

## 激光与光电子学进展

## 基于线性扫频的分布式光纤微震信号调制方法

崔少杰, 康杰虎, 吴斌\*

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

**摘要** 在页岩气的开采过程中,需要对压裂作业中产生的微震波进行检测。在传统的基于后向瑞利散射的分布式光纤传感技术的基础上,提出了一种应用于微震波检测的线性扫频脉冲调制方法。将调制系统中的矩形脉冲改为线性扫频脉冲,通过压缩脉冲匹配滤波的方式实现长距离、高空间分辨率传感。经过仿真与实验验证,选用线宽约为 10 kHz 的窄线宽激光器为光源,经电光调制与声光调制,可实现扫频范围为 5.6~5.8 GHz、扫频时间为 2  $\mu$ s、传感距离为 10 km 的线性扫频信号调制,接收到的后向瑞利散射信号强度范围为 -60~-50 dBm。

**关键词** 分布式声波传感; 线性扫频; 微震信号调制; 微震检测技术

中图分类号 TP202

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222993

## Distributed Optical Fiber Micro-Seismic Signal Modulation System Based on Linear Frequency Modulation

Cui Shaojie, Kang Jiehu, Wu Bin\*

State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University,  
Tianjin 300072, China

**Abstract** Based on the traditional distributed optical fiber sensing technology that uses back Rayleigh scattering, a linear sweep pulse modulation method for micro-seismic detection is proposed. The rectangular pulse in the modulation system is first transformed into a linear sweep pulse, and long-distance and high-spatial-resolution sensing is realized by compressing the pulse and matching filtering. Through simulation and experimental verifications, a narrow line-width laser with a line width of approximately 10 kHz is selected as the light source. Electro-optical and acousto-optical modulations determine the frequency scanning range and time as 5.6~5.8 GHz and 2  $\mu$ s, respectively. Linear sweep signal modulation obtains a sensing distance of 10 km, and the intensity range of the received back Rayleigh scattering signal is -60~-50 dBm.

**Key words** distributed acoustic sensing; linear sweep frequency; micro seismic signal modulation; micro seismic monitoring technique

## 1 引言

微震检测技术<sup>[1]</sup>是通过观测分析生产活动中所产生的微小地震事件来检测生产活动的影响效果及地下状态的地球物理技术。其基础是声发射学和地震学,与地震勘探相反,微震检测中震源的位置、发震时刻、震源强度都是未知的,确定这些因素恰恰是微震检测的首要任务。在微震检测技术,检波器是抓取微震信息的关键器件,作为微震检测的第一步,微震信号的获取十分关键。

目前在页岩气压裂效果微震检测中使用的地震检

波器<sup>[2]</sup>多数是以压电、电磁、涡流为原理的电学检波器。虽然电学检波器发展成熟、质量稳定,但这类检波器都属于有源器件,在环境恶劣的页岩气勘测采集现场存在诸多不足,例如实用性、抗干扰能力、空间分辨率等。光纤传感<sup>[3]</sup>技术是可检测声波和振动的非入侵式传感方法,且凭借抗电磁干扰能力强、质量轻、耐腐蚀、灵敏度高、无源、可分布式测量等优点,其在地震检波方面具有天然的优势。

近年来,基于后向瑞利散射<sup>[4-5]</sup>的分布式光纤传感技术<sup>[6]</sup>发展迅猛,其中分布式声波传感技术<sup>[7-8]</sup>(DAS)适用于石油物探、地震勘探以及油气管道安

收稿日期: 2022-11-01; 修回日期: 2022-11-08; 录用日期: 2023-01-06; 网络首发日期: 2023-02-07

基金项目: 四川省科技支撑计划(2021YFSY0024)

通信作者: \*wubin@tju.edu.cn

全监测等方面。Taylor 等<sup>[9]</sup>首次提出运用窄线宽激光器作为光源,采用矩形脉冲信号进行调制的光时域反射计。何祖源等<sup>[10]</sup>在不改变脉冲调制的基础上,运用相干检测,同时缩短时延差,实现 30 km 传感距离、10 m 空间分辨率的实验成果。卢斌等<sup>[11]</sup>提出了一种基于频率扫描脉冲的相敏光时域反射计,表明线性扫频脉冲压缩效应可用于分布式光纤传感,其空间分辨率可达到 0.5 m。英国 Optasense 和 Silixa 公司致力于直连式存储(DAS)在石油行业中的应用,主要包含地震波监测以及石油管道的安全检测, Silixa 公司将 DAS 设备接入 Reykjanes Peninsula 上 15 km 的通信光缆<sup>[12]</sup>,分析了附近的山脉断层和火山结构。尚盈等<sup>[13]</sup>运用窄线宽激光器作为光源,通过脉冲调制、干涉解调的方法,获取地震剖面图。一些科研机构和公司采用海底通信光缆,对海底微地震、局部表面重力波进行实时监测,以便进一步分析海洋地质结构。

针对页岩气压裂检测微震检波技术中信号微弱的难题,本文选择对外界温度及应变等干扰都很敏感的瑞利散射来进行实验,提出了一种基于背向散射瑞利的微震检测光纤传感技术。在传统的矩形脉冲调制的

基础上,采用了线性扫频脉冲技术,在保证长距离传感的基础上,有效提高空间分辨率。系统采用高频率的扫频信号,克服了信号微弱的难题。同时,采用光纤传感技术易于形成传感网络,在页岩气压裂作业现场能实现远距离微震波的检测。

## 2 基本原理

### 2.1 高相干光激励后向瑞利散射模型

如图 1(a)所示,一束高相干的窄线宽激光注入传感光纤,取其中一段长度为  $i\Delta L$  的光纤。光纤内可被分割为多个反射镜,取其中一段  $\Delta L$ 。设  $\Delta L$  内有  $N$  个散射点,且其偏振态相同,第  $p$  个反射镜处的光场为散射点场矢量和  $E(p)$ <sup>[14]</sup>,  $E(p)$  可表示为

$$E(p) = r_p \exp(j\phi_p) = \sum_{n=1}^N a_n \exp(j\Omega_n), \quad (1)$$

式中:  $r_p$  为第  $p$  段光纤  $M$  个后向散射点的光场振幅矢量和,定义为第  $p$  个反射镜的反射率;  $\phi_p$  为  $M$  个后向散射点的相位矢量和,定义为第  $p$  个反射镜的相位;  $j$  为虚数;  $a_n$  为光纤  $\Delta L$  长度内第  $p$  个后向散射点的光场振幅值;  $\Omega_n$  为第  $p$  个后向散射点的光场相位值。

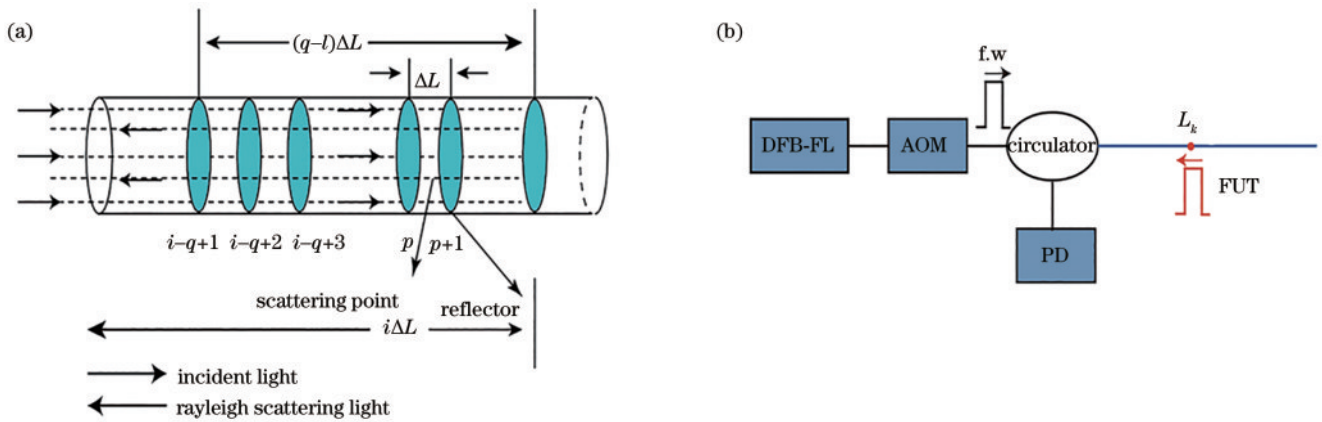


图 1 后向瑞利散射原理分析示意图。(a)后向瑞利散射离散模型图;(b)后向瑞利散射光检测光路

Fig. 1 Schematic diagram of principle analysis of back Rayleigh scattering. (a) Back Rayleigh scattering discrete model diagram; (b) back Rayleigh scattering light detection optical path

如图 1(b)所示,由分布式反馈激光器(DFB-FL)发出的连续光,经过声光调制器(AOM)调制,形成一束光频率为  $f$ 、脉冲宽度为  $W$  的高相干脉冲光。当  $t = 0$  时,从环形器处注入光纤,探测器接收的光场可表示为

$$E(t) = \sum_{k=1}^N \alpha_k \cos[2\pi f(t - \tau_k)] \text{rect}\left(\frac{t - \tau_k}{W}\right), \quad (2)$$

式中:  $\alpha_k$  为光场振幅;  $\tau_k$  为输入端到光纤位置  $k$  的往返时间。当  $0 \leq [(t - \tau_k)/W] \leq 1$  时,矩形函数  $\text{rect}[(t - \tau_k)/W] = 1$ ,其他情况  $\text{rect}[(t - \tau_k)/W] = 0$ 。

在  $k$  位置施加扰动信息  $\Delta\varphi$  时,探测器在  $t$  时刻得

到的光场可表示为

$$E(t) = \sum_{k=1}^N \alpha_k \cos[2\pi f(t - \tau_k) + \Delta\varphi] \text{rect}\left(\frac{t - \tau_k}{W}\right), \quad (3)$$

### 2.2 线性扫频调制方法

激光调制系统原理图如图 2 所示,激光器发射光场  $E_a$  可表示为

$$E_a = E_1 \exp(j2\pi f_c t + j\varphi_0), \quad (4)$$

式中:  $\varphi_0$  为本振相移;  $f_c$  为载波光的频率;  $E_1$  为发射光场振幅。

经过电光调制<sup>[15-16]</sup>器调制后的光场  $E_b$  可表示为

$$E_b = E_2 \exp(j2\pi f_c t + j\pi K t^2), \quad (5)$$

式中:  $E_2$  为电光调制后光场振幅;  $K$  为线性扫频斜率,

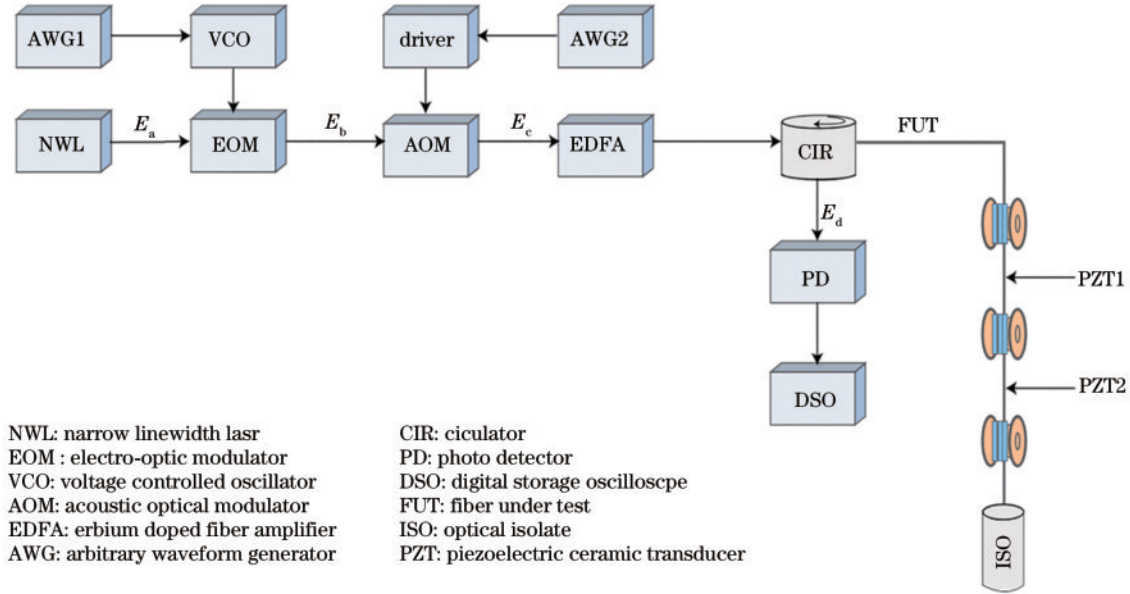


图 2 调制系统的原理图

Fig. 2 Schematic diagram of modulation system

其由锯齿波斜率来决定,锯齿波信号由函数发生器生成。扫频信号起始频率为  $f_0$ ,扫频范围为  $f_0 + B$ ,扫频周期为  $T$ ,扫频速率  $K = B/T$ 。

经过声光调制器调制后光场  $E_c$  可表示为

$$E_c = E_0 \text{rect}(t/T) \exp(j2\pi f_c t + j\pi K t^2), \quad (6)$$

式中,  $\text{rect}(t/T)$  为矩形函数;  $E_0$  为声光调制后光场振幅。

调制后产生的线性扫频信号<sup>[17]</sup>经环形器注入待测光纤,产生瑞利散射,其中后向瑞利散射信号经环形器传输至光电探测器。根据背向瑞利散射模型,其回波信号  $E_d$  的光场可表示为

$$E_d = E_0 r \exp(-acT_x/n) \text{rect}[(t - T_x)/T] \cdot \exp[j2\pi f_c(t - T_x) + j\pi K(t - T_x)^2 + j\varphi_x], \quad (7)$$

式中:  $a$  为衰减系数;  $r$  为瑞利散射系数;  $c$  为真空中的光速;  $n$  为折射率;  $T_x$  为从激光源到光纤中  $x$  位置的脉冲往返时间;  $\varphi_x$  为在  $x$  位置检测的相位信息。最后通过示波器完成信号采集<sup>[18-19]</sup>。

### 2.3 线性扫频参数确定

实验对微地震信号进行检测,频率范围在 200~1600 Hz 之间。微震波属于声波,而声波可被认为成一种压力波,声压可改变光纤的折射率,进而改变光纤中的相位<sup>[20]</sup>。

微震信号的获取是通过压裂作业,在压裂作业过程中,产生的新裂缝会发出微震波并沿地层传播,当微震波传递到地表时,分布式光纤传感系统会通过地面耦合结构接收到振动信号,此时光纤测线中传递的瑞利后向散射光会被振动信号调制,调制产生的带有微地震信息的瑞利散射光将传递到信号处理系统并转换成电信号,最后进行显示分析。

一般分布式光纤系统的空间分辨率  $D_s$  可表示为

$$D_s = \frac{cW}{2n_f}, \quad (8)$$

式中:  $W$  为脉冲宽度;  $n_f$  为光纤折射率。较窄的脉冲可获得较高的空间分辨率,但脉冲越窄,信噪比越低,所以需要缩短传感距离来获得更高的信噪比,因此高空间分辨率与传感距离相互矛盾。本系统采用线性扫频脉冲调制的方法,其后续可选用压缩脉冲匹配滤波的方式进行解调,其空间分辨率  $R$  由扫频脉冲范围  $B$  决定,  $R$ <sup>[21-22]</sup> 可表示为

$$R = \frac{c}{2nKT} = \frac{c}{2nB}. \quad (9)$$

由式(9)可知,增大扫频脉冲范围可提高空间分辨率,且不会降低系统的信噪比。增大扫频范围可使系统有更高的空间分辨率<sup>[23-24]</sup>,但扫频范围的增大会延长扫频时间,影响系统的灵敏度。为降低仪器低频噪声因素的影响,系统采用高频信号进行扫频。考虑采集信号仪器的带宽影响,扫频脉冲范围选择扫频范围为 5.6~5.8 GHz,扫频时间为 2  $\mu$ s 的线性扫频脉冲进行距离为 10 km 的分布式光纤传感实验。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 仿真实验

采用 Matlab 软件进行仿真实验,根据上文选择线性调频范围为 5.6~5.8 GHz(扫频宽度为 200 MHz)的扫频信号进行调制仿真,扫频时间为 2  $\mu$ s。扫频信号时域输出波形如图 3 所示,扫频信号为正弦波形,频率随时间呈线性变化。

回波信号幅值数值仿真通过 Matlab 软件完成,数值仿真的相关数据如表 1 所示。

回波信号强度数值仿真如图 4 所示。随着传感距

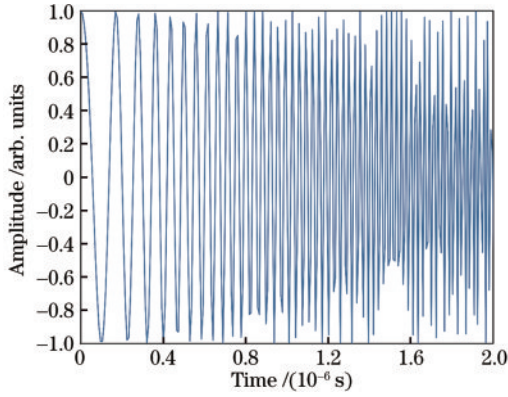


图 3 线性扫频信号时域波形图

Fig. 3 Time domain waveform of linear sweep signal

表 1 数值仿真参数

Table 1 Numerical simulation parameters

Parameter	Value
Index of refractive $n$	1.45
Fiber length $L$ / km	10.00
Initial sweep frequency $F$ / GHz	5.60
Sweep time $T$ / $\mu$ s	2.00
Sweep range $B$ / MHz	200.00
Power attenuation coefficient $S$ / (dB $\cdot$ km $^{-1}$ )	0.20

离的增大,回波信号的幅值逐渐下降。当传感距离达到 10 km 时,回波信号强度约为原始信号的千分之一。为确保更好地采集有效信号,应保证有光纤初始端的入射信号强度在适当范围之内。

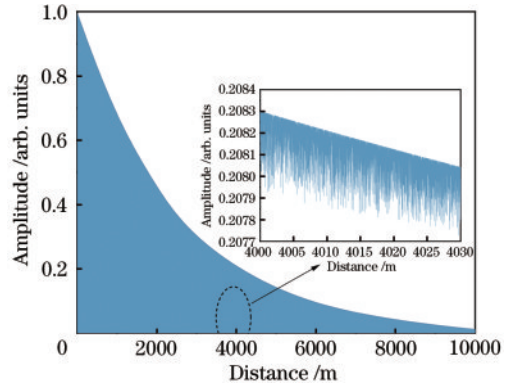


图 4 回波信号强度随传感距离变化图

Fig. 4 Echo signal strength versus sensing distance

### 3.2 实验验证

采集微震波信号的光学调制系统如图 5 所示。光纤中的瑞利散射强度与波长的四次方成正比,在波长为 1550 nm 时,瑞利背向散射光强度最高,因此实验系统选用中心波长为 1550 nm、线宽约为 10 kHz 的窄线宽激光器作为光源。激光通过电光调制与声光调制形成线性扫频脉冲光:电光调制器(EOM)选用 Optilab Optilab IM-1550-12-PM 调制器,其射频输入由压控振荡器控制,压控振荡器(VCO)的输入电压由函数发生器控制;声光调制器(AOM)主要起到调整波形的作用,由函数发生器(AWG)施加信号给声光调制器驱动进行控制。线性扫频脉冲光经过光纤放大器(EDFA)放大后由环形器进入 10 km 测试光纤。测试光纤选用康宁单模光纤(G. 652D),通过压电陶瓷(PZT)在光纤

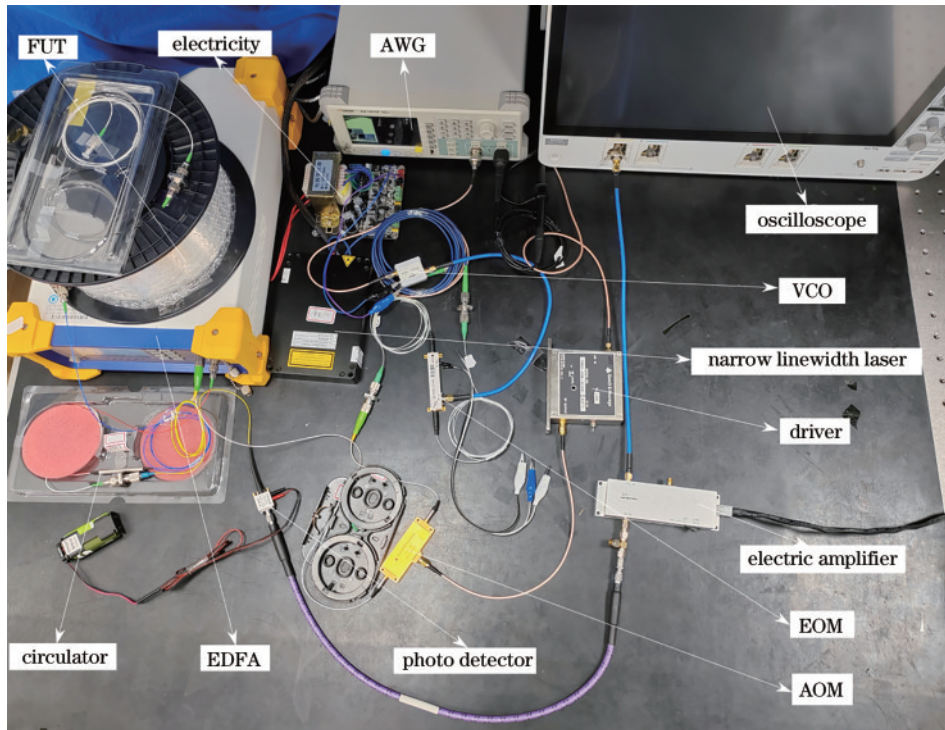


图 5 调制系统结构图

Fig. 5 Modulation system structure diagram

不同位点施加扰动,扰动信号频率范围为微震信号的频率范围(200~1600 Hz)。后向散射光信号经测试光纤进入环形器,再传输到光电探测器(Finisar XPDV3120),光电探测器输出的电信号经放大器后通过示波器(MSO64,采样率为 25 GSa/s)进行数据采集以及波形显示。

在待测光纤尾部施加扰动后,回波信号通过光电探测器将光信号转化为电信号,由示波器检测。电信号的时域波形如图 6 所示,信号电压最高可达到 2 mV。

将时域波形转化为频域分析,由图 6 可知,在不同时间采集到时域信号波动变化情况基本稳定。图 7 为

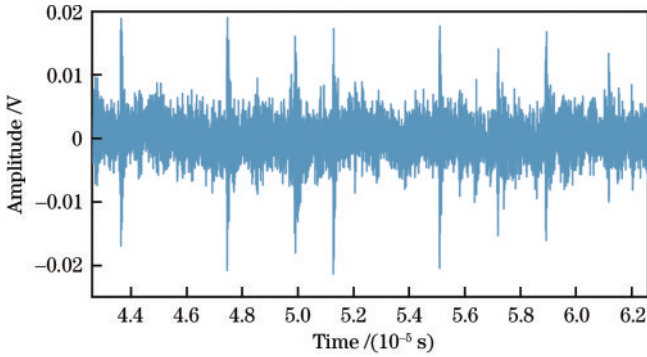


图 6 回波信号时域波形图  
Fig. 6 Time domain waveform of echo signal

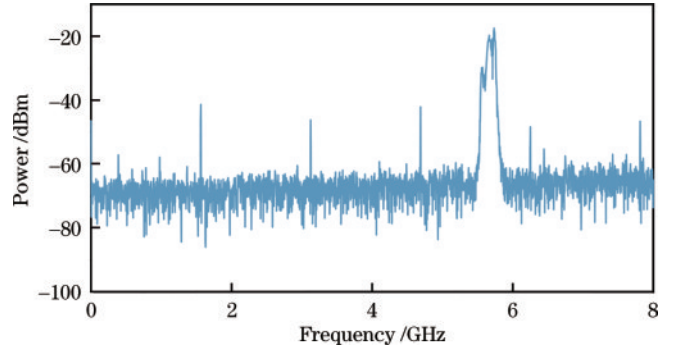


图 7 线性扫频信号频域波形图  
Fig. 7 Frequency domain waveform of linear sweep signal

扫频信号的频域显示,信号强度最高值达到 -20 dBm,频率变化范围为 5.6~5.8 GHz。

图 8 为不同时间回波信号即向后瑞利散射信号的频率分布,其中虚线圈出部分为有效信号,图 8(a)为未经放大的回波信号,信号强度小于 -80 dBm,图 8(b)~图 8(d)为放大后的回波信号,信号强度变化范围约为 -60~-50 dBm。图 8 中各图低频部分(0~2 GHz)信号能量过高,电路中的低频噪声信号过多,因此选用高频率的扫频信号,可减少低频噪声的影响,但高频信号处理过程相对复杂且对仪器性能要求严格,系统成本高,故选用适中的频率进行扫频。

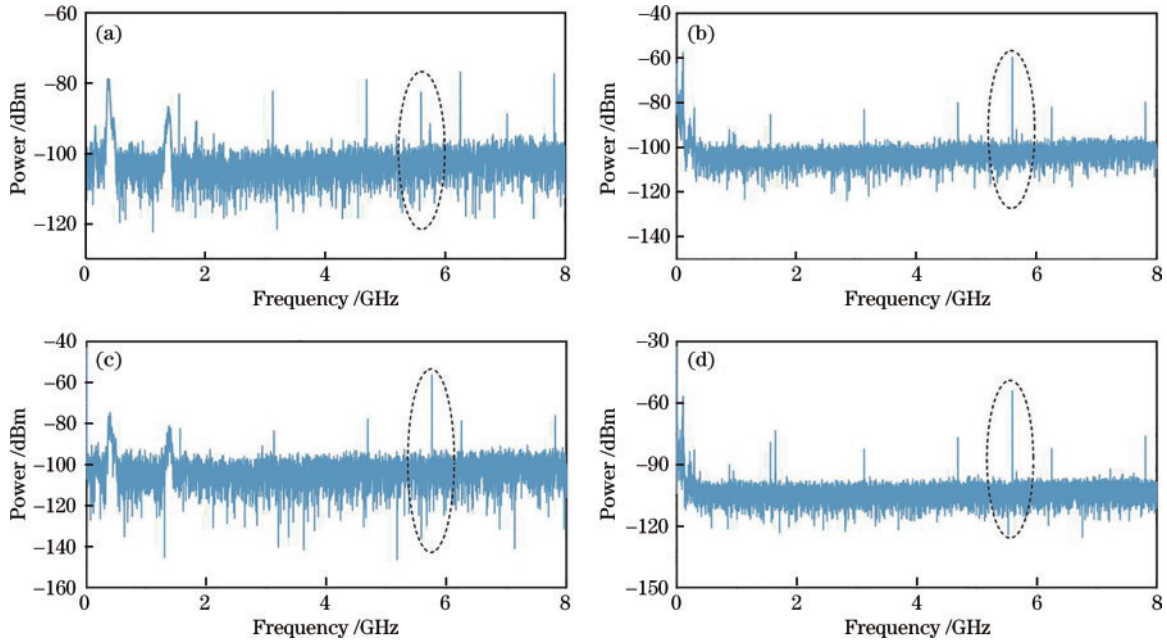


图 8 回波信号频域波形图。(a)未经放大的回波信号频域波形;(b)(c)(d)不同时间放大后的回波信号频域波形  
Fig. 8 Frequency domain waveform of echo signal. (a) Unamplified echo signal frequency domain waveform; (b) (c) (d) frequency domain waveform of echo signal amplified at different times

此外,在页岩气开采过程中,微震波信号较为微弱,选择高频调制信号更利于波形信息的采集,保证后续信息处理的准确性。实验选择合适的扫频范围

(5.6~5.8 GHz),在该范围内可以更方便地采集所需信息,噪声影响因素较小,且处理过程相对简单即排除低频干扰即可完成,降低后续信息处理的复杂性。

## 4 结 论

页岩气微震分布式光纤检测技术其关键在于压裂作业中微震波信号的采集。分布式光纤检测技术作为新一代微震检波器,与以往的模拟检波器和数字检波器等电学检波器不同的是分布式光纤检波器具有体积小、抗电磁干扰能力强、耐腐蚀、灵敏度高、无源、可分布式测量等优点,一根光纤即可采集到丰富的微震信号。介绍了一种微震信号调制系统,用调制后的扫频脉冲光获取微震信号,选择合适的扫频脉冲光,完成信号的调制。实验使用高频信号进行调制,一方面避免了低频噪声信号的干扰,另一方面与雷达测量原理结合,在获得更加完整的微弱信号,选择扫频范围为 5.6~5.8 GHz,扫频时间为 2  $\mu$ s 的扫频信号,完成了 10 km 的传感。现阶段本系统完成了实验验证,后续将通过压裂作业产生微震波,进一步优化系统功能,实现对页岩气的勘测开发。

### 参 考 文 献

- [1] 孙琪真, 范存政, 李豪, 等. 光纤分布式声波传感技术在石油行业的研究进展[J]. 石油物探, 2022, 61(1): 50-59, 77.  
Sun Q Z, Fan C Z, Li H, et al. Progress of research on optical fiber distributed acoustic sensing technology in petroleum industry[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2022, 61(1): 50-59, 77.
- [2] 文雪康, 袁莹, 唐建明, 等. 速度、加速度检波器在超深层地震勘探中应用效果分析: 以川南赤水地区为例[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(4): 1489-1496.  
Wen X K, Yuan Y, Tang J M, et al. Analysis and application of velocity and acceleration geophone in ultra deep seismic exploration: a case study of Chishui area in South Sichuan Basin[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(4): 1489-1496.
- [3] Mizuno Y, Theodosiou A, Kalli K, et al. Distributed polymer optical fiber sensors: a review and outlook[J]. Photonics Research, 2021, 9(9): 1719-1733.
- [4] Bao X Y, Chen L. Recent progress in distributed fiber optic sensors[J]. Sensors, 2012, 12(7): 8601-8639.
- [5] Tu G J, Zhang X P, Zhang Y X, et al. The development of an  $\Phi$ -OTDR system for quantitative vibration measurement[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(12): 1349-1352.
- [6] 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.  
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.
- [7] Ding Z Y, Wang C H, Liu K, et al. Distributed optical fiber sensors based on optical frequency domain reflectometry: a review[J]. Sensors, 2018, 18(4): 1072.
- [8] 马喆, 王逸璇, 江俊峰, 等. 光纤分布式声传感的动态范围扩展方法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306008.  
Ma Z, Wang Y X, Jiang J F, et al. Research on dynamic range expansion method of fiber-optic distributed acoustic sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306008.
- [9] Taylor H F, Lee C. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: US5194847[P]. 1993-03-16.
- [10] Yang G Y, Fan X Y, Wang S, et al. Long-range distributed vibration sensing based on phase extraction from phase-sensitive OTDR[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(3): 6802412.
- [11] Lu B, Pan Z Q, Wang Z Y, et al. High spatial resolution phase-sensitive optical time domain reflectometer with a frequency-swept pulse[J]. Optics Letters, 2017, 42(3): 391-394.
- [12] Jousset P, Reinsch T, Ryberg T, et al. Dynamic strain determination using fibre-optic cables allows imaging of seismological and structural features[J]. Nature Communications, 2018, 9: 2509.
- [13] 王昌, 尚盈, 王晨, 等. 分布式光纤声波地震波勘探技术[J]. 山东科学, 2021, 34(4): 1-8.  
Wang C, Shang Y, Wang C, et al. Distributed optical fiber acoustic seismic wave exploration technology[J]. Shandong Science, 2021, 34(4): 1-8.
- [14] 尚盈, 王晨, 倪家升. 分布式光纤传感技术与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2021: 9-22.  
Shang Y, Wang C, Ni J S. Distributed optical fiber sensing technology and application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2021: 9-22.
- [15] Lin J T, Farajollahi S, Fang Z W, et al. Electro-optic tuning of a single-frequency ultranarrow linewidth microdisk laser[J]. Advanced Photonics, 2022, 4(3): 036001.
- [16] Xie Z D, Zhu S N. LiNbO<sub>3</sub> crystals: from bulk to film[J]. Advanced Photonics, 2022, 4(3): 030502.
- [17] 董毅, 谢玮霖, 冯宇祥, 等. 延迟自外差锁相控制的激光线性扫频技术及其应用[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306003.  
Dong Y, Xie W L, Feng Y X, et al. Laser linear sweep frequency technique based on delay self-heterodyne optical phase locking and its application[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306003.
- [18] Fernández-Ruiz M R, Costa L, Martins H F. Distributed acoustic sensing using chirped-pulse phase-sensitive OTDR technology[J]. Sensors, 2019, 19(20): 4368.
- [19] Fernández-Ruiz M R, Soto M A, Williams E F, et al. Distributed acoustic sensing for seismic activity monitoring[J]. APL Photonics, 2020, 5(3): 030901.
- [20] Wang K, Tian H C, Meng F, et al. Fiber-delay-line-referenced optical frequency combs: three stabilization schemes[J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(2): 021204.
- [21] Zou W W, Yang S, Long X, et al. Optical pulse compression reflectometry: proposal and proof-of-concept experiment[J]. Optics Express, 2015, 23(1): 512-522.
- [22] 申江江, 何懿, 于志军, 等. LFM CW 雷达频率源扫频线性度与距离分辨率研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(11): 95-99.  
Shen J J, He X, Yu Z J, et al. Analysis of frequency sweep linearity error and range resolution of LFM CW

- radar[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(11): 95-99.
- [23] 宋俊辰, 李跃华, 张宗毅. 基于 LFM 的雷达多目标检测研究[J]. 微波学报, 2021, 37(S1): 130-133.
- Song J C, Li Y H, Zhang Z Y. Research on radar multi-target detection based on LFM[J]. Journal of Microwaves, 2021, 37(S1): 130-133.
- [24] 唐健冠, 刘宇哲, 李成立, 等. 基于超弱光纤布拉格光栅的高信噪比分布式振动传感系统[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306014.
- Tang J G, Liu Y Z, Li C L, et al. Distributed vibration sensing system with high signal-to-noise ratio based on ultra-weak fiber Bragg grating[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306014.