

基于 Nuttall 自卷积窗 FFT 算法的生物电阻抗谱多频率同步测量方法

杨宇祥^① 张甫^① 乔洋^① 张雯^① 温和^② 唐求^②

^①(西安理工大学机械与精密仪器工程学院 西安 710048)

^②(湖南大学电气与信息工程学院 长沙 410082)

摘要: 传统的扫频式生物电阻抗谱(BIS)测量法难以准确反映生物体真实的阻抗信息, 开发 BIS 的多频率同时快速测量方法具有重要意义。该文提出一种基于多频率同步(MFS)信号激励和加窗改进 FFT 算法的 BIS 多频率同步快速测量方法。该文首先介绍了一种 7 频率同步信号的合成及其频谱特性, 提出了性能优良的 Nuttall 自卷积窗函数, 并构建了基于 Nuttall 自卷积窗的改进插值 FFT 谐波分析算法, 从而在理论上论证了 BIS 多频率同步快速测量的可行性, 为下一步开发实际的 BIS 快速测量系统提供了技术支持。

关键词: 生物电阻抗谱; 多频率同步信号; Nuttall 自卷积窗; 加窗插值 FFT 算法

中图分类号: TM938.84; R318.03

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)01-0250-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00348

Multi-frequency Synchronized Measurement Method of Bioimpedance Spectroscopy Based on Nuttall Self-convolution Windowed FFT Algorithm

Yang Yu-xiang^① Zhang Fu^① Qiao Yang^① Zhang Wen^① Wen He^② Tang Qiu^②

^①(School of Mechanical and Precision Instrumentation Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

^②(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Since the traditional frequency-sweeping based Bio-Impedance Spectroscopy (BIS) measurement method can not reflect accurately the true impedance of organism, the development of multi-frequency simultaneous fast measurement method of BIS has significance. A BIS Multi-Frequency Synchronized (MFS) measurement method is proposed based on MFS signal excitation and a windowed FFT algorithm. First, the synthesis of a seven-frequency synchronized signal, as well as its spectral characteristic, is introduced. Then, a Nuttall self-convolution window function with excellent performance is put forward, and the improved interpolation FFT-based harmonic analysis algorithm based on this window is built. It validates theoretically the feasibility of the proposed BIS Multi-Frequency Synchronized fast measurement method, and provides technical support for development of practical BIS fast measurement systems.

Key words: Bio-Impedance Spectroscopy (BIS); Multi-Frequency Synchronized (MFS) signal; Nuttall self-convolution window; Windowed interpolation FFT algorithm

1 引言

生物电阻抗谱(Bio-Impedance Spectroscopy, BIS)是指生物体在通过低于兴奋阈值的交流弱电流时所表现出的导电特性和介电特性, 它反映了微观细胞层次的电特性^[1]。通过 BIS 的测量可以了解被测组织的生理、病理状态等丰富的功能信息, 被认为是未来最具潜力的疾病早期诊断手段之一, 近几年在组织缺血监测^[2]、乳腺癌诊断^[3]、病人体液监测^[4,5]、人体水合作用状态评估^[6]等方面获得了成功

的应用, 预示着 BIS 技术在疾病的无创检测、早期诊断、连续监护等方面的远大的未来。

BIS 技术以多频率、复阻抗测量为基础, 当前流行的 BIS 测量法本质上都属于扫频测量法, 即每次测量时注入单频率激励电流, 从低频到高频依次扫频完成测量, 耗时较长^[7]。而生物体的生理状态受血流、心跳等因素的影响而连续快速动态变化, 因此 BIS 的扫频测量不能准确反映生物体在某一时刻的阻抗频谱信息^[8,9]。BIS 测量技术的发展方向是多频率同步快速测量法, 即通过注入多频率激励电流, 同时测得多个频率点的阻抗信息, 大大缩减测量时间, 以更准确地反映被测体在某时刻的真实生理状态^[10,11]。

2013-03-18 收到, 2013-07-18 改回

国家自然科学基金(61273271, 30900317), 中国博士后科学基金(20110491674)和陕西省教育厅科学研究计划(12JK0527)资助课题

*通信作者: 杨宇祥 yangyuxiang@xaut.edu.cn

号 $f(7, t)$ 在 BIS 测量上具有如下优点:

(1) 信号本身含有 7 个幅值较大的主谐波分量信号, 各主谐波分量的幅值基本相等, 可保证 BIS 在主谐波频率上进行等精度测量, 信噪比高。

(2) 主谐波分量信号的起始相位相同, 非常有利于复阻抗相位的准确测量。

(3) 主谐波分量的频率按 2^n 步进, 覆盖的频率范围大, 有利于提高 Cole-Cole 阻抗圆图的拟合精度^[4]。

3 基于 Nuttall 自卷积窗的改进插值 FFT 算法

BIS 多频率同步测量实质上是求解多频率同步信号 $f(N, t)$ 中 N 个主基频点正弦分量的电压幅值和相位, 属于谐波分析的范畴。快速傅里叶变换(FFT)算法是目前应用最广泛的谐波分析算法。但由于严格的同步采样和整周期采样无法实现, FFT 算法存在频谱泄漏和栅栏效应, 影响各频率分量测量的准确度。

本文在长期研究加窗改进 FFT 算法^[15]的基础上, 构建了频谱函数简单、旁瓣性能突出、主瓣性能优良的新型 Nuttall 自卷积窗函数, 以减少频谱泄漏和栅栏效应的影响, 研究基于新型窗函数的改进插值 FFT 谐波分析算法。

3.1 Nuttall 自卷积窗设计

Nuttall 窗是一种余弦组合窗, 其时域表示为

$$w_N(n) = \sum_{m=0}^{M-1} (-1)^m b_m \cos\left(\frac{2\pi}{N} mn\right) \quad (4)$$

其中 M 为窗函数的项数; $n=0, 1, \dots, N-1, N$ 为窗函数的长度; b_m 应满足约束条件 $\sum_{m=0}^{M-1} b_m = 1$, $\sum_{m=0}^{M-1} (-1)^m b_m = 0$ 。典型的 Nuttall 窗函数系数如表 2 所示。

表 2 典型的 Nuttall 窗函数系数表

窗系数	3 项 1 阶	4 项 3 阶	4 项 1 阶	3 项最小旁瓣	4 项最小旁瓣
b_0	0.40897	0.338946	0.355768	0.4243801	0.3635819
b_1	0.50000	0.481973	0.487396	0.4973406	0.4891775
b_2	0.09103	0.161054	0.144232	0.0782793	0.1365995
b_3	-	0.018027	0.012604	-	0.0106411

4 项 3 阶 Nuttall 窗旁瓣峰值电平值低, 旁瓣衰减速率最高, 具有最优的旁瓣性能, 因此本文选用 4 项 3 阶 Nuttall 窗。

Nuttall 窗的频谱函数 $W_N(\omega)$:

$$W_N(\omega) = \sum_{m=0}^{M-1} (-1)^m \frac{b_m}{2} \cdot \left[W_R\left(\omega - \frac{2\pi}{N} m\right) + W_R\left(\omega + \frac{2\pi}{N} m\right) \right] \quad (5)$$

其中 $W_R(\omega)$ 为矩形窗的频谱函数, 表达式为

$$W_R(\omega) = \frac{\sin(\omega N/2)}{\sin(\omega/2)} e^{-j\omega(N-1)/2} \quad (6)$$

Nuttall 自卷积窗定义为若干个相同的 Nuttall 窗进行时域卷积运算, p 阶 Nuttall 自卷积窗可表示为

$$w_{N-p}(n) = \underbrace{w_N(n) * w_N(n) * \dots * w_N(n)}_p \quad (7)$$

其中下标 p 表示参与卷积运算的 Nuttall 自卷积窗的个数。

根据卷积定理, p 阶 Nuttall 自卷积窗的频谱函数为参与卷积的 Nuttall 窗的频谱函数的 p 次幂, 即

$$W_{N-p}(\omega) = \underbrace{W_N(\omega) W_N(\omega) \dots W_N(\omega)}_p = [W_N(\omega)]^p \quad (8)$$

图 3 给出了长度为 $N = 128$ 的 1~4 阶 Nuttall 自卷积窗的归一化对数频谱。

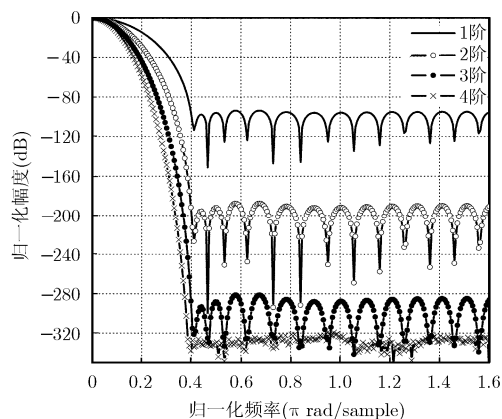


图 3 1-4 阶 Nuttall 自卷积窗的幅频响应曲线

由图 3 可见, Nuttall 自卷积窗的旁瓣峰值电平与旁瓣衰减速率均和卷积阶数成正比。这表明, 随着卷积阶数的增加, Nuttall 自卷积窗的旁瓣性能得到迅速提高。考虑到计算复杂度和计算时间, 本文采用 4 阶 Nuttall 自卷积窗对信号进行截短, 以有效抑制频谱泄漏。

3.2 基于 Nuttall 自卷积窗的改进插值 FFT 算法

设单一频率正弦信号 $x(t)$ 经采样后得到的离散序列 $x(n)$ 为

$$x(n) = A_0 \sin\left(2\pi \frac{f_0}{f_s} n + \phi_0\right), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

其中 A_0 , f_0 , ϕ_0 分别为信号的幅值、频率和初相角;

f_s 为采样频率。

对式(9)所示的 $x(n)$, 用长度为 N 的 p 阶 Nuttall 自卷积窗进行截断, 截短后信号的离散频谱为

$$X(k) = \frac{A_0}{2j} e^{j\phi_0} \left[W_N \left(2\pi(k_1 - k_0)/N \right) \right]^p \quad (10)$$

其中 $k_0 = f_0 N / f_s$ 代表频率 f_0 在离散频谱中的位置。

设离散频谱中, k_0 附近的局部幅值最大和次最大的谱线分别为第 k_1 和第 k_2 根, 满足 $k_1 \leq k_0 \leq k_2 = k_1 + 1$ 。定义系数 $\alpha \in [-0.5, 0.5]$, 令 $k_0 = k_1 + 0.5 + \alpha$, 则第 k_1 和第 k_2 根谱线的幅值 y_1 和 y_2 是关于 α 的函数。

$$y_1 = |X(k_1)| = \frac{A_0}{2} \left| W_N \left(2\pi(-\alpha - 0.5)/N \right) \right|^p \quad (11)$$

$$y_2 = |X(k_2)| = \frac{A_0}{2} \left| W_N \left(2\pi(-\alpha + 0.5)/N \right) \right|^p \quad (12)$$

定义系数 β 为

$$\beta = \frac{y_2 - y_1}{y_2 + y_1} \quad (13)$$

将式(11), 式(12)代入式(13), 可得

$\beta =$

$$\frac{|W_{N-p} [2\pi(-\alpha + 0.5)/N]| - |W_{N-p} [2\pi(-\alpha - 0.5)/N]|}{|W_{N-p} [2\pi(-\alpha + 0.5)/N]| + |W_{N-p} [2\pi(-\alpha - 0.5)/N]|} = g(\alpha) \quad (14)$$

式(14)为复杂的有理式, 若直接求其反函数, 计算量较大。因此, 采用基于最小二乘法的多项式拟合方法对式(14)进行反拟合, 得到 α 关于 β 的多项式函数为

$$\alpha = g^{-1}(\beta) \approx a_1\beta + a_2\beta^2 + a_3\beta^3 + \dots + a_K\beta^K \quad (15)$$

其中 a_1, a_2, \dots, a_K 为拟合多项式的系数。

根据以上基于最小二乘法的频谱插值多项式拟合方法, 可求出加不同阶次的 Nuttall 自卷积窗时, 拟合多项式 $\alpha = g^{-1}(\beta)$ 的系数。

多项式最高次数 $K=7$ 时, 加 4 阶 Nuttall 自卷积窗后, 频谱插值多项式为

$$\alpha_{4th} = 0.2529\beta^7 + 0.4019\beta^5 + 0.7644\beta^3 + 11.9048\beta \quad (16)$$

离散频谱中, 在频率 f_0 附近找到局部幅值最大(第 k_1 根)和次最大(第 k_2 根)谱线后, 即可确定 y_1 和 y_2 。由式(13)计算出 β 后, 可利用频谱插值多项式(16)计算出相应的 α , 则信号幅值可以利用式(17)计算:

$$A_0 = \frac{2y_1}{\left| W_{N-p} \left[2\pi(-\alpha - 0.5)/N \right] \right|} \quad (17)$$

初相角为

$$\phi_0 = \arg[X(k_1)] + \frac{\pi}{2} - \arg \left\{ W_{N-p} \left[\frac{2\pi(-\alpha - 0.5)}{N} \right] \right\} \quad (18)$$

对于含有多个正弦谐波分量的多频率同步信号, 可以设置式(9)中的频率 f_0 等于某一特定频率 f_k , 求出在频率 f_k 下的谐波分量参数: 幅值 A_k 和初相角 ϕ_k 。

4 结束语

开发 BIS 的多频率快速测量具有重要意义。本文作者前期提出的多频率同步(MFS)信号具有多种理想时域和频域特性, 非常适合作为 BIS 测量激励信号。在此基础上, 本文发展了一种基于 Nuttall 自卷积窗改进 FFT 算法的 BIS 多频率同步快速测量方法, 提出了性能优良的 Nuttall 自卷积窗函数, 构建了基于 Nuttall 自卷积窗的改进插值 FFT 谐波分析算法, 并利用基于最小二乘法的多项式拟合方法, 给出了离散频谱插值多项式和谐波参数计算式, 从而在理论上论证了 BIS 多频率同步快速测量的可行性, 为下一步开发实际的 BIS 快速测量系统提供了技术支持。

参考文献

- [1] Grimnes SMartinsen O G. Bioimpedance and Bioelectricity Basics[M]. 2nd Edition, London: Elsevier Academic Press, 2008: 1-3.
- [2] Mellert F, Winkler K, Schneider C, et al.. Detection of (reversible) myocardial ischemic injury by means of electrical bioimpedance[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2011, 58(6): 1511-1518.
- [3] Czerniec S A, Ward L C, Lee M J, et al.. Segmental measurement of breast cancer-related arm lymphoedema using perometry and bioimpedance spectroscopy[J]. *Support Care Cancer*, 2011, 19(5): 703-710.
- [4] Hur E, Usta M, Toz H, et al.. Effect of fluid management guided by bioimpedance spectroscopy on cardiovascular parameters in hemodialysis patients: a randomized controlled trial[J]. *American Journal of Kidney Diseases*, 2013, 61(6): 957-965.
- [5] Parmentier S P, Schirutschke H, Schmitt B, et al.. Influence of peritoneal dialysis solution on measurements of fluid status by bioimpedance spectroscopy[J]. *International Urology and Nephrology*, 2013, 45(1): 229-232.
- [6] Utter A C, Meanuly S R, Riha B F, et al.. The validity of multifrequency bioelectrical impedance measures to detect changes in the hydration status of wrestlers during acute dehydration and rehydration[J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2012, 26(1): 9-15.
- [7] Min M, Paavle T, Annus P, et al.. Rectangular wave excitation in wideband bioimpedance spectroscopy[C]. Proceedings of the IEEE International Workshop on Medical Measurements and Applications, Italy, 2009: 268-271.

- [8] Tao S, Holmes D, Gawad S, *et al.*. High speed multi-frequency impedance analysis of single particles in a microfluidic cytometer using maximum length sequences[J]. *Lab on a Chip*, 2007, (8): 1034–1040.
- [9] 鞠康, 何为, 何传红, 等. 基于直接数字频率合成的混合频率恒流源设计[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(9): 2109–2114.
Ju Kang, He Wei, He Chuan-hong, *et al.*. Design of mixing frequency constant current source based on direct digital synthesizer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(9): 2109–2114.
- [10] Sanchez B, Schoukens J, Bragos R, *et al.*. Novel estimation of the electrical bioimpedance using the local polynomial method. Application to in vivo real-time myocardium tissue impedance characterization during the cardiac cycle[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2011, 58(12): 3376–3385.
- [11] Gordon R L R, Min M, Parve T, *et al.*. A virtual system for simultaneous multi-frequency measurement of electrical bioimpedance[J]. *International Journal of Bioelectromagnetism*, 2005, 7(1): 243–246.
- [12] 杨宇祥, 吕林涛, 乐静, 等. 基于 Walsh 函数的多频率同步信号合成方法[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(7): 1540–1545.
Yang Yu-xiang, Lü Lin-tao, Le Jing, *et al.*. Synthesis method of multi-frequency synchronized signals based on Walsh functions[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(7): 1540–1545.
- [13] Yang Y, Kang M, Lu Y, *et al.*. Design of a wideband excitation source for fast bioimpedance spectroscopy[J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(1): 013001.
- [14] Seoane F, Ward L C, Lindecrantz K, *et al.*. Automated criterion-based analysis for Cole parameters assessment from cerebral neonatal electrical bioimpedance spectroscopy measurements[J]. *Physiological Measurement*, 2012, 33(8): 1363–1377.
- [15] 温和, 滕召胜, 王永, 等. 改进加窗插值 FFT 动态谐波分析算法及应用[J]. *电工技术学报*, 2012, 27(12): 270–277.
Wen He, Teng Zhao-sheng, Wang Yong, *et al.*. Improved windowed interpolation FFT algorithm and application for power harmonic analysis[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2012, 27(12): 270–277.
- 杨宇祥: 男, 1974 年生, 博士, 副教授, 研究方向为生物医学信号检测与处理.
- 张 甫: 男, 1990 年生, 硕士生, 从事智能信息处理的研究.
- 温 和: 男, 1982 年生, 博士, 副教授, 研究方向为智能信息处理.
- 唐 求: 女, 1970 年生, 博士, 副教授, 研究方向为智能信息处理.