根据理论分析,利用可调谐滤波器截取的一段啁啾脉冲在脉冲长度内具有一定的相干性。将滤波器的中心波长对准能量最高处的波长(1549.078 nm),设置带宽为 2.5 GHz(0.02 nm),如图 4(c)中粗线覆盖范围所示。

3.3 实验结果分析

为了对比说明,在此重新搭建一套利用外调制器的传统直接探测型 φ -OTDR 系统^[7]。使用的外

调制器为声光调制器(AOM),其他外界条件都相同,两系统探测信号强度图如图 5 所示。可以发现,内调制直接探测型 φ -OTDR 的 SNR 为 11 dB,而传统直接探测型 φ -OTDR 系统的 SNR 为 5.7 dB,探测信号的 SNR 得到了明显的提高,即 I_{DC} 明显提高。

图 6(a)与图 6(b)所示为内调制直接探测型 φ -OTDR 系统与传统直接探测型 φ -OTDR 系统在扰动位置 z_0 处的时域信号,由于系统中存在较强的直流项和低频噪声,而正弦信号的微分不改变其频率信息以及强度系数信息,对原信号中的一段取一阶微分,将正弦信号对准坐标轴原点,结果如图 6(c)所示。图 6(d)表明,由于受到啁啾频率的影响,频

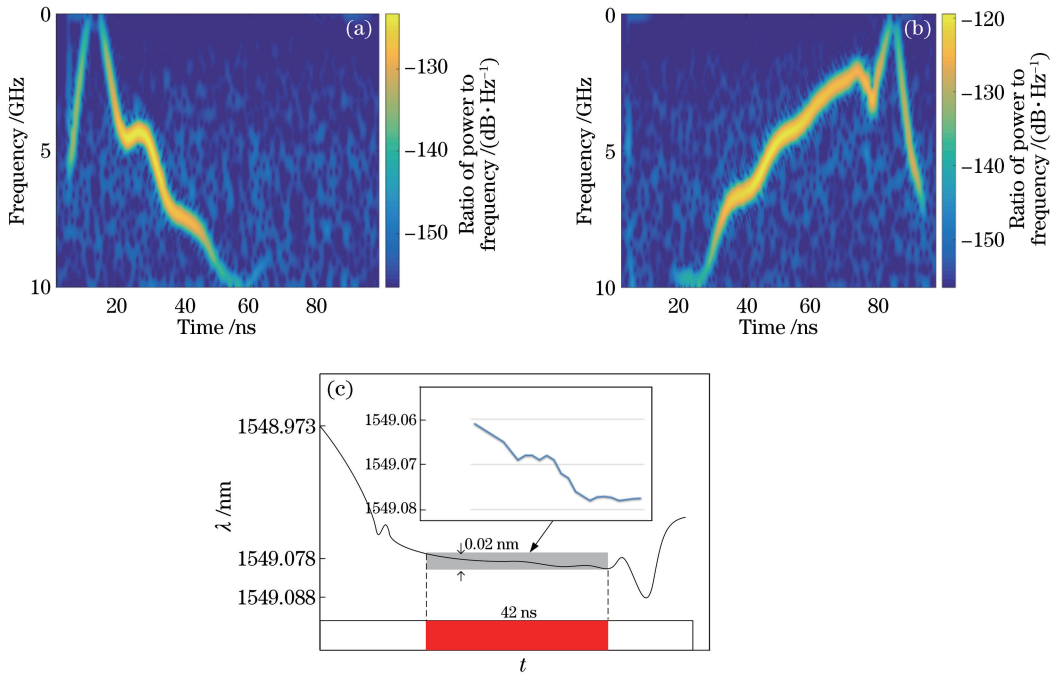


图 4 内调制啁啾测量结果。(a)连续光的波长为 1548.973 nm 时的频率变化；
(b)连续光波长为 1549.088 nm 时的频率变化；(c)经过拼接后获得的脉冲内频率变化

Fig. 4 Measurement results of internal modulation chirp. (a) Spectrogram of beat signal when continuous wavelength $\lambda=1548.973$ nm; (b) spectrogram of beat signal when continuous wavelength $\lambda=1549.088$ nm; (c) pulse frequency change after stitching

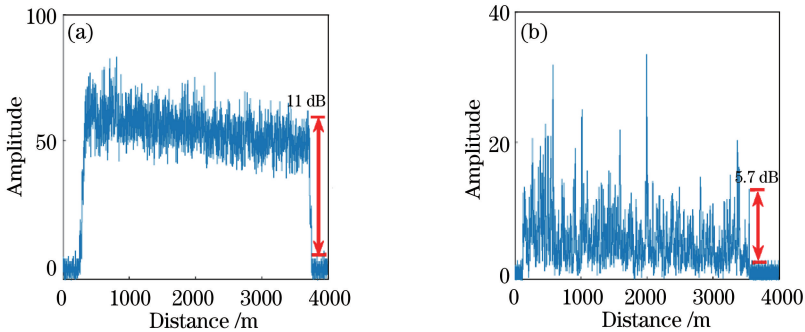


图 5 探测信号图样。(a)内调制直接探测型 φ -OTDR 系统探测波形；(b)传统直接探测型 φ -OTDR 系统探测波形

Fig. 5 Detection signal patterns. (a) Detected signal of internally modulated direct detection type φ -OTDR system; (b) detected signal of traditional direct detection type φ -OTDR system

谱宽度较宽,降低了对扰动的响应度,从而降低了 I_{AC} 的波动。基于高相干光源的传统直接探测型 φ -OTDR 的正弦信号强度变化整体波动大于内调制直接探测型 φ -OTDR。

由于高相干光源的强干涉性,扰动位置的信号强度会发生周期性波动,一段时间内 I_{AC} 项较低,导致信号淹没在噪声中,无法正确解调出扰动信号,从而降低系统的可信度,如图 6(b)中框内所示。因此在解调时,SNR 计算会出现较大的波动;而图 6(a)中内调制直接探测型 φ -OTDR 的信号波动虽然整体较小,但是未出现明显的衰落现象。

3.4 SNR 综合评定

为了验证信号在长时间运行下的稳定性,在此对大量数据进行了统计分析。数据记录时间为 4 h,扰动位置 z_0 处的信号强度随时间的统计特性如图 7 所示,图 7 中插图为根据(4)式计算的,每 10 min 扰动位置 z_0 处的 SNR 随时间的统计分布拟合。

由图 7 可见,内调制直接探测型 φ -OTDR 系统扰动位置处信号强度普遍较高,经过计算可得信号强度期望 μ_1 约为 63.4,信号与噪声发生了分离,SNR 分布更为集中,SNR 期望约为 42.8 dB,波动范围在 6 dB 以内,方差为 1.7。在传统直接探测型 φ -OTDR 系统中,扰动位置处的信号强度较低且波动

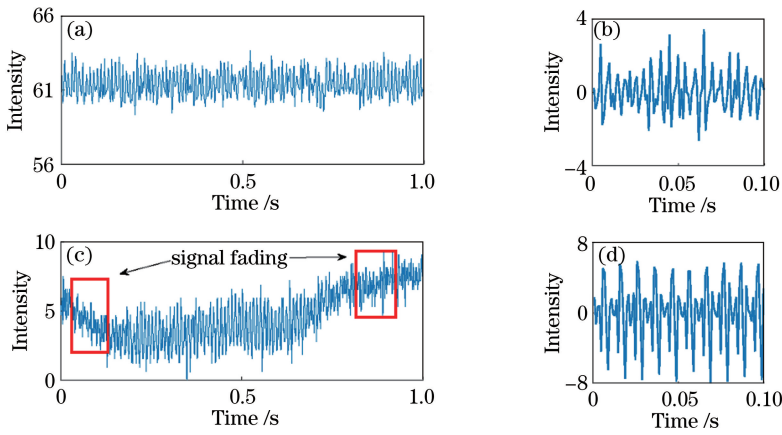


图 6 两种系统的探测信号对比。(a)内调制直接探测型 φ -OTDR 系统的原始时域信号;(b)传统直接探测型 φ -OTDR 系统的原始时域信号;(c)内调制直接探测型 φ -OTDR 系统扰动位置处信号的一阶微分;(d)传统直接探测型 φ -OTDR 系统扰动位置处信号的一阶微分

Fig. 6 Comparison of detection signals of two systems. (a) Original time domain signal of internally modulated direct detection type φ -OTDR system; (b) original time domain signal of traditional direct detection type φ -OTDR system; (c) first-order differential of disturbance signal of internally modulated direct detection type φ -OTDR system; (d) first-order differential of disturbance signal of traditional direct detection type φ -OTDR system

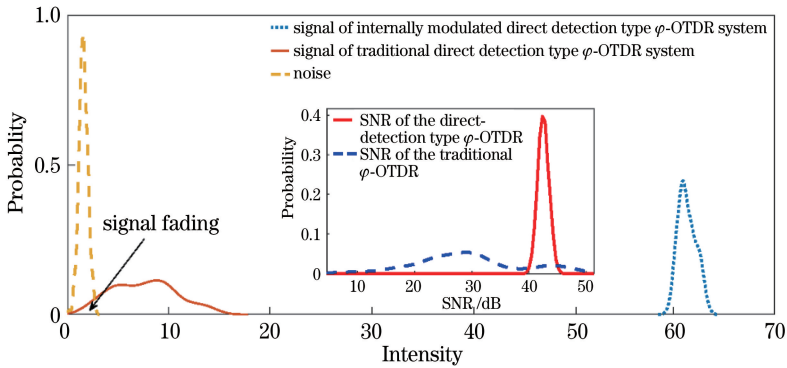


图 7 传统直接探测型 φ -OTDR 系统扰动信号、内调制直接探测型 φ -OTDR 扰动信号和噪声信号的统计分布特征。插图为根据(4)式计算的,每 10 min 扰动位置 z_0 处的 SNR 随时间的统计分布拟合

Fig. 7 Statistical distribution characteristics of disturbance signals of internally modulated direct detection type φ -OTDR system and traditional direct detection type φ -OTDR system and noise. Insert is fitting curve of SNR statistical distribution with time at disturbance position z_0 , and fitting curve is calculated according to equation (4) for every 10 minutes

大,信号强度期望 μ_1 约为 7.8,方差约为 12.8。在部分时间内,扰动信号强度较低,会淹没在噪声中,如图 7 中箭头位置所示,经计算可得 SNR 期望约为 45.7 dB,其波动范围达到了 40 dB 以上,方差为 11.4。综上所述,内调制直接探测型 φ -OTDR 系统 SNR 的期望与传统直接探测型 φ -OTDR 系统相当,但随着时间的推移,系统的稳定性更高、可靠性更强。

4 讨 论

基于 DFB 激光器的内调制直接探测型 φ -

OTDR 系统可有效地定位扰动,实际应用中,可将可调节滤波器用 FBG 代替,利用 FBG 对内调制的啁啾范围进行控制,同时可以经过一个 2:1 耦合器(coupler)分出另一路,增加一路输出,其中一路经过内调制直接探测型 φ -OTDR 系统,可对外界扰动进行动态测量;另一路不经过 FBG,直接将谱宽较宽的啁啾脉冲,即低相干光注入光纤,作为 OTDR 使用,对光纤沿线断纤进行定位并对光纤损耗进行测量。双通道 φ -OTDR、OTDR 系统结构如图 8 所示。

然而,因内调制会引起啁啾效应,脉冲光在长距离光纤传播时,受到光纤中的非线性效应的影响,包

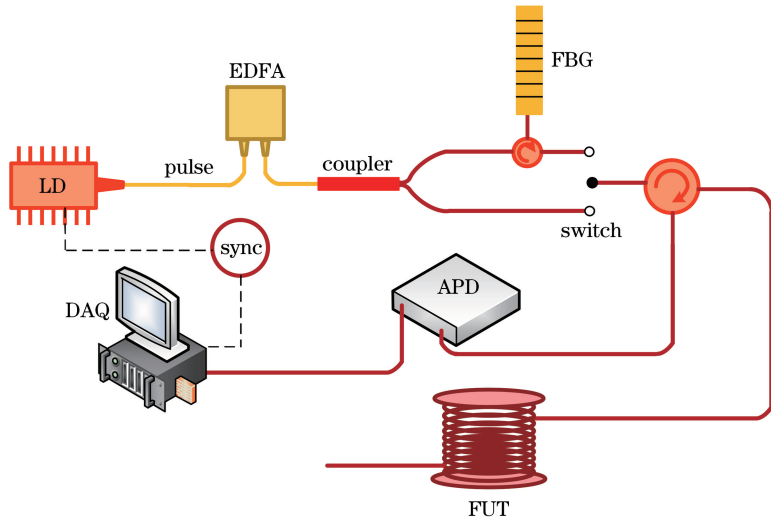


图 8 双通道 φ -OTDR、OTDR 系统

Fig. 8 System with two channels of φ -OTDR and OTDR

括群速色散以及自相位调制 (SPM), 光纤过长的情况下会导致光谱质量下降^[17], 脉冲展宽, 从而限制传感距离, 同时在长距离的传感中灵敏度会大幅降低。但是, 内调制直接探测型 φ -OTDR 系统中短距离的传感中同样能保持与传统直接探测 φ -OTDR 系统相近的传感性能。

5 结 论

提出了一种新型的利用啁啾脉冲增加 φ -OTDR SNR 的方法, 啁啾脉冲通过对 DFB 激光器的内调制获得, 使用啁啾脉冲作为探测光可以有效提升光纤中的受激布里渊阈值, 提高注入光能量, 提升探测信号中的直流分量, 保证了信号与噪声的相对独立性。同时, 利用统计的方法对内调制直接探测型 φ -OTDR 系统与传统直接探测 φ -OTDR 系统的 SNR 进行了综合评判, 根据实验结果, 内调制直接探测型 φ -OTDR 系统的 SNR 分布更加稳定, 方差小且期望值高, 且可实现长时间稳定运行, 可靠性更高。在实际应用中, 可用 FBG 代替可调节滤波器, 利用 FBG 对内调制的啁啾范围进行控制, 这种利用 DFB 激光器的内调制直接探测型 φ -OTDR 系统将调制器与激光器合二为一, 大大降低了传统直接探测型 φ -OTDR 的成本, 增加了系统使用的灵活性。最后, 提出了一种将 OTDR 断纤定位系统与 φ -OTDR 扰动定位系统相结合的低成本综合系统, 这为工程应用提供了新的思路。

参 考 文 献

[1] Masoudi A, Newson T P. Contributed review:

distributed optical fibre dynamic strain sensing [J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87 (1): 011501.

[2] Ye Q, Pan Z Q, Wang Z Y, *et al.* Progress of research and applications of phase-sensitive optical time domain reflectometry [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0600001.

叶青, 潘政清, 王照勇, 等. 相位敏感光时域反射仪研究和应用进展 [J]. 中国激光, 2017, 44 (6): 0600001.

[3] Tarlor H F, Lee C E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: US5197847 [P]. 1993-03-16 [2019-03-01]. <https://patents.glgoo.top/patent/US5194847A/en>.

[4] Pan Z Q, Liang K Z, Ye Q, *et al.* Phase-sensitive OTDR system based on digital coherent detection[C]// Optical Sensors and Biophotonics, November 13-16, 2011, Shanghai. Washington, D. C.: OSA, 2011: 83110S.

[5] He X G, Liu F, Qin M Z, *et al.* Phase-sensitive optical time-domain reflectometry with heterodyne demodulation [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 70323: 103235Q.

[6] Masoudi A, Belal M, Newson P. A distributed optical fibre dynamic strain sensor based on phase-OTDR [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(8): 085204.

[7] Tu G J, Zhang X P, Zhang Y X, *et al.* The development of an Φ -OTDR system for quantitative vibration measurement [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(12): 1349-1352.

[8] Wang K. Research on the practical technique of multifunctional optical fiber security monitoring

- system based on the phase-sensitive OTDR [D]. Shanghai: Donghua University, 2015: 32-48.
- 王坤. 基于相位敏感光时域反射计的多功能光纤安防系统实用化技术研究[D]. 上海: 东华大学, 2015: 32-48.
- [9] Martins H F, Martin-Lopez S, Corredera P, *et al.* Distributed vibration sensing over 125 km with enhanced SNR using phi-OTDR over a URFL cavity [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(12): 2628-2632.
- [10] Yang G Y, Fan X Y, Liu Q W, *et al.* Frequency response enhancement of direct-detection phase-sensitive OTDR by using frequency division multiplexing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(4): 1197-1203.
- [11] Wu M S, Fan X Y, Liu Q W, *et al.* Highly sensitive quasi-distributed fiber-optic acoustic sensing system by interrogating a weak reflector array [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(15): 3594-3597.
- [12] Liu J W. Research on the dynamic tuning characteristics of DFB lasers and its measurement methods[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012: 38-44.
- 刘景旺. DFB 激光器的调谐动态特性及测量方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2012: 38-44.
- [13] Duan H. The response characteristics of semiconductor lasers based on rate equations [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2010: 21-51.
- 段慧. 基于速率方程的半导体激光器响应特性研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2010: 21-51.
- [14] Smith R G. Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering [J]. *Applied Optics*, 1972, 11(11): 2489-2494.
- [15] Gabai H, Eyal A. On the sensitivity of distributed acoustic sensing [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(24): 5648-5651.
- [16] Fernández-Ruiz M R, Martins H F, Costa L, *et al.* Statistical analysis of SNR in chirped-pulse Φ -OTDR [C] // 26th International Conference on Optical Fiber Sensors, September 24-28, 2018, Lausanne, Switzerland. Washington, D. C.: OSA, 2018: WF16.
- [17] Agrawal G P, Olsson N A. Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1989, 25(11): 2297-2306.