

新型微弱受激散射光能量信号检测方法

王坤朋¹ 柴毅¹ 苏春晓² 李华锋¹

(¹重庆大学自动化学院, 重庆 400044
²中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 在激光惯性约束聚变(ICF)受激散射光能量信号的检测中,背景噪声的存在严重影响了有用信息的提取。针对该问题,设计了一种新型的可变参数放大滤波电路(VPAFC),并在降噪源分离(DSS)技术的基础上提出了一种信号降噪方法。采用硬件程控放大、带宽可调滤波以及软件降噪处理相结合的方式,既实现了微弱信号的增益可调放大,又有效抑制了有用信号频带外的噪声和频带内的结构化噪声。为测试所设计电路及噪声抑制算法的有效性,构建了微弱光能量信号检测装置和相关的数据采集系统。实验结果表明,该检测方法不但能程控放大微弱信号,而且当信号低至 $2\ \mu\text{V}$ 时仍能在输出端使信噪比保持在不低于 40 dB 的水平。

关键词 测量;可变增益放大;可调带宽滤波;降噪源分离;微弱信号检测

中图分类号 TP216⁺.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0308006

Novel Method for Detection of Weak Stimulated Scattering Light Energy Signal

Wang Kunpeng¹ Chai Yi¹ Su Chunxiao² Li Huafeng¹

(¹College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China
²Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract In stimulated scattering energy signal detection of inertial confinement fusion (ICF), background noise has a serious impact on the extraction of useful information. Aiming at this issue, a new variable parameters amplification and filtering circuit (VPAFC) is designed, and a denoising method based on denoising source separation (DSS) is proposed. By using variable gain amplifier, bandwidth-adjustable filter and signal noise reduction software, the whole system can not only adapt to the amplitude change of signal in weak signal detection, but also restrain the noise both outside useful signal band and structural interference inside. In order to test the new circuit and the efficiency of the algorithm, a system with weak scattering light energy signal detection device and data acquisition is constructed. Experimental result shows that the system can fit the amplitude change quickly by adjusting parameters online, and its output can keep a signal-to-noise ratio above 40 dB when the input voltage drops to $2\ \mu\text{V}$.

Key words measurement; variable gain amplification; variable bandwidth filtering; denoising source separation; weak signal detection

OCIS codes 040.3060; 140.3460; 120.5820

1 引 言

随着激光惯性约束聚变(ICF)实验复杂程度的提高,为了满足聚变能量平衡的精密诊断需求,对微

弱散射光能量信号精准测量的需求也在日益增加^[1~4]。微弱信号具有幅值小或易受强噪声影响的特点^[5],因此微弱信号经常淹没在传感器的本底噪

收稿日期: 2012-09-18; 收到修改稿日期: 2012-11-29

基金项目: 国家自然科学基金(60974090)资助课题。

作者简介: 王坤朋(1988—),男,博士研究生,主要从事微弱信号检测和统计机器学习等方面的研究。

E-mail: wkphnzk@gmail.com

导师简介: 柴毅(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事智能信息处理、信息融合与控制等方面的研究。

E-mail: cqchaiyi@gmail.com

声或电子电路的固有噪声中。然而传统的放大和滤波手段在放大信号的同时也放大了噪声^[6,7]。只有将弱信号的高增益放大与噪声抑制有机地结合起来,才能有效地提取有用信号^[3,8,9]。

应用电子学、信息学和计算机科学的方法研究噪声源的发生机理以及传播规律,已经在微弱信号检测理论、方法和设备的研究方面取得了大量成果^[3,10~12]。由于检测方法的侧重点不同,微弱信号检测大致可以分为两类,一类是采用硬件滤波或噪声抵消的措施,抑制特定频率的噪声或抵消具有相关性的噪声^[4,13];另一类是采用信息学和计算机科学的手段,进行信号与噪声的相关性分析和软件降噪处理,提高微弱信号的信噪比^[14~18]。然而单纯使用硬件或软件的方法都存在一定的局限性,难以解决微弱信号高增益放大过程中,由幅值变化范围及频谱特征未知引起的放大器增益设置困难和硬件滤波器带宽难以确定的问题。

针对上述问题,本文设计了微弱信号的可变参数放大与滤波电路(VPAFC),并提出了一种基于降噪源分离(DSS)^[19]的软件降噪处理方法。通过对

激光打靶微弱背向散射光能量信号的测量实验,充分显示此系统不但可以通过在线调整相关参数程控放大微弱信号,而且能够有效地抑制微弱信号在高增益放大过程中引入的噪声。

2 微弱信号检测电路

微弱信号检测是一种致力于抑制噪声、提高信噪比的技术^[3,12]。为解决在进行微弱信号高增益放大的过程中,因幅值变化范围或频谱特征未知带来的放大器增益设置困难和硬件滤波器带宽难以确定的问题,设计并实现了一种微弱信号检测电路。

2.1 微弱信号检测电路设计

根据信号程控放大和噪声抑制的要求,设计出具有可变增益放大和可调整带宽滤波功能的微弱信号检测电路,其原理框图如图 1 所示。该电路主要包含高增益程控放大和高衰减率低通滤波两个部分,它们由阻抗匹配、初级程控放大、带宽可调低通滤波、次级双通道固定增益放大、增益与滤波器控制模块和隔离模块构成。

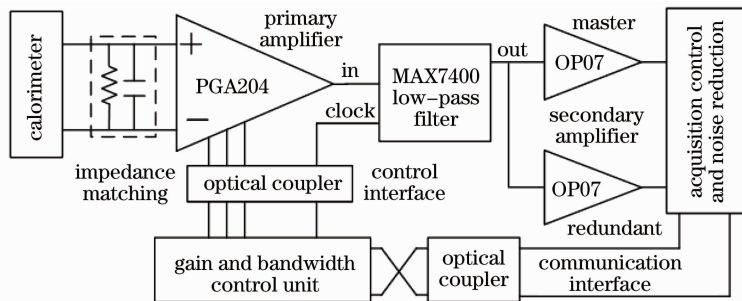


图 1 VPAFC 原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of VPAFC

该电路在信号放大方面,通过采用初级程控放大和次级固定增益放大组合的方式,满足了高增益可调放大的功能需求。其中初级选用具有低噪声、高精度、低漂移性能的仪表用放大器 PGA204,支持 1~1000 倍程控放大;次级采用由运算放大器 OP07 组成的双通道冗余结构,主通道和冗余通道分别为 100 倍和 10 倍放大。冗余输出结构既能避免因增益设置不合理而带来的放大器输出幅值过小或饱和的风险,又能为软件降噪处理提供必要的多通道观测数据。

该电路在信号滤波方面,通过采用硬件可调带宽低通滤波的方式,有效抑制了微弱信号在高增益放大过程中引入的有用信号频带外噪声,其中滤波器选用具有 82 dB 阻带抑制能力的 8 阶可编程低通

开关电容滤波器 MAX7400。通过改变外部时钟信号,实现了 1 Hz~10 kHz 的信号截止频率程控调节。

2.2 增益和带宽控制方法

采用在线更新放大器参数及滤波器截止频率的方法,实现了微弱信号的程控放大和滤波功能。所述的控制流程如图 2 所示。该方法可以通过以下几个步骤来实现。

1) 初始化。设放大器增益集为 $G = \{g_1, g_2, \dots, g_M\}$, 其中, $g_i < g_{i+1}, i = 1, \dots, M-1$, 放大器增益 g_i 可任意选取。滤波器截止频率 F_c 选为最大。

2) 增益调整。设当前的放大器增益为 g_i , 由采集系统得到的一组关于主通道与冗余通道的观测数据为 $X(t) = [x_1(t), x_2(t)]^T, t = 1, 2, \dots, N$, 其中

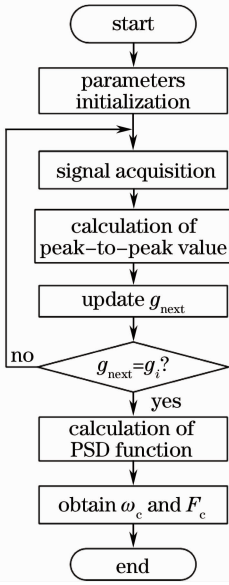


图2 增益和带宽控制流程图

Fig. 2 Flow chart of gain and bandwidth control

$x_i(t), i = 1, 2$, 表示第 i 个通道在时刻 t 处的采样值, 且由观测数据 x_i 的最大值与最小值相减得峰-峰值为 $V_{pp}^{(i)}$, 并可计算出所有通道中最大的峰-峰值为

$$V_{pp} = \max\{V_{pp}^{(1)}, V_{pp}^{(2)}\}, \quad (1)$$

进而由 g_i 和 V_{pp} 确定出下一步的放大器增益为

$$g_{next} = \begin{cases} g_{i-1}, & V_{pp} > 0.9V_{max} \\ g_i, & V_{pp} \in (0.1V_{max}, 0.9V_{max}), \\ g_{i+1}, & V_{pp} < 0.1V_{max} \end{cases} \quad (2)$$

式中 V_{max} 表示放大器允许输出的最大电压。迭代上述过程, 直到 $g_{next} = g_i$ 为止。

3) 确定滤波器截止频率。根据 $X(t)$ 可计算出信号的功率谱密度函数 $S_x(\omega)$, 并由 $S_x(\omega)$ 计算出信号的功率为

$$P_x = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) d\omega. \quad (3)$$

依据带宽的定义可知, 信号功率下降 50% 时的频率点为半功率点, 半功率点之间的频率间隔即是通常所说的一 3 dB 带宽。因此半功率点的角频率 ω_c 可由

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} S_x(\omega) d\omega = \frac{1}{2} P_x \quad (4)$$

求出, 由 ω_c 可最终确定滤波器的截止频率为

$$F_c = \frac{\omega_c}{2\pi}. \quad (5)$$

3 基于 DSS 的软件降噪处理

硬件滤波能够有效抑制信号频带外的噪声, 但

是无法处理有用信号频带内的噪声。针对这种局限性, 在上述微弱信号检测电路的基础上提出了一种基于 DSS^[19] 的软件降噪处理方法。

DSS 作为独立成分分析 (ICA) 技术^[6,20,21] 的一种, 其本质是在未知信号组成结构的情况下, 根据信号的统计特征, 采用不同的降噪函数将复杂信号分解为相互独立的组成分量^[22]。因此, 可采用 DSS 技术实现噪声源的分离, 进而实现对信号的降噪处理。下面给出信号降噪处理方法的理论框架和算法描述。

设有 M 个未知的源信号 $\mathbf{S} = (s_1, s_2, \dots, s_M)^T$, $\mathbf{S} \in \mathfrak{R}^{M \times N}$, 每个单独的源 s_i 包含 N 个采样点。 \mathbf{S} 在信道中以某种未知方式进行混合, 并且由传感器测量得到 M 个观测信号 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_M)^T$, $\mathbf{X} \in \mathfrak{R}^{M \times N}$, 即

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S}, \quad (6)$$

式中 $\mathbf{A} \in \mathfrak{R}^{M \times M}$ 是混合矩阵。信号降噪处理的过程可描述为: 在混合矩阵和源信号未知的情况下, 采用分离矩阵 $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_M)^T$, $\mathbf{W} \in \mathfrak{R}^{M \times M}$, 通过 DSS 方法得到观测信号 \mathbf{X} 的估计 $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_M)^T$, $\mathbf{Y} \in \mathfrak{R}^{M \times N}$, 即

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W}\mathbf{X} = \mathbf{W}\mathbf{A}\mathbf{S}. \quad (7)$$

由中心极限定理可知, 独立随机变量之和的分布趋向于高斯分布, DSS 及 ICA^[6,20,21] 的估计问题可归结为寻找最大非高斯性分量的问题, 度量非高斯性的方法有四阶累积量 (又称峭度) 和负熵^[22]。以负熵为例, 随机变量的负熵越小, 该随机变量越是“随机”, 越难预测和结构化。因此, 采用非高斯性刻画信号结构化的程度是可行的。

然后, 对估计出的独立源信号, 依据信号非高斯性的大小进行排序, 剔除非高斯性较小即随机性大、难以结构化的源信号。对其余的独立源信号, 采用文献^[23]提出的 CORSICA 方法, 以相关系数为准则进行 k -均值聚类, 筛选出结构化的噪声源信号。最终用剩下的独立源信号对观测信号进行重构, 完成对观测信号的降噪处理。具体的算法步骤可描述为:

1) 对观测信号 \mathbf{X} 进行球化预处理得到一个零均值和单位方差的向量 $\mathbf{Z} = (z_1, z_2, \dots, z_M)^T$, $\mathbf{Z} \in \mathfrak{R}^{M \times N}$, 即

$$\mathbf{Z} = \mathbf{V}\mathbf{X}, \quad (8)$$

其中 $\mathbf{V} \in \mathfrak{R}^{M \times M}$ 为球化矩阵^[22]。

2) 消除观测通道间的相位延迟, 使其符合线性瞬时混合模型。设 $\boldsymbol{\tau} = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_M)^T$, $\boldsymbol{\tau} \in \mathfrak{R}^M$ 为观

测通道间的相位延迟,校正后的向量为 $\mathbf{Z}' = (z'_1, z'_2, \dots, z'_M)^T$, $\mathbf{Z}' \in \mathcal{R}^{M \times N}$, 满足

$$z'_i(t) = z_i(t + \tau_i), \quad i = 1, 2, \dots, M. \quad (9)$$

3) 按逐次提取独立分量的方式,依次得到向量 \mathbf{Z} 的独立成分,进而得到 \mathbf{X} 的所有独立信号源^[13]。该过程可通过如下几步来实现。

- a) 选择要估计的独立成分的个数 m , 设置 $p \leftarrow 1$ 。
- b) 选择具有单位范数的初始化向量 \mathbf{w}_p 。
- c) 更新分离向量 \mathbf{w}_p ,

$$\mathbf{s} \leftarrow \mathbf{w}_p^T \mathbf{z}', \quad (10)$$

$$\mathbf{s}^+ \leftarrow \mathbf{f}(\mathbf{s}), \quad (11)$$

$$\mathbf{w}_p^+ \leftarrow \mathbf{Z}' \mathbf{s}^{+T}, \quad (12)$$

其中 \mathbf{s} 为源信号的一个估计, $\mathbf{f}(\mathbf{s})$ 为降噪函数, \mathbf{s}^+ 为 \mathbf{s} 的降噪估计, \mathbf{w}_p^+ 为分离向量的更新。

- d) 进行正交化,

$$\mathbf{w}_p^+ \leftarrow \mathbf{w}_p^+ - \sum_{j=1}^{p-1} (\mathbf{w}_p^{+T} \mathbf{w}_j) \mathbf{w}_j. \quad (13)$$

- e) 规范化 \mathbf{w}_p^+ ,

$$\mathbf{w}_p \leftarrow \frac{\mathbf{w}_p^+}{\|\mathbf{w}_p^+\|}. \quad (14)$$

- f) 如果 \mathbf{w}_p 尚未收敛,返回步骤 c)。

- g) 置 $p \leftarrow p + 1$ 。如果 $p \leq m$, 返回步骤 b)。

4) 将步骤 3) 中得到的 m 个独立成分按照信号非高斯性的大小进行排序,并将非高斯性较小的 n 个成分以及采用 CORSICA^[23] 筛选得到的 k 个结构化噪声成分置零。然后采用剩余的 $m - n - k$ 个独立成分重构观测信号 \mathbf{X} , 完成对含噪观测信号的降噪处理。

4 实验与结果分析

为验证所设计的微弱信号检测电路和基于 DSS 的软件降噪处理算法的有效性,研发了如图 3 所示的背向散射光能量测量系统,并以激光打靶微弱背向散射光能量测量^[1,2]为例进行了实验。图 3(a) 为测量系统的功能框图,图 3(b) 为用于微弱光能量测量的前置放大装置。

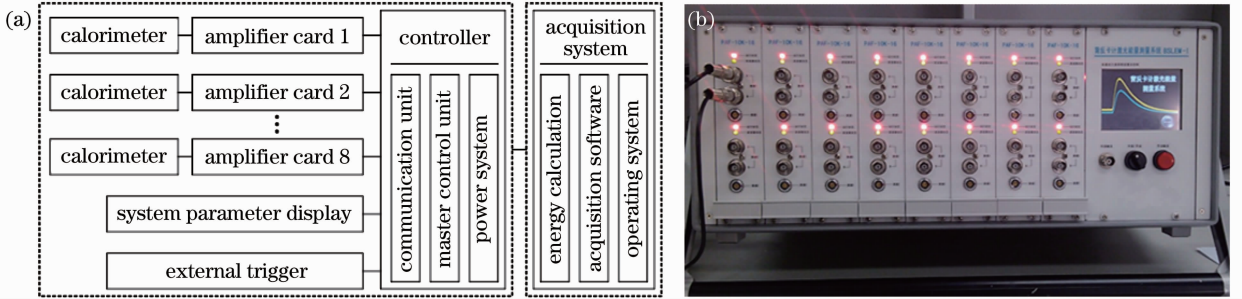


图 3 背向散射光能量测量系统。(a) 系统功能框图; (b) 用于微弱光能量测量的前置放大装置
Fig. 3 Backscattering light energy measurement system. (a) Functional block diagram of system; (b) preamplifier equipment for weak light energy measurement

系统前端的测量电路由信号放大卡、控制器、外部触发器和系统参数显示器组成。系统后端的信号采集和处理系统包括多通道高速数据采集卡、嵌入式微控制器及数据采集软件。

实验中采用 8 路量热式探测器探测激光发生器模拟产生的微弱受激拉曼散射 (SRS) 光信号,且激光发生器的设定功率为 $I^{(k)}$, $k = 1, 2, \dots, 8$ 。将其作为系统输入,以 10 kHz 的采样率由信号采集系统并行同步采集得到 30 s 的实验数据。参考文献^[19, 24],选择无限冲击响应 (IIR) 低通滤波器为降噪函数 $\mathbf{f}(\mathbf{s})$, 并采用 2.2 节介绍的方法确定滤波器的截止频率。

采用信噪比 R_{SN} ^[25] 作为评价所提出方法的依据,给出 R_{SN} 的计算方法。设各路放大器增益为 $G^{(k)}$, $k = 1, 2, \dots, 8$, 各能量卡计的灵敏度为 $P^{(k)}$, 热

时间常数为 $\tau_T^{(k)}$, 电时间常数为 $\tau_q^{(k)}$, 由此可给出时刻 t 处的理论输出信号为^[26]

$$s_{\text{real}}^{(k)}(t) = G^{(k)} P^{(k)} I^{(k)} \left\{ \frac{\tau_q^{(k)} - \tau_T^{(k)}}{\tau_T^{(k)}} \exp\left[-\frac{t}{\tau_T^{(k)}}\right] - \frac{\tau_q^{(k)} - \tau^{(k)}}{\tau^{(k)}} \exp\left[-\frac{t}{\tau^{(k)}}\right] \right\}, \quad (15)$$

进而依据 DSS 分离 (7) 式,把理论输出信号 $\mathbf{s}_{\text{real}} \in \mathcal{R}^N$ 与其估计 $\mathbf{y} \in \mathcal{R}^N$ 的误差 $\mathbf{e} = \mathbf{s}_{\text{real}} - \mathbf{y}$ 作为噪声信号,即包含了结构化噪声与非结构化噪声成分。建立信噪比函数为^[25]

$$R_{SN} = 10 \lg \frac{\mathbf{s}_{\text{real}} \cdot \mathbf{s}_{\text{real}}^T}{\mathbf{e} \cdot \mathbf{e}^T}. \quad (16)$$

实验结果如图 4 所示。图 4(a) 为原始输出信号的时域及频谱表示,图 4(b) 为降噪处理后的结果。从时域不难看出,经过软件信号降噪处理之后,输出信号的信噪比分别提高了 28.8 dB 和 46.4 dB;

从频域不难看出,原始输出信号 0~16 Hz 频段的有用信号功率得到了增强,同时噪声的功率得到了有效抑制,而此频段的噪声是分布在有用信号频带内

的结构化噪声,恰是使用硬件滤波所不能抑制的噪声成分,表明了本文软件降噪算法的优越性。

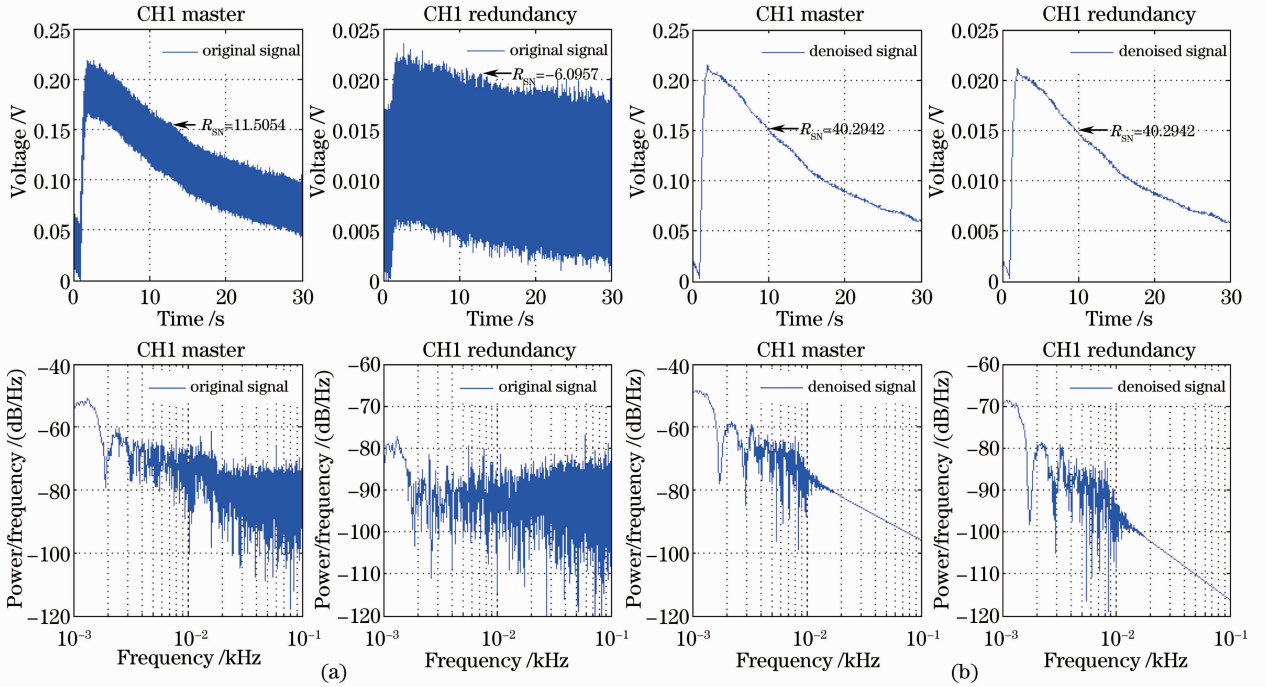


图 4 信号降噪处理前后的对比图。(a)原始信号;(b)降噪后的信号

Fig. 4 Comparison of original signals and denoised results. (a) Original signals; (b) denoised signals

经过软件降噪处理后的 8 路实验结果如图 5 所示。其中通道 3 和通道 8 放大器增益为 10^4 倍,其余通道为 10^5 倍,滤波器截止频率均为 16 Hz。由

图 5(c)不难看出,通道 3 的主通道输出电压虽然出现了饱和现象,但是其冗余通道仍得到了正确的测量结果,由此证实了冗余输出结构的稳健性;在通道

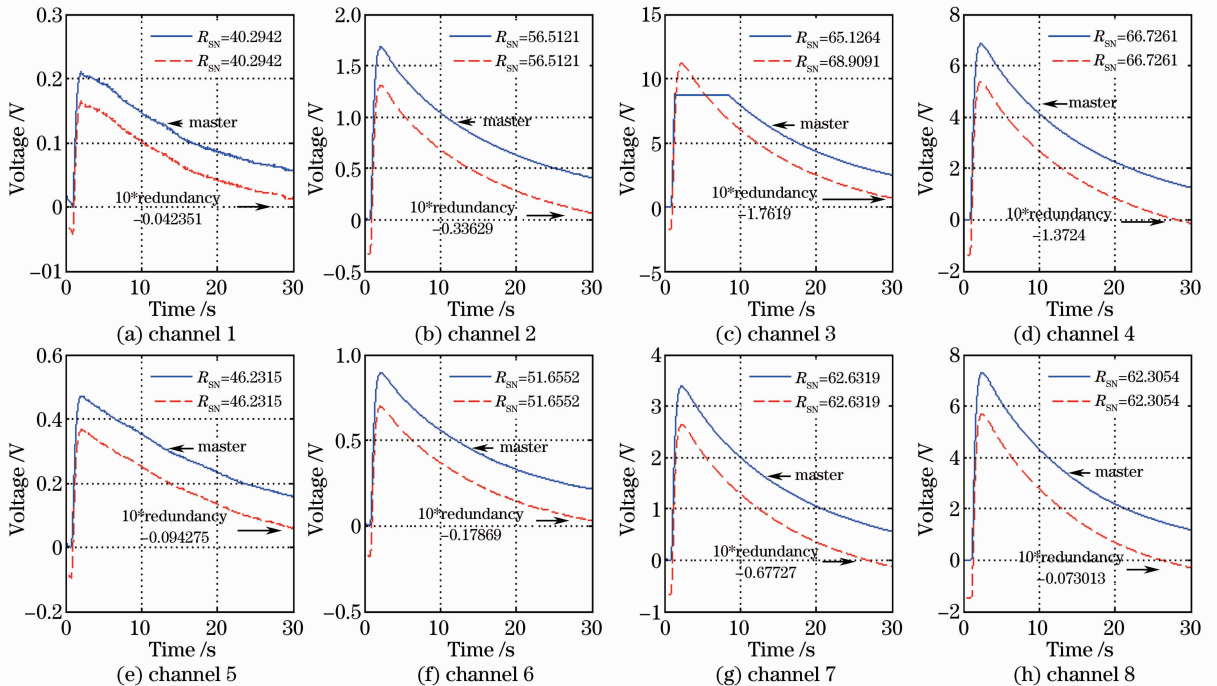


图 5 实验测量结果

Fig. 5 Illustration of test results

1 和通道 5 中,当测量信号为 $2\sim 4\ \mu\text{V}$ 时,输出信号仍能保持不低于 40 dB 的信噪比,从而表明了此系统不但可以通过在线调整相关参数程控放大微弱光能量信号,而且能够有效地抑制微弱信号在高增益放大过程中引入的噪声,保证了微弱光能量信号的测量精度。

5 结 论

设计实现了一种新型受激散射光能量信号检测系统,将微弱信号程控放大、滤波与基于 DSS 的软件降噪算法相结合,有效地实现了微弱信号的检测和降噪。实验结果表明,系统采用硬件模拟滤波和软件降噪处理相结合的方式,提高了微弱信号高增益放大过程中的信噪比。基于 DSS 的软件降噪方法在多通道同步测量的信号降噪中充分利用了信号之间的耦合特性,将不可观测的隐含噪声成分提取出来并予以剔除,是一种有发展前景的检测方法。

参 考 文 献

- 1 Jiao Chunye, Wang Feng, Liu Shenyue *et al.*. Full aperture backscatter signal analysis of laser with hohlraum on Shengguang II laser facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(11): 2603~2607
焦春晔,王峰,刘慎业等.基于神光II的激光黑腔靶全孔径背向散射光信号[J].强激光与粒子束,2010,**22**(11):2603~2607
- 2 Li Zhichao, Zhang Xiaoding, Yang Dong *et al.*. Energy fraction measurements of stimulated Brillouin scattering and stimulated Raman scattering on Shengguang-III prototype laser facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(8): 1891~1895
李志超,张小丁,杨冬等.神光III原型受激拉曼与布里渊散射份额测量[J].强激光与粒子束,2010,**22**(8):1891~1895
- 3 Li Xiukun, Li Tingting, Ma Tao. The research on strong interference separation of weak signal[J]. *J. Vibration and Shock*, 2011, **30**(3): 225~227
李秀坤,李婷婷,马涛.微弱信号强干扰分离方法研究[J].振动与冲击,2011,**30**(3):225~227
- 4 X. C. Liu. Weak signal detection study based on Duffing chaos circuit used for downhole communication[C]. 2nd International Symposium on IECC, 2010
- 5 Yin Xiaomin, Xu Tingting, Ding Junmin *et al.*. Processing of noise in infrared sensor made from PMN-PT[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(1): 010401
殷晓敏,徐婷婷,丁俊民等.弛豫铁电单晶光传感器噪声的处理[J].激光与光电子学进展,2011,**48**(1):010401
- 6 Wu Yiquan, Ji Shouxin, Zhan Bichao. Infrared dim target detection based on nonsubsampling contourlet transform and independent component analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0510002
吴一全,纪守新,占必超.基于无下采样Contourlet变换和独立分量分析的红外弱小目标检测[J].光学学报,2011,**31**(5):0510002
- 7 He Junfeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun *et al.*. A denoising method for backscatter signal of laser ceilometer based on Hilbert-Huang transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0201001
何俊峰,刘文清,张玉钧等.基于希尔伯特-黄变换的激光云高仪后向散射信号去噪方法[J].光学学报,2011,**31**(2):0201001
- 8 Q. He, J. Wang. Effects of multiscale noise tuning on stochastic resonance for weak signal detection[J]. *Digital Signal Processing*, 2004, **22**(4): 614~621

- 9 R. R. Nigmatullin. Detection of weak signals based on a new class of transformations of random series[J]. *Physica A*, 2001, **289**(12): 18~36
- 10 L. Z. Wang, Y. F. Gao. Detection of weak signal in strong noise based on NBS chaos system[J]. *Procedia Engineering*, 2011, **23**: 754~759
- 11 W. Zhao, J. Zhao, Z. Huang *et al.*. Weak signal detection technology based on Holmes Duffing oscillator[J]. *Procedia Engineering*, 2012, **29**: 1796~1802
- 12 Bo Guangyu, Zhong Zhiqing, Liu Bo *et al.*. Design of optical receiver and signal detection unit for combined Rayleigh-Raman-Mie lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3020~3025
伯广宇,钟志庆,刘博等.瑞利-拉曼-米氏激光雷达光学接收和信号检测设计[J].中国激光,2009,**36**(11):3020~3025
- 13 Xia Junzhong, Liu Yuanhong, Ma Zongpo *et al.*. Weak signal detection based on the modulated stochastic resonance[J]. *J. Vibration and Shock*, 2012, **31**(3): 132~140
夏均忠,刘远宏,马宗坡等.基于调制随机共振的微弱信号检测研究[J].振动与冲击,2012,**31**(3):132~140
- 14 J. X. Wang, C. L. Hou. A method of weak signal detection based on Duffing oscillator[C]. International Conference on e-Education, e-Business, e-Management, and e-Learning, 2010. 387~390
- 15 Cheng Wei, Zhang Zhousoo, He Zhengjia. Denoising source separation technique and its application in feature extraction of mechanical equipment running information[J]. *J. Mechanical Engineering*, 2010, **46**(13): 128~134
成玮,张周锁,何正嘉.降噪源分离技术及其在机械设备运行信息特征提取中的应用[J].机械工程学报,2010,**46**(13):128~134
- 16 L. Q. Shen, P. Wang, W. Y. Liu *et al.*. The application of Melnikov function in weak signal detection with Duffing oscillators[C]. ICICIP, 2011, **2**: 854~858
- 17 C. R. Bermudez-Gomez, R. Enriquez-Caldera, J. Martinez-Carballido. Chirp signal detection using the Duffing oscillator[C]. CONIELECOMP, 2012. 344~349
- 18 Mao Jiandong, Hua Dengxin, Wang Yufeng *et al.*. Noise reduction in lidar signal based on wavelet packet analysis[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0209001
毛建东,华灯鑫,王玉峰等.基于小波包分析的激光雷达信号消噪算法的研究[J].中国激光,2011,**38**(2):0209001
- 19 J. Särelä, H. Valpola. Denoising source separation[J]. *J. Machine Learn. Res.*, 2005, **6**: 233~272
- 20 Gong Fang, Zhang Xuewu, Sun Hao. Detection system for solar module surface defects based on constrained ICA model and PSO method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0415002
龚芳,张学武,孙浩.基于独立分量分析和粒子群算法的太阳能电池表面缺陷红外热成像检测[J].光学学报,2012,**32**(4):0415002
- 21 Liu Jingbo, Wan Xiaolei, Jin Weidong. Separating reflections from image using fast kernel independent component analysis[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(5): 051001
刘景波,万小磊,金炜东.基于快速核独立分量分析的图像反光分离研究[J].激光与光电子学进展,2010,**47**(5):051001
- 22 P. Comon, C. Jutten. Handbook of Blind Source Separation: Independent Component Analysis and Applications[M]. Oxford: Academic Press, 2010. 11~39
- 23 V. Perlbarg, P. Bellec, J. L. Anton *et al.*. CORSICA: correction of structured noise in fMRI by automatic identification of ICA components[J]. *Magn. Reson. Imaging*, 2007, **25**(1): 35~46
- 24 Su Chunxiao, Li Wenhong, Yang Cumbang *et al.*. Development of the high sensitivity multichannel bulk absorption laser calorimeter[J]. *Laser Journal*, 2008, **29**(2): 68~69
苏春晓,李文洪,杨存榜等.高灵敏度多通道激光能量卡计[J].激光杂志,2008,**29**(2):68~69
- 25 S. V. Vaseghi. Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction[M]. New York: Wiley, 2008. 430~432
- 26 K. Iniewski. Electronics for Radiation Detection[M]. London: Taylor & Francis, 2011. 212~213