

文章编号:1001-5078(2024)09-01366-07

· 激光应用技术 ·

## 异步传输模式下电路探测激光回波信号增强

冯宇<sup>1,2</sup>, 许超<sup>2</sup>, 黄兴<sup>2</sup>, 马伟哲<sup>2</sup>, 刘效禹<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学, 湖北 武汉 430074; 2. 国网辽宁省电力有限公司信息通信分公司, 辽宁 沈阳 110006)

**摘要:** 激光回波信号是电路探测传输的常用信号, 信号强度是保障集成电路探测效果的关键, 因此提出大数据异步传输模式下的电路探测激光回波信号增强方法。利用多权重混合分布模型消除激光回波信号的背景噪声; 根据异步传输模式的通信方式, 建立激光回波信号接收机, 接收保留完整信号信元; 利用整形脉冲信号处理方法完成信号累积和自适应匹配滤波, 实现大数据异步传输模式下电路探测激光回波信号的增强。实验结果表明, 所提方法的信号增强结果在任意波长处的能量和光谱强度均较高。

**关键词:** 电路探测; 激光回波信号; 去噪; 异步传输模式; 整形脉冲信号处理

**中图分类号:** TN247; P274 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.09.005

## Enhanced laser echo signal in circuit detection under asynchronous transmission mode

FENG Yu<sup>1,2</sup>, XU Chao<sup>2</sup>, HUANG Xing<sup>2</sup>, MA Wei-zhe<sup>2</sup>, LIU Xiao-yu<sup>2</sup>

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074 China;

2. Information and Communication Branch of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China)

**Abstract:** Laser echo signal is a commonly used signal for circuit detection and transmission, and the signal strength is the key to ensure the detection effect of integrated circuits. Therefore, a method for enhancing circuit detection laser echo signal in asynchronous transmission mode of large data is proposed. The background noise of the laser echo signal is eliminated by using the multi-weight mixture distribution model. According to the communication mode of asynchronous transmission mode, a laser echo signal receiver is established to receive and retain complete signal cells. Using shaping pulse signal processing methods to complete signal accumulation and adaptive matched filtering, the enhancement of circuit detection laser echo signals in asynchronous transmission mode of large data is realized. Experimental results show that the signal enhancement results of the proposed method have high energy and spectral intensity at any wavelength.

**Keywords:** circuit detection; laser echo signal; denoising; asynchronous transmission mode; shaping pulse signal processing method

### 1 引言

激光回波信号<sup>[1]</sup>是半导体集成电路探测的常

用信号。大数据异步传输模式下的电路探测激光回波信号由于波长差异, 脉冲频率容易出现衰减, 降低

**基金项目:** 国网辽宁电力科技项目 (No. 2020YF-7); 国家电网有限公司科技项目 (No. 2021YF-86); 湖北省自然科学基金项目 (No. 2020CFB377) 资助。

**作者简介:** 冯宇 (1990 -), 男, 硕士研究生, 中级工程师, 研究方向为电力信息通信传输和物联网技术。E-mail: kc7457445@yeah.net

**收稿日期:** 2023-12-08; **修订日期:** 2024-01-19

整体探测完成度,因此需要进行电路探测激光回波信号增强。

席崇宾<sup>[2]</sup>等人通过激光多普勒测速仪获取激光回波信号。利用品质因子增强技术提升信号的光束腰斑位置,完成激光回波信号增强。该方法的信号增强结果在任意波长处的能量较低。林铮<sup>[3]</sup>等人结合固体直接采样技术和电离技术,利用激光解吸/激光后电离质谱模型实现激光回波信号的增强。该方法未消除激光回波信号的背景噪声,信号信噪比较低。朱志峰<sup>[4]</sup>等人通过激光诱导光谱技术探测激光回波信号光谱元素,利用 LIBS 光谱方法实现激光回波信号的增强。该方法未对信号进行自适应滤波,能量增强效果不理想。

为了解决上述方法中存在的问题,增强信号能量,提出大数据异步传输模式下的电路探测激光回波信号增强方法。

## 2 激光回波信号去噪

用于电路探测的激光回波信号通常受到集成电路跨阻半导体激光器<sup>[5]</sup>中散射噪声高斯光波<sup>[6]</sup>的干扰。若直接增强未经处理的激光回波信号,最终获取的信号增强结果极大可能受到背景噪声的影响,存在信号增强效果差、信号增强质量不稳定等问题。为了避免噪声干扰导致激光回波信号增强效率下降,在对激光回波信号有效增强前,需先消除激光回波信号的背景噪声。消除激光回波信号背景噪声主要包括构建多权重混合分布模型<sup>[7]</sup>和去噪两个部分。

### 2.1 多权重混合分布模型

独立分量分析是基于集成电路跨阻半导体激光信号时域及频域先验知识的冗余噪声统计算法,因为激光回波信号的独立或近独立性指标均能与该算法在横、纵观测向量上统一,因此在消除激光回波信号背景噪声时,通常采用优势较为明显的独立分量分析。利用独立分量分析获取激光回波信号中与背景噪声相关的噪声频波。每单位激光回波信号的噪声频波相互独立,可以在小波变换的作用下叠加,经过叠加的多组噪声频波在二维观测面内呈现近似服从高斯分布,且噪声频波粒子能够在粒子滤波算法的作用下聚合,组成多权重混合分布模型。利用独

立分量分析获得的噪声频波表达式如下<sup>[8]</sup>:

$$Q = \alpha \cdot r + k(n) \quad (1)$$

式中,  $Q$  表示获取的噪声频波;  $\alpha$  表示独立分量分析常数;  $r$  表示噪声频波获取系数;  $k(n)$  表示噪声频波获取误差;  $n$  为频波获取数量。

基于上式噪声频波利用小波变换进行叠加的表达式如下<sup>[9]</sup>:

$$W = -\frac{1}{b} \ln\left(\frac{t^2 Q}{2\pi\beta}\right) \quad (2)$$

式中,  $W$  表示噪声频波小波叠加结果;  $b$  表示小波变换常数;  $\beta$  表示噪声频波叠加系数;  $t^2$  表示噪声频波叠加误差。

利用粒子滤波方法聚合激光回波信号的多组噪声频波,表达式如下:

$$E(W) = \sum_{m=0}^4 \frac{1}{m} [f'(W) - g'(W)] \quad (3)$$

式中,  $m$  表示粒子滤波常数;  $f'(W)$  表示噪声频波粒子聚合函数;  $g'(W)$  表示噪声频波粒子聚合误差。由于多组噪声频波在二维观测面内,因此粒子滤波常数最大值为 4。

由上式组成多权重混合分布模型  $Y$  的表达式如下:

$$Y = y^{-\tau W} + E(W)v \quad (4)$$

式中,  $y^{-\tau W}$  表示多权重混合分布模型的噪声频波粒子权重;  $v$  表示噪声频波粒子量。由此基于多权重混合分布模型分析噪声频波,提取噪声频波分布特征,便于后续去噪。

### 2.2 去噪

激光回波信号的去噪过程建立在多权重混合分布模型成功建立的基础上。快速 ICA 算法又称快速固定点 ICA 算法,其对多权重混合分布模型的去噪实际上是利用白化去均值相关性权重最高的(最贴合噪声频波粒子)的源信号结合噪声频波粒子,简化激光回波信号独立分量的提取过程。经过快速 ICA 算法迭代结合的噪声频波粒子的近似负熵大幅度下降,远远小于非线性函数  $G$  的最低阈值,失去信号干扰能力,迭代判断信号是否处于噪声分量置零的失效状态,直到达到条件,则激光回波信号的噪声消除成功。将快速 ICA 算法加入到多权重混合分布模型中,信号消除结果表达式如下:

$$U = Yd[1 - z^{1/\rho}] \cdot [s y^{-\tau w} - \partial] \quad (5)$$

式中,  $d$  表示快速 ICA 常数;  $z$  表示源信号结合系数;  $\partial$  表示源信号结合误差;  $s$  表示最贴合噪声频波粒子的源信号相关性权重;  $\rho$  表示噪声频波粒子结合后的近似负熵, 利用公式(5)实现噪声去除时, 迭代判断其是否满足信号分量去均值置零状态, 判断条件为:

$$\rho < \Delta T = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2\sigma^2 d}{\sqrt{U}} \quad (6)$$

式中,  $\sigma$  表示非线性函数  $G$  的系数;  $\Delta T$  表示非线性函数的阈值。通过迭代判断获得激光回波信号去噪结果  $U$ , 作为后续增强的基础信号。

### 3 电路探测激光回波信号的增强

#### 3.1 构建激光回波信号接收机

经过上节去噪处理后的激光回波信号想要在大数据异步传输模式下增强, 需要建立符合异步传输模式通信方式的激光回波信号接收机, 在传输过程中增强信号脉冲能量。

##### 3.1.1 异步传输模式的通信方式

大数据异步传输模式是电路探测信号传输业务高速发展下应运而生的综合服务技术, 可以及时传输大量信号数据。大数据异步传输模式与电路探测属于共生依存的关系, 采用多协议标记交换大数据信号传输方式。

传输节点接口是异步传输模式通信服务的核心, 以信号为综合需求传输形式的电路探测业务在此处汇集, 并通过虚拟通道传送至 B-ISDN 操作子层, 完成对应通信业务。异步传输模式的电路探测节点接口主要包括信元和字节两种结构。其中, 信元根据信号过载量又被细分为高级信元和低级信元两种类型, 且两种类型的信元均负责把控电路探测流畅时的业务质量。当电路探测堵塞时, 电路探测节点接口根据 SINS/GPS 在线对准方法优先舍弃低级信元, 以保证电路探测业务的高效分配, 避免因信号过载丢失信号信元。SINS/GPS 在线对准系数的表达式如下:

$$H = \eta_u^2 \left[ \frac{1}{f_u} (x + 2\omega) \right] \quad (7)$$

式中,  $\eta_u$  表示激光回波信号  $U$  的低级信元舍弃系数;  $f_u$  表示激光回波信号  $U$  的高级信元保留系数;  $x$

表示低级信元舍弃误差;  $\omega$  表示高级信元舍弃误差。

电路探测节点接口的字节类似虚通路传输链路上的中继站, 主要负责接收在线对准过关的信号  $H$ , 并参照连接映像表将信号映射成新的符合管理面板传输效应的标识信号。ATM 适配层通过读取标识信号携带的综合需求, 实现大数据异步传输模式下的业务通信。

##### 3.1.2 激光回波信号接收机

已知电路探测节点接口在异步传输模式的通信方式中起到举足轻重的作用, 利用光纤布拉格光栅反射谱峰值检测算法分别测量电路探测节点接口信元能够容纳的最大动态信号量, 并通过最大动态信号量获得移动可见光通信接收机的容量代价, 利用 Chirp 信号参数估计算法求解。后续激光回波信号的接收能够限制在该代价状态之下, 以保证在线对准过关的信号  $H$  接收过程的灵敏度。光纤布拉格光栅反射谱峰值检测算法的表达式如下:

$$\delta = \frac{KH}{\cos \phi (1 + \sin \theta)} \quad (8)$$

式中,  $\phi$  表示光纤布拉格光栅反射谱幅值;  $\theta$  表示反射谱中心波长的偏移角;  $\delta$  表示信元所能容纳的最大动态信号量,  $K$  表示光栅折射率。

移动可见光通信接收机的容量代价表达式如下:

$$F = \arctg \left[ \frac{(\delta + 1)}{\Delta S} + |\lambda|^2 \right] \quad (9)$$

式中,  $\Delta S$  表示移动可见光通信接收信道;  $\lambda$  表示移动可见光通信接收机的权重;  $\arctg$  为容量代价函数。

利用 Chirp 信号参数估计算法求解公式(9)中的权重  $\lambda$ , 表达式如下:

$$\lambda = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \frac{(x_n - x_m)}{q} \right]^2 \quad (10)$$

式中,  $q$  表示 Chirp 信号参数估计常数;  $x_n$  表示信号参数调节系数;  $x_m$  表示信号参数调节误差。

在容量代价状态之下移动可见光通信接收机中添加业务调度方法, 使移动可见光通信接收机从初始信号接收装置转化为激光回波信号针对性接收装置, 实现激光回波信号接收机构建, 业务调度后接

收机高灵敏度接收的信号表达式如下:

$$G = FR + \exp \frac{l}{2} \quad (11)$$

式中,  $R$  表示业务调度匹配系数;  $l$  表示激光回波信号接收机的接收解调系数。

由此将激光回波信号接收机与异步传输模式结合,使激光回波信号能够在异步传输模式中被灵敏接收保留完整信号信元,方便后续大数据异步传输模式下激光回波信号的增强。

### 3.2 激光回波信号的增强

将上节异步传输模式下的电路探测激光回波信号作为信号增强的对象,利用整形脉冲信号处理方法实现大数据异步传输模式下电路探测激光回波信号的增强,其具体操作步骤主要包括信号累积和自适应匹配滤波。

#### 3.2.1 信号累积

相较于通讯分量较大的其他信号,用于电路探测的激光回波信号想要完成探测任务,仅需要传输少量信号即可,这说明电路探测激光回波信号本身就具有高效的传输能力。异步传输模式下的激光回波信号想要在原始基础上进一步提升信号强度,需要先获取满足增强条件的信号分量,然而异步传输模式下的激光回波信号并不总处于增强效果显著的高分量周期,因此需要借助电磁干扰处理技术加快周期运转,不断累积激光回波信号,直至信号分量满足增强差分周期。电磁干扰处理技术后的累积激光回波信号表达式如下:

$$A_v = \sum_{v=1}^L G_v \ln v h \quad (12)$$

式中,  $G_v$  表示激光回波信号  $G$  的三阶电磁干扰累积分量;  $v$  表示快速运转周期;  $h$  表示周期快速运转频差;  $L$  表示高斯差分周期。对获得的累积信号进行滤波,完成增强。

#### 3.2.2 自适应匹配滤波

在成功累积满足信号增强条件的激光回波信号后,利用自适应匹配滤波增强激光回波信号,其具体过程如下:利用调制传递函数获取累积信号的幅频特征,再利用自适应匹配滤波将累积信号的幅频特征最大化,当累积信号全部处理完成后,大数据异步传输模式下激光回波信号的增强结束。累积信号

$A_v$  的幅频特征表达式如下:

$$M_i = \sum_{i \neq 0}^v Z(cA_v - k_i) \quad (13)$$

式中,  $Z$  表示调制传递函数;  $c$  表示调制传递的功率谱密度;  $k_i$  表示累积信号幅频特征传递  $i$  周期的误差。

根据幅频特征表,对信号进行自适应匹配滤波增强,表达式如下:

$$N = \sum_{\alpha \in \{0, 1\}} A_v T_\alpha M_i^\rho \quad (14)$$

式中,  $T_\alpha$  表示幅频  $\alpha$  的自适应匹配增强系数;  $\rho$  表示幅频特征最大化倍数;  $c$  表示幅频特征最大化误差。由此完成大数据异步传输模式下的激光回波信号增强,获得增强信号。

## 4 实验与结果

为了验证大数据异步传输模式下的电路探测激光回波信号增强方法的整体有效性,需要对其进行测试。

采用半导体集成电路探测激光器,输出信号通过保偏光纤分束器分为三种信号。移动可见光通信接收机将接收光和本振光通过保偏光纤耦合后输出,经 20bit 的高速 AD 采集记录后送到调试计算机进行处理。将采集到的三种回波信号作为试验对象,试验对象的相关参数如表 1 所示。

表 1 不同类型的激光回波信号

Tab. 1 Different types of laser echo signals

相关参数	具体数值		
	试验对象一	试验对象二	试验对象三
中心波长/nm	2000	2560	3100
输出脉冲峰值功率/kW	50	65	83
脉冲宽度/ns	230	410	460
脉冲重复频率/%	50	89	120
脉冲平均功率/%	10	18	22
光隔离度/dB	36	45	62
输出振幅/V	随机	24	16
输出光纤长度/m	>0.6	>1.4	>2.1
脉冲触发方式	内触发	外触发	内/外触发

检测本文方法的去噪效果,在输出脉冲峰值功率最低的试验对象一信号样本集中加入 30 dB 高斯白噪声,使激光回波被噪声淹没,如图 1 所示。

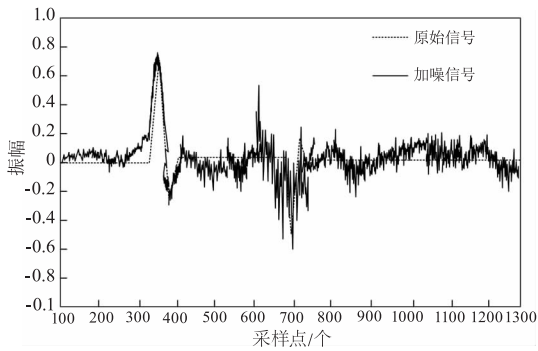


图1 加噪后的通信信号

Fig. 1 Communication signal after adding noise

分别采用本文所提方法、文献[2]方法、文献[3]方法和文献[4]方法对含噪声的激光回波信号去噪,去噪后信号的信噪比结果如图2所示。

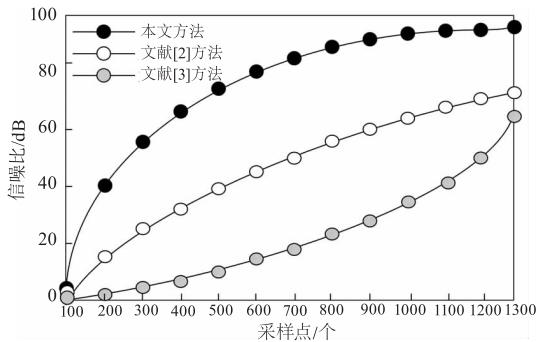


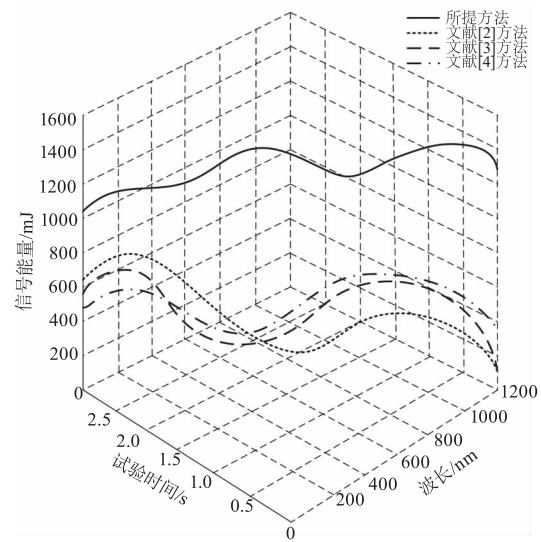
图2 去噪后信噪比结果

Fig. 2 Signal-to-noise ratio results after denoising

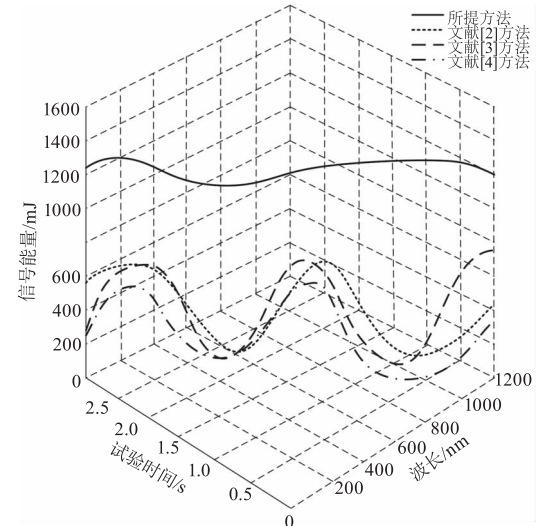
由图2可知,本文方法去噪处理后的激光回波信号输出信噪比高于90 dB,而其他方法的信噪比均低于80 dB,证明本文方法可以有效去噪,为后续增强奠定良好基础。

分别采用本文所提方法、文献[2]方法、文献[3]方法和文献[4]方法增强三种类型的激光回波信号。利用单色仪和光电倍增管在不同波长处记录增强后激光回波信号的能量,并根据记录数据绘制一幅激光回波信号时域图。通过对比信号增强结果在激光回波信号时域图中的变化情况,判断不同方法对激光回波信号的增强性能。激光回波信号时域图如图3所示。

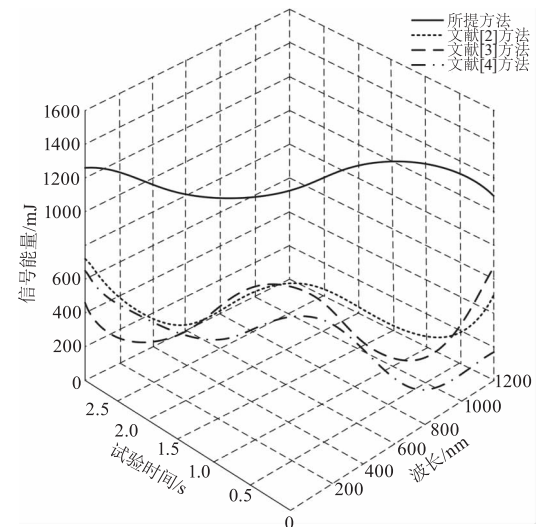
由图3可见,采用所提方法增强三种类型的激光回波信号后,随着试验时间的延长,三种类型的激光回波信号增强结果在不同波长处的能量波动较小,且信号能量在不同波长处均不低于1000 mJ,说明采用所提方法增强激光回波信号后,信号增强结



(a) 试验对象一的激光回波信号时域图



(b) 试验对象二的激光回波信号时域图



(c) 试验对象三的激光回波信号时域图

图3 激光回波信号时域图

Fig. 3 Time domain diagram of laser echo signal

果的能量较高、维持时间较长。这是因为所提方法在增强激光回波信号前,首先对激光回波信号全面去噪。经过去噪的激光回波信号不仅能够避免由于外界因素干扰而导致的增强效果不理想的问题,还能使后续激光回波信号的增强工作事半功倍。采用文献[2]方法、文献[3]方法和文献[4]方法增强三种类型的激光回波信号后,随着试验时间的延长,三种类型的激光回波信号在不同波长处的能量波动较大,且信号能量在不同波长处均不超过 800 mJ,说明采用文献[2]方法、文献[3]方法和文献[4]方法增强激光回波信号后,三者信号增强结果的能量较低、维持时间较短。经上述对比可知,所提方法对激光回波信号的增强效果明显优于传统方法。

为了进一步验证所提方法的实用性,现分别采用所提方法、文献[2]方法、文献[3]方法和文献[4]方法增强试验对象一的激光回波信号,并利用光纤光谱仪记录信号增强结果在不同波长处的光谱强度,通过对比信号增强结果的光谱强度,判断不同方法对激光回波信号的增强性能。信号增强结果的光谱强度如图 4 所示。

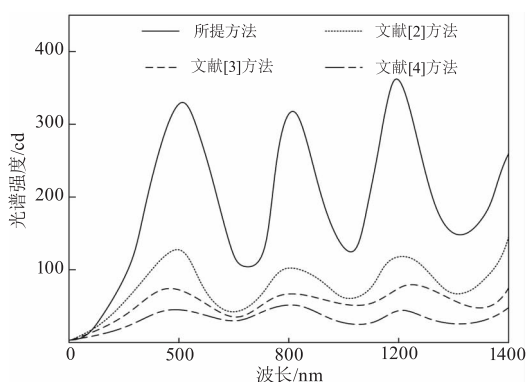


图 4 信号增强结果的光谱强度

Fig. 4 Spectral intensity of the signal enhancement results

可见,采用所提方法增强激光回波信号,其信号增强结果的光谱强度在任意波长均不低于 200 cd,而采用文献[2]方法、文献[3]方法和文献[4]方法增强激光回波信号,三者信号增强结果的光谱强度在任意波长均不超过 150 cd,与所提方法存在较大差距。经上述对比,进一步验证了所提方法对激光回波信号的增强效果更好。

## 5 结 语

异步传输模式作为常见的通信网综合需求服

务技术,主要通过激光回波信号的实时传输实现综合需求的全面应答,想要提高异步传输模式的通信能力,需要从增强激光回波信号入手。为此,本文提出了异步传输模式下电路探测激光回波信号增强方法。通过去噪避免了背景噪声对信号处理的干扰,再根据激光回波信号的特征设计了激光回波信号接收器,使信号接收质量更好,再使用整形脉冲信号处理方法增强信号,并通过实验验证了该方法可以获得较佳的信号增强效果。如何在保证激光回波信号增强性能的同时,对激光回波信号的增强过程实时监控,是研究人员下一步工作的重点。

## 参考文献:

- [1] Sun Jiaqi, Hu Miao, Li Peng, et al. Echo signals analysis of side-scattering LiDAR under different wind speed conditions[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(4): 53-60. (in Chinese)  
孙佳琦, 胡淼, 李鹏, 等. 不同风速下侧向散射激光雷达的回波信号分析[J]. 光子学报, 2020, 49(4): 53-60.
- [2] Xi Chongbin, Huang Rong, Zhou Jian, et al. Quality factor enhancement technology of laser doppler signal based on liquid lens[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7): 98-106. (in Chinese)  
席崇宾, 黄荣, 周健, 等. 基于液体透镜的激光多普勒信号品质因子增强技术[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 98-106.
- [3] Lin Zheng, Meng Yifan, Wang Tongtong, et al. Laser positionization technique for enhancing signals of high ionization potential elements[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2020, 41(2): 175-180. (in Chinese)  
林铮, 孟一凡, 王彤彤, 等. 激光后电离技术对高电离能元素的信号增强[J]. 质谱学报, 2020, 41(2): 175-180.
- [4] Zhu Zhifeng, Li Bo, Gao Qiang, et al. Multiple discharges-enhanced laser-induced breakdown spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(8): 2633-2637. (in Chinese)  
朱志峰, 李博, 高强, 等. 多次放电的激光诱导击穿光谱信号增强[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(8): 2633-2637.
- [5] Liao Ke, Wang Haoxuan, Xiong Wentao, et al. Study on

- 1550 nm semiconductor lasers used in OTDR[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2020, 41(2): 159 – 163. (in Chinese)
- 廖柯, 王昊璇, 熊文涛, 等. 一种用于光时域反射仪的1550nm 半导体激光器[J]. *半导体光电*, 2020, 41(2): 159 – 163.
- [6] Dang Tingting, Wang Juanfen. Control of Gaussian optical waves in Gaussian parity-time symmetric waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(3): 141 – 148. (in Chinese)
- 党婷婷, 王娟芬. 高斯型 PT 对称波导中高斯光波的控制[J]. *光学学报*, 2020, 40(3): 141 – 148.
- [7] Gou Yepeng, Liu Xing, Guo Jiacong, et al. Pulse laser echo signal separation method based on wavelet analysis [J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(1): 136 – 144. (in Chinese)
- 苟晔鹏, 刘星, 郭甲崇, 等. 基于小波分析的脉冲激光回波信号分离方法[J]. *激光与红外*, 2022, 52(1): 136 – 144.
- [8] Zhu Guanghe, Zhu Zhiqiang, Li Juan. Research on weak fault signal enhancement method of centrifugal compressor based on envelope demodulation[J]. *Machinery & Electronics*, 2022, 40(5): 21 – 24. (in Chinese)
- 朱广贺, 朱智强, 李娟. 基于包络解调的离心式压缩机弱故障信号增强方法研究[J]. *机械与电子*, 2022, 40(5): 21 – 24.
- [9] Tang Zhiguo, Li Yang. Application of improved adaptive parameterless empirical wavelet transform in transformer high frequency partial discharge current noise suppression [J]. *Power System Technology*, 2023, 47(8): 3474 – 3482. (in Chinese)
- 唐志国, 李阳. 改进自适应无参经验小波变换在变压器高频局放电流噪声抑制中的应用[J]. *电网技术*, 2023, 47(8): 3474 – 3482.