

利用统计处理方法提高动态光谱的检测精度

李刚¹, 刘玉良^{1,2}, 林凌¹, 王焱^{1,3}

1. 天津大学精密仪器及光电子工程学院, 天津 300072

2. 天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222

3. 辽宁工程技术大学电子工程系, 辽宁 阜新 123000

摘要 近红外光谱法成分检测因其检测方法的优越性, 已成为生物医学领域的研究热点。目前国内外相关研究虽然广泛, 可是还没有进入实际临床应用的报道。关键是现有检测方法中存在着个体差异, 测量条件的影响, 使光谱检测精度达不到要求, 因此提高检测精度是血液成分无创检测得以实现的关键。文章在最近提出的一种新的近红外血液成分检测方法-动态光谱法的基础上, 利用传统的统计处理方法, 通过剔除含有粗大误差的奇异点和多次测量统计平均来提高动态光谱检测精度。实验结果表明含粗大误差的奇异点剔除和多次测量统计平均能够提高动态光谱的检测精度。

关键词 动态光谱法; 粗大误差; 统计估值理论; 检测精度

中图分类号: O657.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0593(2007)09-1669-04

引言

血液成分无创检测技术一直是近年来生物医学传感领域的研究热点^[1-9]。其中, 近红外光谱法以其快速、无创、成本低等优点, 获得了广泛的应用。但个体差异和测量条件的影响, 阻碍了其在临床中的应用。基于动脉血氧测量技术的动态光谱法^[10,11]是为了解决这个应用问题而提出的。动态光谱法的原理是通过多通道采集系统同时采集多个波长的光电脉搏波信号, 然后对脉搏波信号进行处理, 得到纯粹由脉动动脉血贡献的动态光谱, 进而分析出血液中成分含量。要从动态光谱中提取血液成分信息, 就要对动态光谱有足够高的仪器检测精度^[12]。一般来说, 同一波长的动态光谱多次重复测量取平均值输出可以提高动态光谱的测量精度。但如果多次测量结果中有粗大误差存在, 则会影响动态光谱测量精度。

粗大误差评价方法很多, 常用且比较可靠的还是基于经典统计理论的统计估值法^[13]。它包括拉依达准则(3 σ 准则)、肖维纳准则、格拉布斯准则等。肖维纳准则比较严格, 但由于它的频率趋近于概率, 在样本数较小时置信概率不稳定, 判断的可靠性不高。考虑到拉依达准则和格拉布斯准则在数据处理上要求偏宽, 容易漏掉含有粗大误差的奇异点。本文从动态光谱精密测量的实际出发, 提出把两个波长动态光谱的斜率序列作为粗差评价样本, 并考虑降低粗大误差阈值的

大小, 采用更严格的2 σ 准则, 得到更精确的动态光谱。

1 动态光谱检测理论

根据动态光谱检测理论, 采用动态光谱提取血液成分, 可遵循以下步骤: (1) 采用光电容积脉搏波描记法获得各波长下的光电容积脉搏波; (2) 根据动态光谱定义, 各个单波长对应的单个光电脉搏波周期上吸光度的最大值与最小值的差值 ΔOD 构成的光谱就是动态光谱; (3) 基于修正的朗伯-比尔定律, 采用化学分析方法提取血液成分浓度信息^[14,15]。其检测原理见公式(1)^[11]:

$$\begin{aligned} \Delta OD_i &= \lg\left(\frac{I_{0i}}{I_{imin}}\right) - \lg\left(\frac{I_{0i}}{I_{imax}}\right) \\ &= \lg\left(\frac{I_{imax}}{I_{imin}}\right) = 0.434[\ln(I_{imax}) - \ln(I_{imin})] \quad (1) \end{aligned}$$

式中, ΔOD_i , I_{0i} , I_{imax} , I_{imin} 分别为波长*i*对应的脉动动脉血液吸光度、入射光强、最大出射光强(光电容积脉搏波峰值)、最小出射光强(光电容积脉搏波谷值)。由于脉搏波的基线和周期很不稳定, 直接从光电容积脉搏波的时域信号中提取 I_{imax} 和 I_{imin} 将带来较大的误差, 因此采用频域信号进行信息提取^[10]。(1)式表明, 光电容积脉搏波*I*取对数后, $\lg(I)$ 的峰峰值即为组成动态光谱的吸光度幅值。由于傅里叶变换具有线性特性, 不同波长下脉搏波是几何相似的, 可

收稿日期: 2006-05-08, 修订日期: 2006-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(60174032)和辽宁省教育厅高校科研项目(20060379)资助

作者简介: 李刚, 1959年生, 天津大学精密仪器及光电子工程学院教授 e-mail: ligang59@tju.edu.cn

以用脉搏波的基波分量替代峰峰值。

采用多个脉搏周期的长时间采样序列进行 FFT 计算, 实践证明误差较大。本文采用单个脉搏周期内的采样序列进行频域分析。通过对不同周期测得的动态光谱序列进行粗大误差剔除来提高动态光谱的检测精度。因为每次截取窗长度为一个脉搏周期, 这样处理可以减少基线漂移等低频干扰和脉搏间波形差异等带来的误差。

2 处理方法

通过对提取的动态光谱斜率序列进行粗大误差评价, 可

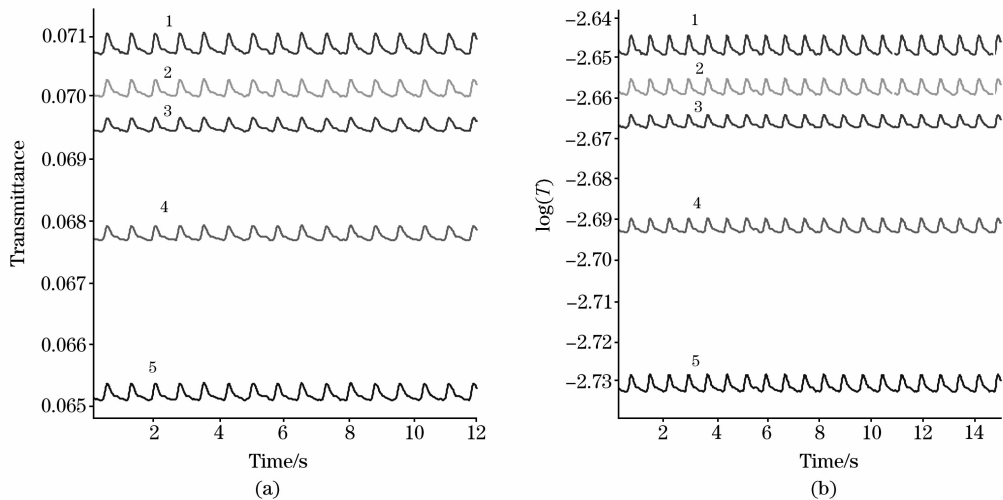


Fig. 1 Photoelectric pulse wave (a) and the logarithm pulse wave (b)

1: 1 110 nm; 2: 1 115 nm; 3: 1 120 nm; 4: 1 125 nm; 5: 1 130 nm

要计算每个对数脉搏周期上的基波分量, 就要准确找到对数脉搏波的最小值(谷值)。利用脉搏波的周期性, 可以先找到第一个周期的谷值。对对数脉搏波做傅里叶变换, 变换结果的基波分量对应的频率就是脉搏波的中心频率。据此可以知道每个脉搏波周期的大概的采样点数 N 。利用第一个谷值加上 N , 可以得到下一个谷值的大概位置。以这个位置为中心, 前后给出一个变动量 δ , 在 $[-\delta, \delta]$ 这个范围内找谷最小值, 并用空心原点标记。

如图 2 所示, 脉搏波下方的每两个空心圆点之间为一个脉搏波周期。在频域中对单个对数脉搏周期求傅里叶变换的基波分量, 再做两个波长基波分量的比值, 所得就是这 2 个波长动态光谱的斜率。把不同周期上求得的斜率序列作为粗大误差评价样本进行粗大误差剔除。该评价样本的实际意义就是为不同波长对脉动脉血的吸收比。在稳定检测状态下, 相对短时间内, 人的血液成分不会发生变化, 理论上不同波长对脉动脉血的吸收比的测量真值是恒定的。由正态分布定义, 该评价样本是符合正态分布规律的。

2.2 软件实现

系统评价动态光谱斜率序列粗大误差的流程如图 3。首先, 把所有的动态光谱斜率评价样本 x_i 列入计算, 作为粗大误差评价目标。求检验评价样本 x_i 的均值和依据贝塞尔公

以剔除动态光谱序列中含有粗大误差的奇异点, 取动态光谱序列的统计平均作为动态光谱输出值, 可以在动态光谱频域提取方法和粗大误差剔除后, 进一步提高动态光谱的处理精度。

2.1 评价样本

粗差评价样本来自多通道同时采集的 1 130, 1 125, 1 120, 1 115, 1 110 nm 的光电脉搏波信号。首先对测量的多通道脉搏波信号进行处理, 滤除高频噪声、基线漂移, 最后提取呼吸干扰, 然后求 1 130 和 1 125 nm 两个波长的对数脉搏波。如图 1 所示。

式算的单个测量列的标准偏差 s 。求绝对值最大的剩余偏差 $x_i - \bar{x}$ 。若 $|x_i - \bar{x}| > 2s$ (比 $3s$ 更为严格的标准), 判定样本中含有粗大误差并予以剔除。否则, 认为评价样本中没有粗大误差。由于不同波长的脉搏波是同时测得的, 所以在剔除粗大误差时, 需要在 5 个波长的动态光谱上同时剔除粗大误差。最后, 对多个周期对应的动态光谱值做统计平均, 作为动态光谱最终输出测量值。

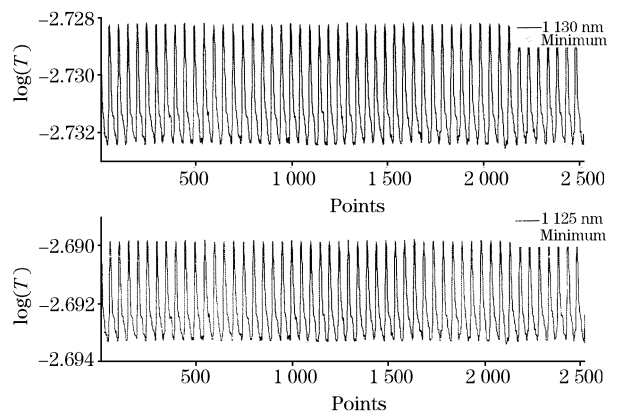


Fig. 2 The partitioned operation of single periods of the photoelectric pulse wave

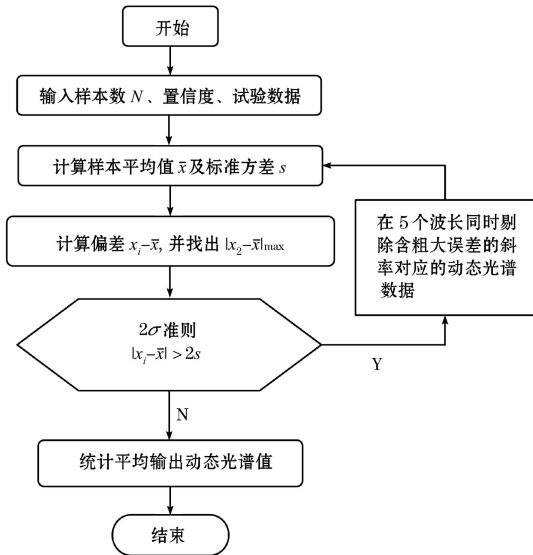


Fig. 3 Flow chart of the outlier process

3 结果与讨论

图 4 是含有粗大误差的动态光谱斜率奇异点的去除效果。

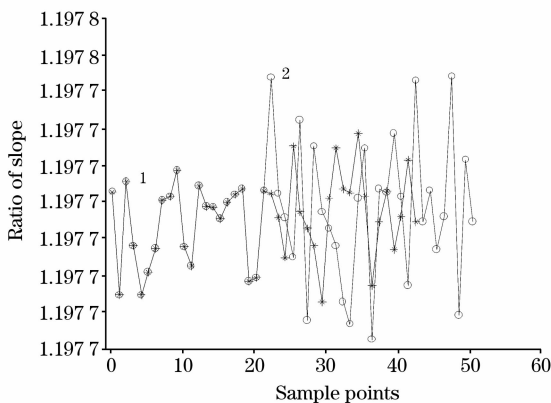


Fig. 4 Comparison between ratios of slope before and after the outlier elimination

1: Processed ratio of slope; 2: Original ratio of slope

表 1 是波长为 1 130 nm 各个周期上频域提取的动态光谱数据。根据 GB 8170—87 规则对评价样本数据进行了修约。表中加上方框的数据是根据前面的评价结果剔除的动态光谱中的含粗大误差的奇异点。其他波长的动态光谱序列中奇异点位置是和 1 130 nm 一样的。限于篇幅，这里不再赘述。

由于光谱检测精度是指同一波长处多个光谱值重复测量值的平均值与标准偏差之间的比值，它是通过对被测样品的多次重复性测量实验而得到的。剔除斜率粗大误差对应的动

态光谱数据后，动态光谱的标准偏差范围变小了，精度提高了。作图可以得到在去除含有粗大误差的奇异点之前与去除含有粗大误差的奇异点之后动态光谱的误差限对比效果，如图 5 所示。

Table 1 Series of dynamic spectrum at 1 130 nm (51 points)

0.040	0.035	0.041	0.038	0.039
0.033	0.043	0.039	0.040	0.040
0.040	0.038	0.043	0.040	0.041
0.042	0.039	0.039	0.043	0.039
0.037	0.040	0.047	0.040	0.041
0.037	0.043	0.038	0.043	0.038
0.039	0.045	0.040	0.034	0.042
0.044	0.034	0.043	0.043	0.047
0.043	0.036	0.046	0.043	0.043
0.037	0.036	0.042	0.038	0.043
0.044				

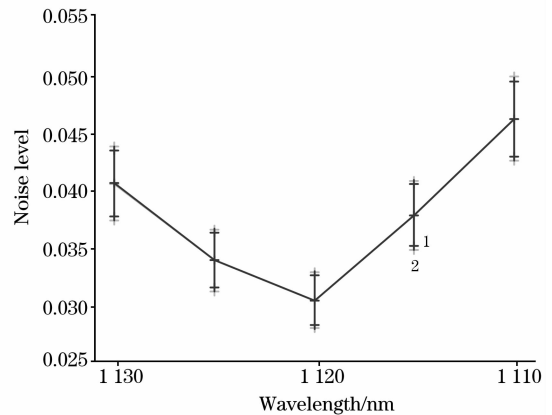


Fig. 5 The error limit of dynamic spectrum before and after the outlier elimination

1: Original limit of error; 2: Present limit of error

最后对剔除了含粗大误差的奇异值后的动态光谱数据求统计平均值，作为输出的动态光谱测量值。由于平均值的分布范围比单次测量测得值的分布范围小 \sqrt{n} 倍，也就是测量精度相应地提高了 \sqrt{n} 倍。

4 结论

本文利用经典的统计估值方法，对动态光谱含有粗大误差的奇异点进行剔除，并对多次重复测量的动态光谱进行统计平均作为最终测量结果。实验结果表明，在动态光谱测量中，含粗大误差的奇异点剔除和多次重复测量求统计平均的处理方法能降低动态光谱的误差限，提高动态光谱的测量精度。

参 考 文 献

- [1] CHU Xiao-li, YUAN Hong-fu, LU Wan-zhen(褚小立, 袁洪福, 陆婉珍). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2005, 25(6): 886.
- [2] ZHANG Yue, LÜ Li-na, XU Ke-xin(张 玥, 吕丽娜, 徐可欣). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2005, 25(4): 512.
- [3] LIU Yu-liang, LI Gang(刘玉良, 李 刚). Signal Processing(信号处理), 2007, 23(1): 64.
- [4] CHEN Da, WANG Fang, SHAO Xue-guang(陈 达, 王 芳, 邵学广). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2004, 24(6): 672.
- [5] Lafrance Denis, Lands Larry C, Burns David H. Talanta, 2003, 60(4): 635.
- [6] Da Costa Filho Paulo A, Poppi Ronei J. Analytica Chimica Acta, 2001, 446(1-2): 39.
- [7] Rosen Noah A, Charash William E, Hirsch Erwin F. Journal of Surgical Research, 2002, 106(2): 282.
- [8] Nahm W, Gehring H. Sensors and Actuators, B: Chemical, v B29, n 1-3, Oct, 1995, 174.
- [9] Niwayama M, Shiga T, Lin L, et al. Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE, 1998, 4: 1849.
- [10] Li G, Liu Y L, Lin L, et al. Proceedings of the Third International Symposium of Instrumentation Science and Technology, 2004, 3: 875.
- [11] LI Gang, LI Xiao-xia, LIN Ling, et al(李 刚, 李晓霞, 林 凌, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2006, 26(2): 263.
- [12] Li Qingbo, Wang Yan, Xu Kexin. Proceedings of SPIE, 2002, 265.
- [13] FEI Ye-tai(费业泰). Error Theory and Data Processing(误差理论与数据处理). Beijing: China Machine Press(北京: 机械工业出版社), 1987.
- [14] Delpy D T, Cope M, Zee V D, et al. Phys. Med. Biol., 1988, 33(10): 1433.
- [15] Wang Yan, Li Gang, Lin Ling, et al. J. Phys.: Conf. Ser., 2005, 13: 284.

Using the Statistic Preprocessing Method to Raise the Measurement Accuracy of Dynamic Spectrum

LI Gang¹, LIU Yu-liang^{1,2}, LIN Ling¹, WANG Yan^{1,3}

1. College of Precision Instruments and Opto-Elec Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China
2. College of Electric Information and Automation, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China
3. Department of Electronic Engineering, Liaoning University of Technology, Fuxin 123000, China

Abstract The development of the non-invasive measurement of blood compositions by near-infrared spectroscopy has attracted significant interests in recent years. But it has not yet been applied to the clinical field except the oximeter. The most important and difficult problem is that the instrument accuracy does not meet the requirement of the non-invasive measurement of blood compositions due to the effect of the individual discrepancy and complicated measurement conditions. So how to reach the instrument accuracy required is its key part. Based on the dynamic spectroscopy, a new non-invasive measurement method of blood compositions is presented, where the measurement accuracy is raised through the outlier eliminating and the assembly average of several measurement results. It has been proved by the experiment that the measurement accuracy can be raised by the outlier eliminating and the assembly average of several measurement results.

Keywords Dynamic spectrum; Outlier; Statistical estimation theory; Measurement accuracy

(Received May 8, 2006; accepted Aug. 16, 2006)