

## 葡萄糖溶液光声信号时域与频域特性对比

王倩, 吕鹏飞, 何巧芝, 吕娜, 赵辉

引用本文:

王倩, 吕鹏飞, 何巧芝, 等. 葡萄糖溶液光声信号时域与频域特性对比[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(11): 2421–2428.

WANG Qian, L&#220, Peng-fei, et al. Characteristics comparison of photoacoustic signal of glucose solution in time domain and frequency domain[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(11): 2421–2428.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202811.2421>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 透射共轴式光声消化内窥成像系统

Transmissive coaxial photoacoustic endoscopic imaging system for digestive tract  
*光学精密工程*. 2020, 28(1): 69–79 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202801.0069>

### 基于组合RNN网络的EMG信号手势识别

Gesture recognition with EMG signals based on ensemble RNN  
*光学精密工程*. 2020, 28(2): 424–442 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202802.0424>

### 光谱仪调制器PID稳速控制系统

Chopper stable speed control system based on PID in NIR spectrometer  
*光学精密工程*. 2016, 24(10s): 87–93 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162413.0087>

### 风力发电机振动的多普勒激光雷达遥测技术

Doppler lidar telemetry for wind turbine vibration  
*光学精密工程*. 2020, 28(10): 2180–2191 <https://doi.org/10.37188/OPE.20202810.2180>

### 基于光声谱法的无创血糖在体检测

Non-invasive blood glucose in vivo detection based on photoacoustic spectroscopy  
*光学精密工程*. 2019, 27(6): 1301–1308 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192706.1301>

文章编号 1004-924X(2020)11-2421-08

# 葡萄糖溶液光声信号时域与频域特性对比

王倩, 吕鹏飞, 何巧芝, 吕娜, 赵辉\*

(上海交通大学 仪器科学与工程系, 上海 200240)

**摘要:** 为了克服时域信号易受环境干扰影响的缺陷, 提高液体浓度光声测量的稳定性, 在已有的光声信号时域峰峰值特性研究的基础上, 对光声信号的频域特性展开研究。分别讨论了葡萄糖溶液光声信号的功率谱特性和最大熵谱特性, 并分别采用峰值检测、对数拟合等方法对光声信号的频域特性进行分析。对比了葡萄糖光声信号时域峰峰值与功率谱、最大熵谱的非线性误差和重复性误差。实验结果表明: 对最大熵谱曲线进行对数拟合之后采用截距表征光声信号的方法, 其非线性误差和重复性误差相比于传统的时域峰峰值检测方法分别减小了 28% 和 71%。由此可以得出: 频域分析方法可以显著减小葡萄糖浓度检测的非线性误差和重复性误差, 提高无创血糖浓度检测的精度与稳定性。

**关键词:** 光声测量; 血糖浓度; 光声信号; 时域; 频域; 功率谱; 最大熵谱

**中图分类号:** TH773; R318.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20202811.2421

## Characteristics comparison of photoacoustic signal of glucose solution in time domain and frequency domain

WANG Qian, LÜ Peng-fei, HE Qiao-zhi, LÜ Na, ZHAO Hui\*

(Department of Instrument Science and Engineering,  
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

\* Corresponding author, E-mail: hui Zhao@sjtu.edu.cn

**Abstract:** To overcome the shortcomings of the time-domain signal, which is easily affected by environmental interference, and improve the stability of photoacoustic measurements of the liquid concentrations, this study investigated the frequency-domain characteristics of a photoacoustic signal based on the time-domain peak-to-peak characteristics of the photoacoustic signal. The power spectrum characteristics and maximum entropy spectrum characteristics of the photoacoustic signal of glucose solution were evaluated. Different methods, such as peak detection and logarithmic fitting, were used to analyze the spectral characteristics of the photoacoustic signal. The nonlinear error and repeatability error of the time-domain peak detection, power spectrum, and maximum entropy spectrum methods were compared. The experimental results show that by using the intercept to characterize the photoacoustic signal after the logarithmic fitting of the maximum entropy spectrum curve, the nonlinear error and repeatability error can be reduced by 28% and 71%, respectively, compared with the traditional time-domain peak-to-peak detection method. The frequency-domain method can be used to reduce the nonlinear and repeatability errors of glucose concentration detection

收稿日期: 2020-05-25; 修订日期: 2020-06-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61873168)

significantly. Furthermore, the frequency-domain method could improve the accuracy and stability of noninvasive blood glucose concentration detection.

**Key words:** photoacoustic detection; blood glucose measurement; photoacoustic signal; time domain; frequency domain; power spectrum; maximum entropy spectrum

## 1 引言

糖尿病是一种危害人类健康的常见内分泌疾病。随着人民生活水平的不断提高,我国糖尿病患者的人数逐年增加<sup>[1]</sup>。糖尿病没有办法根治,需要终身治疗,患者采用家用血糖仪来持续监测血糖浓度,并根据这些检测结果来控制饮食、调节生活方式<sup>[2]</sup>。目前,市面上的血糖仪基本上都是有创的,需要患者自行采集血液样本来分析血糖浓度<sup>[3]</sup>。这样不仅会降低患者的配合度、增加患者心理负担,而且伤口还会有感染的风险。因此,无痛楚、无感染风险、快捷的无创血糖检测已经成为该领域的研究热点。

现有的无创血糖检测方法可以分为光谱分析法、电化学法、光检测法、能量代谢法、阻抗法等<sup>[4]</sup>,其中研究最多的是光谱法。在各类光谱法中,基于光声效应的光声光谱法逐渐崭露头角。光声效应是物体吸收调制激光能量之后,内部温度改变而引起其体积涨缩,辐射超声波的现象。血糖的成分为葡萄糖,组织中葡萄糖会吸收光的能量产生热膨胀,激发出超声信号,即通常所说的光声信号<sup>[5]</sup>。这些超声信号的强弱和被测液体的浓度紧密相关。因此,通过研究光声信号的强弱则可以判断出葡萄糖溶液浓度的大小。

目前,光声信号方面的研究工作主要集中在时域,即通过分析时域光声信号峰峰值的大小来判断液体浓度的高低。但是,时域信号受到多种外界因素的影响,比如激光的激发脉冲峰值能量的抖动、外界温度及患者体温的波动、空间电磁场干扰、环境背景声波干扰等。这些干扰会直接影响光声信号的峰峰值,从而降低液体浓度检测的精度与可靠性。因此,寻找一种新的、稳定性更高的光声信号评估方法至关重要。

本文在葡萄糖溶液光声信号时域处理方法研究工作的基础上,提出一种光声信号频域分析法,分别探讨了光声信号的功率谱和最大熵谱的特性参数随葡萄糖溶液浓度的变化规律,并与时域峰

峰值的结果进行了对比分析,最后进行了实验测试与验证。结果表明,对于液体浓度的光声测量而言,光声信号的频谱特性略优于时域特性,有望成为一种新的光声信号量化评估方法与手段。

## 2 光声信号的时域与频域表达

### 2.1 光声信号的时域峰峰值与浓度的关系

激励激光照射在均匀透明的介质时,一部分会在介质表面反射,一部分光会被介质吸收,还有一部分光透过介质。根据 Patel 等人的研究<sup>[6]</sup>,光声压力波的幅值可以表示为:

$$p = K \frac{\beta v_a^2}{C_p} E_0 \alpha, \quad (1)$$

其中: $K$ 是与几何参数有关的常数, $\beta$ 是热膨胀系数, $v_a$ 表示溶液中的声速, $C_p$ 代表溶液的比热容, $E_0$ 表示脉冲激光的能量。

根据 Dasa 等的研究<sup>[7]</sup>,超声换能器 PZT 检测到的光声信号的幅值可以进一步简化为:

$$p = K' \Gamma E_0 \alpha, \quad (2)$$

在这里  $K'$  是一个与几何参数及压电换能器响应特性有关的常数。 $\Gamma = \frac{\beta v_a^2}{C_p}$  是 Grüneisen 系数,它与样品的物理特性有关。

在实验过程中,葡萄糖溶液浓度的变化会影响溶液的物理性质( $\Gamma$ )和光学特性( $\alpha$ )<sup>[8]</sup>。根据公式(2)可以看出,这些参数的变化进而会导致光声信号的幅值产生变化。研究表明,光声信号幅值和葡萄糖溶液浓度之间存在线性关系。因此,本文采用线性拟合来描述光声信号和葡萄糖溶液浓度之间的关系。

### 2.2 光声信号的频谱表达

在频域测量中,傅里叶变换法是最为经典的方法,该方法得到的结果并不理想<sup>[9-10]</sup>。其原因是傅里叶变换存在栅栏效应,不能了解信号在整个频域上的特性。为了观察到其他频率的信息,需要对原信号采取补零操作,但是补零只是增加了计算分辨率,并没有真正提高光声信号频谱的

物理分辨率。

目前,光声信号采集广泛使用的超声传感器是 PZT 压电陶瓷传感器,在中心频率处光声信号频谱峰值被放大,而在非中心频率处的光声信号频谱幅值锐减,并不能体现宽频带频谱信息。

本文采用经典功率谱法和最大熵谱法对光声信号的频域特性展开研究,并在葡萄糖溶液浓度检测过程中进行了对比分析。

### 2.2.1 功率谱分析

将采集到的光声信号  $x(n)$  的  $N$  点观测数据  $x_N(n)$  视为一个能量有限信号,直接取  $x_N(n)$  的傅里叶变换得  $X_N(e^{j\omega})$ ,然后取其幅值的平方并除以  $N$ ,作为对  $x(n)$  真实的功率谱  $P(e^{j\omega})$  的估计<sup>[11]</sup>,即:

$$P(\omega) = \frac{1}{N} |X_N(\omega)|^2. \quad (3)$$

经典的功率谱估计的计算效率很高,分辨率相比于傅里叶变换来说也较高。但是,经典功率谱法计算出来的功率谱离散性大,曲线粗糙,方差大。由于窗函数的局限性,在计算过程中不可避免地出现频谱泄露、分辨率低等问题。

### 2.2.2 熵谱分析

针对经典功率谱估计的局限,现代谱估计方法应运而生,其中具有代表性的是最大熵谱估计。最大熵原理计算简单快速,而且没有传统方法分辨率低等多种缺点。熵谱分析的结果曲线平滑且具有较高的分辨率,特别适用于短数据样本的谱估计<sup>[12-13]</sup>。

在维持最大不确定性条件的情况下,将有穷采样光声信号序列的自相关函数  $R(t)$  用迭代的方法优化递推到  $t \rightarrow \infty$ ,之后使用得到的无穷自相关函数序列来代替有穷自相关序列去做功率谱估计,目的是为了提高功率谱估计的分辨率。

无穷自相关函数  $R(t)$  的功率谱为:

$$P(\omega) = \sum_{t=-\infty}^{+\infty} R(t) e^{-i\omega t}. \quad (4)$$

其熵值  $H$  为:

$$H = - \int P(\omega) \ln P(\omega) d\omega. \quad (5)$$

采用最大熵谱法外推自相关函数序列等价于自回归计算,在满足最大熵的情况下,即  $dH=0$ ,采用拉格朗日乘子法可以获得函数序列相应的最大熵功率谱为:

$$P(f) = \frac{\sigma_m^2}{\left| 1 - \sum_{j=1}^m a_{j,m} e^{-ij\omega\Delta t} \right|^2}, \quad (6)$$

其中: $f$  为频率, $m$  为自回归阶数, $\sigma_m^2$  为预报误差方差估计, $a_{j,m}$  为自回归系数。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 实验系统的组成

光声信号实验系统主要由激光光子系统、光声池子系统、数据采集子系统以及计算机组成,其原理如图 1 所示。

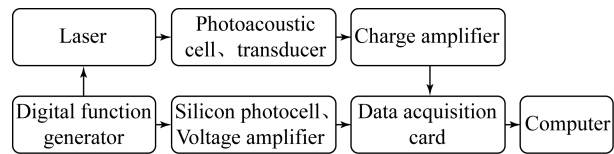


图 1 光声测量系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of photoacoustic experimental system

图 2 为实验系统结构图。激光光子系统主要由 STL1064QW-1mJ 红外脉冲激光器、AFG310 信号发生器、硅光电池和分光棱镜组成。光声池子系统主要由光声池、CENTER376 温度传感器、水浴加热装置和流动泵组成。数据采集子系统主要由超声换能器、DE-HQA-15M-10T 电荷放大器、M2i. 2021 数据采集卡组成。

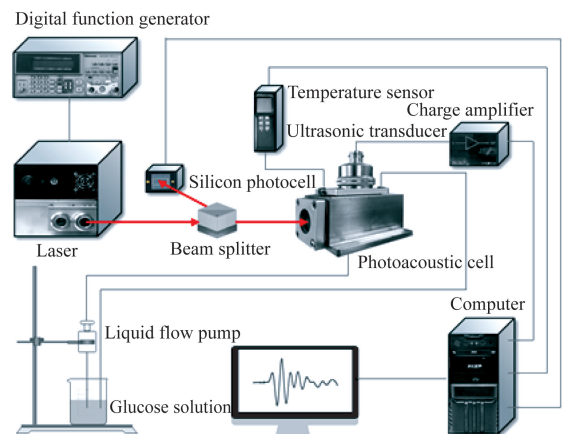


图 2 光声测试系统结构示意图

Fig. 2 Framework of photoacoustic experimental system

测试之前将激光器预热 1.5 h 左右,保证激光器工作的稳定性。实验系统预热完毕后,通过光声池子系统中的流动泵将被测液缓慢地加入到光声池中,这样可以防止光声池中产生气泡。调节信号发生器使激光器产生脉冲激光,通过分光棱镜将脉冲激光分成两路。一路激光照射在硅光电池上,硅光电池输出端分别接数据采集卡的触发信号端口和信号采集通道。

另一路激光进入光声池中照射到被测溶液,被测溶液在脉冲激光的照射下产生超声信号。经过超声换能器后,声信号转换为电信号。由于超声换能器直接转换得到的电信号是微弱的电荷信号,因此需要用前置电荷放大器对电荷信号进行放大。此路信号接数据采集卡的另一路信号采集通道。经过数据采集卡进行 A/D 转换,将葡萄糖溶液光声信号和激光光强信号转换成数字信号,输入到计算机。

将光声测量系统控制在 35 °C 附近,目的是模拟人体正常体温。为了获得更为清晰的规律,增大葡萄糖溶液光声信号的强度,将葡萄糖溶液分为 5 个浓度梯度,分别为 5 000,10 000,15 000,20 000 和 25 000 mg/dL。测量过程中,每个浓度下采集 100 组数据,并通过计算平均值与标准差来衡量各自的性能差异。

### 3.2 光声信号时域分析及结果

实验得到的葡萄糖溶液光声信号的时域波形如图 3 所示,当葡萄糖溶液浓度改变时波形幅值随之产生变化。

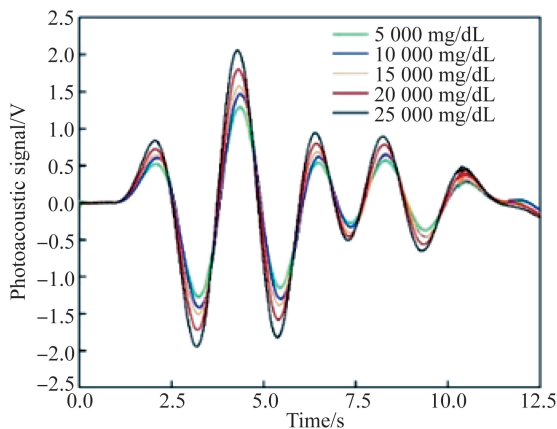


图 3 不同浓度葡萄糖溶液的光声信号波形

Fig. 3 Photoacoustic signals of glucose solution with different concentrations

对 100 组光声信号数据分别计算峰峰值,取平均值并计算其标准差,计算结果见表 1。测量标准差最大为 0.126 V,重复误差为 4.16%。

表 1 不同葡萄糖浓度下光声信号峰峰值及其拟合结果  
Tab.1 Peak-to-peak values of photoacoustic signals under different glucose concentrations

浓度/ (mg · dL <sup>-1</sup> )	平均值/V	标准差/V	直线 拟合值/V	非线性 偏差/V
5 000	2.57	0.107	2.52	0.05
10 000	2.89	0.113	2.87	0.02
15 000	3.09	0.115	3.22	-0.13
20 000	3.52	0.108	3.57	-0.05
25 000	4.01	0.126	3.92	0.09

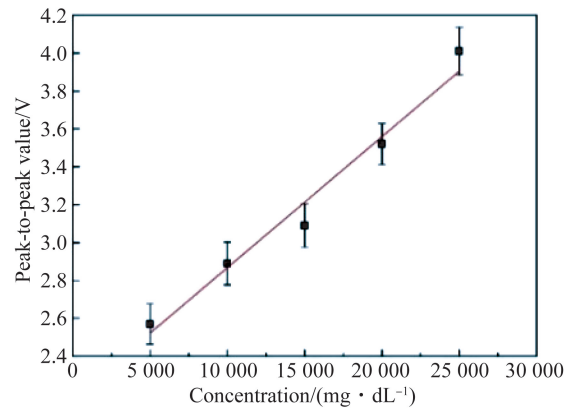


图 4 不同浓度葡萄糖溶液的光声信号峰峰值(误差线代表 10 次试验波动)

Fig. 4 Peak-to-peak values of PA signal under different glucose concentrations (error bars represent the fluctuations in 10 experiments)

不同浓度下葡萄糖溶液光声信号的峰峰值变化如图 4 所示。可以看出,随着葡萄糖浓度的升高,葡萄糖溶液光声信号的峰峰值不断提高,基本呈线性规律。对浓度和光声信号峰峰值之间的关系进行线性拟合,得出最大非线性偏差为 0.13 V,非线性度为 9.29%(见表 1)。图中的误差线代表 10 次试验结果的波动范围,文章中其他图中的误差线含义相同。

### 3.3 光声信号频域分析及结果

#### 3.3.1 功率谱分析

对上述葡萄糖溶液光声信号进行功率谱分析,得到光声信号功率谱如图 5 所示。

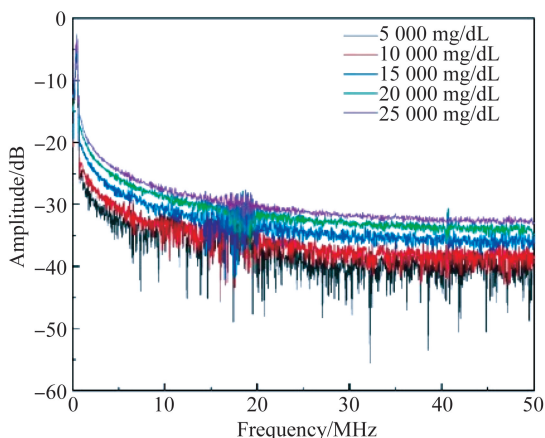


图 5 不同浓度葡萄糖溶液的光声信号功率谱

Fig. 5 Power spectra of photoacoustic signals under different glucose concentrations

计算每个葡萄糖浓度下光声信号在谐振频率 0.5 MHz 处的功率谱峰值,结果见表 2。测量的标准差最大为 0.268,重复性误差为 5.59%。

表 2 不同浓度葡萄糖光声信号功率谱谐振频率幅值

Tab. 2 Amplitude of photoacoustic signal power spectrum under different glucose concentrations at transducer's resonant frequency

浓度/ (mg · dL <sup>-1</sup> )	平均值	标准差	直线 拟合值	非线性 误差
5 000	-4.93	0.268	-5.06	0.13
10 000	-4.37	0.215	-4.56	0.19
15 000	-4.10	0.232	-4.06	-0.04
20 000	-3.36	0.172	-3.56	0.20
25 000	-2.63	0.147	-3.06	0.43

不同葡萄糖浓度下光声信号的功率谱峰值变化如图 6 所示。葡萄糖溶液光声信号功率谱谐振频率处的峰值随着浓度的升高而变大。对浓度和

光声信号功率谱峰值之间的关系进行线性拟合,得出最大非线性偏差为 0.43,非线性度为 12.49%。

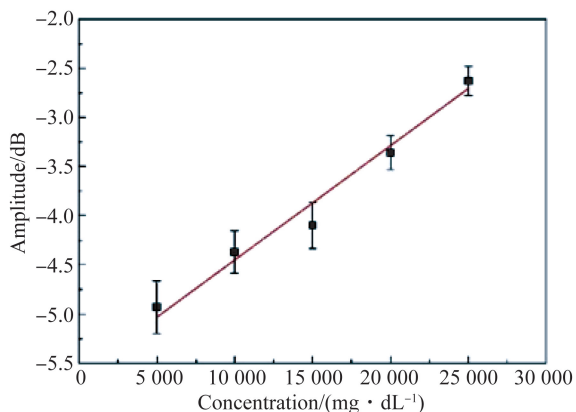


图 6 葡萄糖溶液光声信号功率谱谐振频率幅值浓度的变化关系

Fig. 6 Peak of photoacoustic signal power spectrum at resonant frequency under different glucose concentrations

由于功率谱峰值仅为单个频率的信息,并不能代表全部频率信息。为此,对整条功率谱曲线进行对数拟合,计算对数拟合后的截距见表 3。这种方法得到测量的标准差最大为 0.974,重复性误差为 4.03%,对数拟合后的截距平均值随浓度变化的关系如图 7 所示,仍然可近似为线性关系。对截距与浓度关系进行线性拟合,计算得出最大非线性偏差为 0.43,非线性度为 7.32%。

表 3 不同葡萄糖浓度下光声信号功率谱对数拟合截距

Tab. 3 Log-fitted intercept of photoacoustic signal power spectrum under different glucose concentrations

浓度/ (mg · dL <sup>-1</sup> )	平均值	标准差	直线 拟合值	非线性 误差
5 000	-25.43	0.899	-25.62	0.13
10 000	-24.17	0.974	-23.62	0.19
15 000	-21.39	0.810	-21.62	-0.04
20 000	-19.20	0.537	-19.62	0.20
25 000	-17.92	0.440	-17.62	0.43

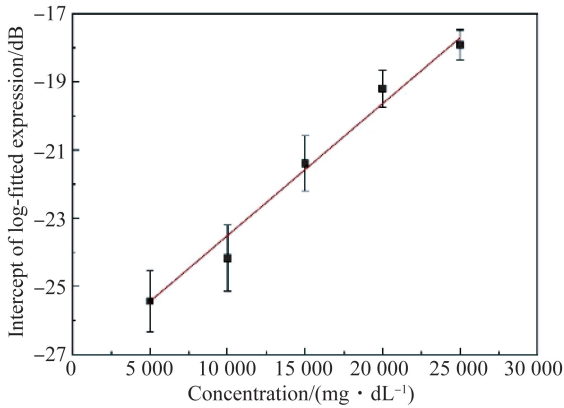


图 7 葡萄糖溶液光声信号功率谱对数拟合截距随浓度变化的关系

Fig. 7 Relationship between glucose concentration and log-fitted intercept of power spectrum of photoacoustic signal

### 3.3.2 熵谱分析

利用最大熵谱分析法对葡萄糖溶液光声信号的频域进行分析,得到不同浓度葡萄糖溶液的最大熵谱,如图 8 所示。

对不同浓度葡萄糖溶液光声信号的整条熵谱曲线进行对数拟合,计算对数拟合后的截距见表 4。测量得到的标准差最大为 1.191,重复性误差为 1.21%。

对数拟合后截距平均值随浓度变化的关系如图 9 所示,仍然近似为线性关系。对截距与浓度关系进行线性拟合,计算得出最大非线性偏差为 0.87,非线性度为 6.67%。

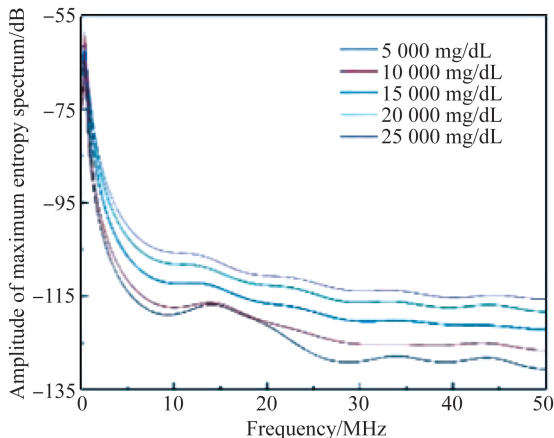


图 8 不同浓度葡萄糖溶液光声信号的最大熵谱

Fig. 8 Maximum entropy spectra of photoacoustic signal of glucose solution with different concentrations

表 4 不同葡萄糖浓度下光声信号最大熵谱对数拟合截距  
Tab. 4 Log-fitted intercept of photoacoustic signal maximum entropy spectrum under different glucose concentrations

浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{dL}^{-1}$ )	平均值	标准差	直线 拟合值	非线性 误差
5 000	-98.25	1.191	-98.39	0.14
10 000	-95.76	1.064	-94.89	-0.87
15 000	-91.22	0.996	-91.39	0.17
20 000	-87.51	0.677	-87.89	0.38
25 000	-85.20	0.525	-84.39	-0.81

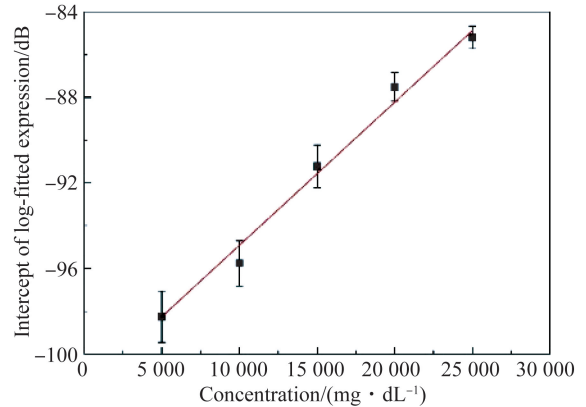


图 9 葡萄糖溶液光声信号最大熵谱对数拟合截距随浓度变化的关系

Fig. 9 Relationship between log-fitted intercept of maximum entropy spectrum of photoacoustic signal and concentration of glucose solution

## 4 讨论

不同处理方法的结果对比见表 5。可以看出,功率谱峰值法检测葡萄糖浓度变化的非线性误差和重复性误差都要大于时域检测峰峰值法,而功率谱曲线经过对数拟合后采用截距的方法和最大熵谱曲线经过对数拟合后采用截距的方法均优于其他几种方法。特别是最大熵谱曲线经过对数拟合后采用截距的方法相比于传统的时域峰峰值检测方法,非线性误差和重复性误差分别提高了 28% 和 71%。

表 5 不同测量方法的非线性误差和重复性误差

Tab. 5 Nonlinear error and repeatability error of different measurement methods

浓度/(mg · dL <sup>-1</sup> )	非线性误差/%	重复性误差/%
时域峰峰值法	9.29	4.16
功率谱峰值法	12.49	5.59
功率谱对数拟合截距法	7.32	4.03
最大熵谱对数拟合截距法	6.67	1.21

功率谱峰值法主要使用谐振频率处的频谱幅值信息,使用的是单一频率处的幅值信息。但是葡萄糖溶液在频谱上的幅值分布并非只有这一个频率分布,为了能够增加葡萄糖溶液光声信号的频谱信息,能够从宽频带角度来研究葡萄糖浓度和光声信号的频率特性的关系。本文提出的使用对数拟合法来处理葡萄糖溶液光声信号频率特性的方法,采用宽频谱的对数拟合截距对葡萄糖溶液浓度进行评估,其非线性误差和重复性误差都明显下降,并且测量误差要小于传统的时域峰峰值测量。

经典功率谱是将数据工作区外的位置数据假设为 0,相当于给数据加窗,这使得谱估计的质量有所下降,得到的谱线离散性大、曲线粗糙、方差较大。为了提高葡萄糖溶液光声信号频谱特性测量的精度,采用最大熵谱分析法。在探究葡萄糖溶液浓度的频率特性实验中,最大熵谱对数拟合截距法得到的非线性误差和重复性误差最小。最

大熵谱分析利用待研究信号的先验知识,对信号的窗口外的数据做出某种较为合理的假设,也就是通过观测数据估计参数模型,再按照估计参数模型输出功率的方法估计信号功率谱。此外,通常的自相关函数求功率谱是相关函数的线性变换,而最大熵谱估计是相关函数的非线性变换。这样使得最大熵谱分析的分辨率大大提高,而且谱线非常光滑,解决了经典功率谱估计的分辨率低和方差性能不好等问题,从而大大提高了频谱对数拟合的精度和重复性。所以,最大熵谱对数拟和截距法的非线性误差和重复性误差要远小于本文使用的其他方法。

## 5 结 论

本文介绍了光声检测系统的构成和工作原理,然后提出通过频域参数来检测葡萄糖溶液的浓度,之后将时域和频域的检测方法进行对比分析。实验结果表明:传统的时域峰峰值法检测葡萄糖浓度变化的非线性误差为 9.29%,重复性误差为 4.16%。通过光声信号最大熵谱分析检测葡萄糖浓度变化的误差会减小,其中非线性误差为 6.67%,重复性误差为 1.21%。熵谱曲线经过对数拟合后采用截距的方法相比于传统的时域峰峰值检测方法分别提高了 28%和 71%。因此,相比于传统的时域峰峰值检测方法,频域分析可以减小葡萄糖检测的非线性误差和重复性误差,从而提高无创血糖检测的灵敏度。

## 参考文献:

- [1] CHO N H, SHAW J E, KARURANGA S, *et al.*. IDF diabetes atlas: global estimates of diabetes prevalence for 2017 and projections for 2045 [J]. *Diabetes Research & Clinical Practice*, 2018;271.
- [2] 李晓莉,李成伟.改进的自适应噪声总体集合经验模态分解在光谱信号去噪中的应用[J].*光学精密工程*, 2016, 24(7):1754-1762.  
LI X L, LI CH W. Application of improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise in spectral signal denoising [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(7):1754-1762. (in Chinese)
- [3] 徐可欣,陈小龙,乘大超,等.基于微流控和酶比色的微创血糖连续检测仪[J].*光学精密工程*,

2018, 26(11):6-13.

XU K X, CHEN X L, LI D CH, *et al.*. Minimally invasive continuous blood glucose monitor based on microfluidic and enzyme colorimetric technologies [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(11):6-13. (in Chinese)

- [4] ZHAO S W, TAO W, He Q Z, *et al.*. A new approach to non-invasive blood glucose measurement based on 2-dimension photoacoustic spectrum [J]. *Proceeding of IMCCC*, 2017, 8298673.
- [5] 吕鹏飞,陆志谦,何巧芝,等.基于光声谱法的无创血糖在体检测[J].*光学精密工程*, 2019, 27(6): 1301-1308.  
LÜ P F, LU ZH Q, HE Q ZH, *et al.*. Non-invasive blood glucose in vivo detection based on photoa-

- coustic spectroscopy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(6):1301-1308. (in Chinese)
- [6] PATEL C K N, TAM A C. Pulsed optoacoustic spectroscopy of condensed matter [J]. *Reviews of Modern Physics*, 1981, 53(3):517-550.
- [7] DASA M K, MARKOS C, JANTING J, *et al.*. Multispectral photoacoustic sensing for accurate glucose monitoring using a supercontinuum laser [J]. *JOSA B*, 2019, 36(2): A61-A65.
- [8] TAO W, LU Z Q, HE Q Z, *et al.*. Research on the temperature characteristics of the photoacoustic sensor of glucose solution [J]. *Sensors*, 2018, 18(12), 4323.
- [9] ZHAO S W, TAO W, HE Q Z, *et al.*. A non-invasive photoacoustic and ultrasonic method for the measurement of glucose solution concentration [J]. *AIP Advances*, 2017, 7(3): 035313.
- [10] ZHOU Q, ZHAO S W, WEI J S. Parameter estimation of photoacoustic signal for glucose solutions using laplace wavelet correlation filtering and least square estimation [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 475:225-235.
- [11] 胡广书. 数字信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,2013.
- HU G SH. *Digital Signal Processing* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)
- [12] 刘晔远, 胡昊颖, 吴珊, 等. AR模型的谱分辨率及小信噪比下的性能分析 [J]. *舰船电子工程*, 2018, 38(7):131-136.
- LIU X Y, HU H Y, WU SH, *et al.*. Performance analysis on spectrum resolution ratio and small noise-signal ratio of AR model-based power spectrum estimation [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2018, 38(7):131-136. (in Chinese)
- [13] 徐海翔, 崔正湃, 吴林林, 等. 基于最大熵谱估计的风电功率周期特性的研究征提取 [J]. *太阳能学报*, 2018, 39(9): 2425-2431.
- XU H X, CUI ZH P, WU L L, *et al.*. Study on periodicity of wind power based on maximum entropy spectrum estimation [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2018, 39(9): 2425-2431. (in Chinese)

#### 作者简介:



王倩(1995—),女,湖北襄阳人,硕士研究生,2018年于华中科技大学获得学士学位,主要从事光声法无创血糖监测的研究。E-mail: qianwangVera@sjtu.edu.cn

#### 通讯作者:



赵辉(1965—),男,辽宁阜新人,博士,教授,博士生导师,1986年、1989年、1994年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事现代传感器、机器视觉、光电检测技术等方面的研究。E-mail: huizhao@sjtu.edu.cn