

# 动态光谱频域提取的 FFT 变换精度分析

李 刚, 李秋霞, 林 凌, 李晓霞, 王 焱, 刘玉良

天津大学精密仪器与光电子工程学院, 生物医学工程系, 天津 300072

**摘 要** 近红外光谱无创血液成分检测因其测量方法的优越性, 已经成为生物医学领域的研究热点之一。但除血氧饱和度外, 目前还没有进入临床应用成果的报道, 其关键在于个体差异和测量条件对检测精度的影响。文章先介绍一种可以消除个体差异的新的检测方法——动态光谱法, 再从其原理出发, 推导出基于傅里叶变换的动态光谱频域提取法。同时, 文章通过实验, 研究了采样率, 采样周期个数, 非同步采样对(快速傅里叶变换(FFT)精度的影响。分析结果表明: 选择合适的采样率, 采样信号周期个数、并利用现有的加窗和插值算法能够大幅度提高动态光谱数据的精度。

**主题词** 无创检测; 动态光谱; 血液成分; 测量精度; 快速傅里叶变换

**中图分类号:** TG 115.3+3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0593(2006)12-2177-04

## 引 言

采用近红外光谱法进行无创血液成分检测, 已经成为世界上的研究热点之一<sup>[1-3]</sup>。但是, 由于近红外光谱法进行无创血液成分检测时, 光谱信噪比和测量精度较低。目前除了血氧饱和度以外, 还没有关于可应用于临床的在体无创血液成分检测仪器的报道。

在近红外光谱检测法所面临的诸多问题中, 个体差异和检测条件对光谱测量的影响, 是突出的技术问题。个体差异是指不同个体或同一个体被测部位生理结构上的差异, 及生理状况的时变性; 检测条件包括探头压力、检测位置、环境温度、光源光谱的平坦程度等。

为了消除个体差异和测量条件对光谱检测的影响。文献[4]提出了一种基于光电容积脉搏波和傅里叶变换的新检测方法——动态光谱频域提取法。它从原理上消除了个体差异和测量条件对光谱检测的影响。同时, 为了进一步研究光谱提取的精度, 本文通过实验, 研究了采样率, 采样周期个数, 非同步采样对快速傅里叶变换(FFT)精度的影响。分析结果表明: 选择合适的采样率, 采样信号周期个数、并利用现有的加窗和插值算法能够大幅度提高动态光谱数据的精度。

## 1 动态光谱法

### 1.1 动态光谱法原理

动态光谱法是一种根据光电脉搏波的产生原理, 利用动

脉充盈与动脉收缩时吸光度的变化, 来测消除个体差异的检测方法。由于动脉的脉动现象, 使血管中血流量呈周期性变化, 而血液是高度不透明液体, 光照在一般组织中的穿透性比在血液中大几十倍。因此脉搏搏动的变化必然引起近红外光谱吸光度的变化, 如图 1 所示。考虑动脉血管充盈度最低状态, 来自光源的入射光没有受到脉动动脉血液的作用, 此时的最强出射光强  $I_{max}$ , 可视为脉动动脉血液的入射光  $I_0$ ; 而动脉血管充盈度最高状态的光电脉搏波谷点, 即脉动动脉血液作用最大的时刻, 此时的最弱出射光强  $I_{min}$ , 为脉动

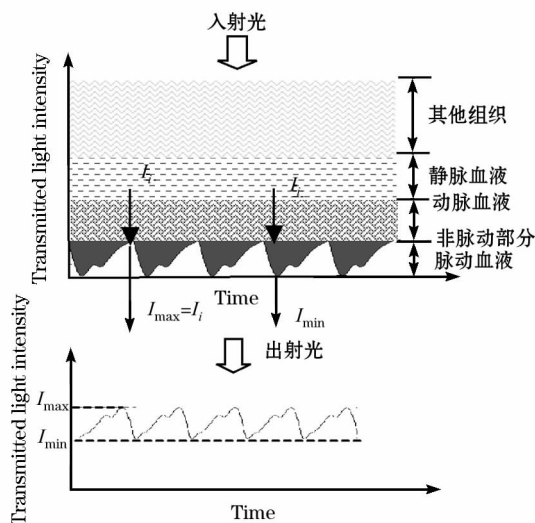


Fig. 1 The photoelectricity pulse signal

收稿日期: 2005-10-30, 修订日期: 2006-02-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(60174032)资助

作者简介: 李 刚, 1959 年生, 天津大学精密仪器与光电子工程学院教授

脉血液的最小出射光强。所以,通过记录动脉充盈至最大与动脉收缩至最小时的吸光度值,就可以消除皮肤组织、皮下组织等一切具有恒定吸收特点的人体成分对于脉动动脉血液吸光度的影响。

根据朗伯—比尔定律得

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i c_i d = -\ln \frac{I_0(\lambda)}{I_1(\lambda)} = -\ln \frac{I_{\min}}{I_{\max}} = A \quad (1)$$

式中  $A$  为脉动动脉血液吸光度,  $d$  为最大充盈状态下脉动动脉血液的等效光程长。

动态光谱是从多个波长的入射光所对应的光电脉搏波中,提取相应的脉动动脉血液的吸光度,再由这些吸光度组成的光谱。检测得到动态光谱后,根据已知的血液各组分的吸光系数和脉动动脉血液的等效光程长  $d$ ,即可计算出各组分的浓度  $c_i$ 。

## 1.2 动态光谱频域提取法

血液成分无创检测中对光谱精度的要求很高。以血液成分中的最重要的血糖成分检测为例,如果要实现临床血糖测量精度要求  $5 \text{ mg} \cdot (\text{dL})^{-1}$ ,光谱精度至少要达到  $10\,000:1$  以上<sup>[5]</sup>。如此高的光谱精度要求,必然为时域中的动态光谱提取带来了较大的困难。因此,在信号处理方面,需要采用一种可以提高信号信噪比,降低对系统性能要求的处理方法。

对动态光谱定义公式(1)进一步的推导得到

$$A = -\ln \frac{I_{\min}}{I_{\max}} = \ln I_{\max} - \ln I_{\min} = kX(1) \quad (2)$$

式中:  $X(1)$  为对数脉搏波 FFT 后提取的基波幅度值,  $k$  为比例系数。

(1) 先对检测到的脉搏波光强信号取自然对数,取对数后的信号并不会改变其极值与原信号极值之间的对应关系,即原信号中的极值。检测出取对数后的光电脉搏波的峰峰值  $(\ln I_{\min} - \ln I_{\max})$ ,即可得到动态光谱  $A$  的值。

(2)  $k$  表征了信号两个特征量——峰峰值和基波值之间的比例关系。由于傅里叶变换本身的特性是线性的,所以,将时域中的信号变换到频域中时,这两种信号的特征量具有时域—频域的线性关系。

(3) 由于各个波长下的脉搏波具有相似形,即它们的光强数值只相差一个系数。这对于光谱而言,所有波长吸光度的值同时乘一个系数,并不改变光谱的性质。所以  $k$  数值大小不会影响光谱测量的结果。

从多个波长的入射光所对应的光电脉搏波中,分别提取出相应于对数脉搏波的峰峰值,再根据公式(2),组成吸光度光谱,这就是动态光谱的频域提取方法。

## 2 傅里叶变换的精度分析

由于 FFT 对信号信噪比的改善作用,利用傅里叶变换将时域问题转换成频域问题,可得到较好的结果<sup>[6]</sup>。但是 FFT 计算本身存在误差,会降低光谱测量的精度。下面通过实验,研究了采样率,采样周期个数,非同步采样对 FFT 变换精度的影响;另外,再验证利用现有的加窗和插值算法是

否能够大幅度提高动态光谱数据的精度。

### 2.1 采样周期个数,采样率,非同步采样对 FFT 精度的影响

理想中应该是采样率越高变换精度越高,但实际上由于硬件系统的限制,不可能达到无限高的采样率。且实践中过高的采样率会造成采样精度的下降。而对于采样周期个数,如果是同步采样,不会影响基波幅值的提取。但是实际采样时,往往不能达到采样的同步性。采样周期个数的选择对幅值精度的影响也是需要折中平衡的重要因素。

#### 2.1.1 采样率和采样周期个数的不同对基波幅值提取精度的影响

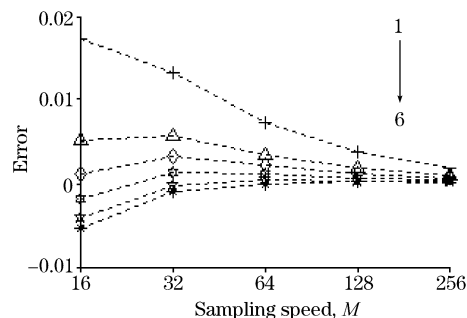
(1) 利用纯净信号: 正弦函数  $y = \sin(2\pi f * i/N)$ , 其中频率  $f$  设为 1,  $N$  是采样数据点的总个数,振幅设为 1,  $i = 1, 2, \dots, N$ 。

(2) 设采样周期个数为  $m$ , 采样周期为  $f_s$ , 因为是非同步采样,所以假设采样时的  $N$  比整数个周期少采了一个点,实际数值为  $f_s * m - 1$ 。然后对应不同的采样率和采样周期进行傅里叶变换得到的结论,如表 1 所示。

**Table 1 The value of the fundamental wave of the experimental simulation signal under the same unsynchronized sampling, the different sampling speed and the sampling periodicity**

采样 周期 $N$	采样率 $M$				
	16	32	64	128	256
1	1.017 2	1.013 2	1.007 3	1.003 8	1.001 9
2	1.005 1	1.005 7	1.003 4	1.001 8	1.001 0
3	1.001 2	1.003 3	1.002 2	1.001 2	1.000 6
5	0.998 1	1.001 3	1.001 1	1.000 7	1.000 4
10	0.995 9	0.999 8	1.000 4	1.000 3	1.000 2
20	0.994 7	0.999 1	1.000 0	1.000 2	1.000 1

图 2 显示了采样率变化对基波计算幅值误差的影响。可以看出随着采样率的增加,基波计算幅值精度提高,且误差下降逐渐变缓。当采样率较低时,曲线的扩散范围较大,但采样率越高,曲线的扩散程度越低,采样周期对基波计算幅值的影响越来越小。可见,采样率越高,幅值提取精度越高,且采样周期不同带来的精度影响越低。



**Fig. 2 Influence of the sampling speed**

1—6 为不同脉搏采样周期数

1: 1; 2: 2; 3: 3; 4: 5; 5: 10; 6: 20

图 3 显示了采样周期对基波计算幅值的影响：可以看出基波幅值计算精度并不是随着采样周期个数的增加而提高。幅值的具体数值是随着采样周期个数的增加而单调下降，但误差却也从正方向的误差降低，变为负方向的误差增加。可见，采样率低时，采样周期数目并不是越高越好，当它达到某一个值时，幅值的计算精度达到最高；而采样率高时，可以不考虑采样周期个数的影响。

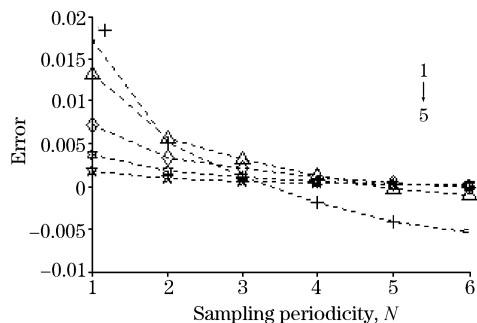


Fig. 3 Influence of the sampling periodicity

1—5 为一个脉搏波周期中的采样数  
1: 16; 2: 32; 3: 64; 4: 128; 5: 256

2.1.2 周期采样的失步度对基波幅值精度的影响

(1)利用纯净信号：正弦函数  $y = \sin(2\pi f * i/N)$ ，其中  $f$  是归一化的频率， $N$  是采样数据点的总个数， $i = 1, 2, \dots, N$ 。

Table 2 The value of the fundamental wave of the experimental simulation signal under the same number of the sampling dot and the different unsynchronized sampling

周期数	频率 $f$										
	0.90	0.95	0.97	0.98	0.99	1.00	1.01	1.02	1.03	1.05	1.10
1	1.025 1	1.020 2	1.013 9	1.009 1	1.005 6	1	0.994 0	0.989 8	0.983 3	0.972 2	0.944 7
2	0.946 9	1.003 1	1.007 9	1.006 9	1.004 9	1	0.993 3	0.988 0	0.979 2	0.963 0	0.919 3
4	0.714 6	0.938 6	0.984 4	0.998 1	1.001 8	1	0.990 7	0.981 1	0.962 9	0.924 9	0.778 2
8		0.731 7	0.897 6	0.964 0	0.989 7	1	0.980 3	0.953 7	0.897 7	0.763 1	
16			0.646 5	0.840 9	0.943 2	1	0.939 2	0.847 0	0.645 9		

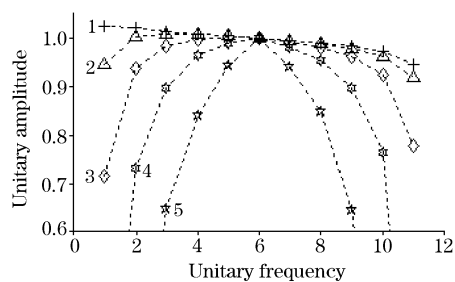


Fig. 4 Data of the experimental simulation signal

1—5 为实验的脉搏波周期数  
1: 1; 2: 2; 3: 4; 4: 8; 5: 16

通过以上采样率，采样周期，非同步采样程度对傅里叶变换基波幅值提取精度的影响的分析，我们可以得出傅里叶变换中采样率，采样周期的选择。一般是根据具体的系统条件，尽可能的选择高的采样率，这样不仅可以提高精度，而

(2)先假设在一个周期内产生了  $N=256$  个数据点，进行傅里叶变换后得到基波的幅值。其次，保持 256 个采样点数不变，把正弦波的归一化频率增加或减少 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.1，这样 256 个采样点就不会恰好对应一个整周期了，且呈现不同程度的非同步采样，最小的非同步程度是 1%，最大的达到了 10%，一般来说脉搏波的采样是对采样周期的判断误差不会达到 10% 以上。

(3)增加采样周期个数，再保持 256 个采样点数不变，周期数变成 2, 4, 8, 16 个，采样率变化随之而变，再按照步骤 (2) 改变非同步程度，得到数据如表 2 所示。

为了更好的反映非同步程度对基波幅度提取精度的影响，我们将上述数据用图 4 表示出来，能更加直观的反映。从图 4 可以看出。

- a. 非同步采样时，失步偏差越高，对基波幅值的精度影响越大。这一现象从非同步采样原理就可解释出来；
- b. 当采样周期个数较低，采样率较高时，基波的傅里叶计算幅值精度受周期采样的非同步程度的影响较低，即图中采样周期为 1，采样率为 256 时的曲线明显变化趋势较缓，此时的基波幅值受非同步的影响较小；
- c. 从表 2 中可以看出，采样周期和采样率分别为 1, 256，即使周期采样的误差达到 10% 时，基波幅值的误差仅为 3% 左右。但当采样周期和采样率分别为 16, 16，周期采样的误差为 1% 时，基波幅值的误差就大于 5%。所以，同样失步条件下周期数越多，其幅度偏离实际幅度也越厉害。

且可以减弱非同步采样对幅值精度的影响。对于采样周期的选择则不是越高越好，应该结合采样率的选择结果，选择合适的信号采样周期个数，才能达到高精度动态光谱的目的。

2.2 谐波分析中的高精度 FFT 算法

由于以上的分析采用的是“纯净”信号。实际信号不可能是频率单一，没有噪声干扰的纯净信号。此时，频谱泄漏和栅栏效应带来的误差，对傅里叶变换精度的影响较大，必须要有高精度的 FFT 算法来提高测量精度。

以下，根据加窗和插值的原理，通过实验来验证现有的高精度 FFT 算法能达到的精度，是否满足动态光谱数据的精度要求。实验中采用了一种现有的将窗口法与基于频域内插 2 种算法结合的高精度算法<sup>[7]</sup>，对信号  $x(k)$  进行傅里叶变换： $x(k) = 0.2 + 6.0\sin(2\pi \cdot (20.2k/N)) + \sin(2\pi \cdot (60.6k/N))$ 。

采样频率为 2 048 Hz，共采样了  $N=2 048$  个数据点。非同步采样，利用加窗和插值算法后得到的基波幅值为

5.999 999 950, 相对于信号的真实值 6.0, 其精度高达  $8.33 \times 10^{-9}$ 。如此高的 FFT 变换精度完全可以满足高精度的测量。

现有的加窗和插值算法减小 FFT 的泄漏误差, 使动态光谱数据的提取精度大幅度地提高, 为应用动态光谱法实现血液成分的无创检测提供了可能性。

### 3 结 论

综上所述, 选择合适的采样率和采样周期个数, 并利用

#### 参 考 文 献

- [1] Lafrance Denis, Lands Larry C, Burns David H. *Talanta*, 2003, 60(4): 635.
- [2] Rosen Noah A, Charash William E, Hirsch Erwin F. *Journal of Surgical Research*, 2002, 106(2): 282.
- [3] DING Hai-shu, WANG Feng, LIN Fang, et al(丁海曙, 王 锋, 林 芳, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2001, 21(2): 155.
- [4] LI Gang, LIU Yu-liang, LIN Ling, et al. *Dynamic Spectroscopy for Noninvasive Measurement of Blood Composition, 3rd International Symposium on Instrumentation Science and Technology*, Aug 18-22, 2004, Xi'an, China, pp3-0875-0880.
- [5] 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.
- [6] Li Qingbo; Wang Yan; Xu Kexin. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering 2002*, 4916: 457.
- [7] Yu sheng, Chen guangju. *Journal of UEST of China*, 1999, 28(5): 520.

## Discussion about the Prediction Accuracy for Dynamic Spectrum by Partial FFT

LI Gang, LI Qiu-xia, LIN Ling, LI Xiao-xia, WANG Yan, LIU Yu-liang

College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** The development of near-infrared-based techniques for the noninvasive determination of blood component concentrations has attracted significant interest in recent years. But the noninvasive measurement of blood compositions has not yet been applied to the clinical field except blood oxygen saturation. The most important and also difficult problems are the effects of individual discrepancy and complicated measurement conditions. In the present article, the approach of dynamic spectrum (DS) is introduced, which is based on the principle of photoplethysmography. It is very difficult too to pick up DS with high precision in time domain. In order to extract the DS with high accuracy, the FFT method and its leakage are discussed. The influences of sampling speed, sampling signal periodicity, window function and unsynchronized sample are analyzed by emulating experiments. The result of emulating experiments shows that choosing certain sampling speed, sampling signal periodicity, window function and interpolation arithmetic will improve accuracy observably. This provides necessary condition for the clinical application of DS.

**Keywords** Noninvasive measurement; Dynamic spectrum; Blood compositions; Prediction accuracy; FFT

(Received Oct. 30, 2005; accepted Feb. 19, 2006)