

数字锁相放大算法 MATLAB 仿真平台的设计与实现

李龙华, 梁天翼, 贾芸芳

(南开大学 信息技术科学学院, 天津 300071)

摘 要: 数字锁相放大(DLIA, Digital Lock In Amplifier)技术是信号分析和处理中的常用方法之一。本文在 DLIA 基本原理及算法的基础上, 利用 MATLAB 开发环境, 设计了基于 MATLAB 的 DLIA 算法仿真分析平台, 实现了 DLIA 算法的仿真。本文 DLIA 仿真分析平台可对 DLIA 算法中的关键参数设置进行综合评估, 并对用户所设置算法及参数的适用性进行分析, 较好地满足信号处理算法设计的需要, 具有很强的实用性。

关键词: 数字锁相放大; MATLAB; 仿真平台; 算法

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)09-0042-04

Design and Realization of a MATLAB Simulating Platform for Digital Lock in Amplifier's Algorithm

LI Long-hua, LIANG Tian-yi, JIA Yun-fang

(College of Information Technological Science, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Digital lock-in amplifier (DLIA) technology is one of the popular methods in signal analysis and processing. According to the principles and algorithms of DLIA, a simulation and analyzing platform for DLIA design was proposed in this work by the use of MATLAB. In this work, the calculation of the DLIA algorithms was realized, the settings of the main parameters in the calculation was comprehensive estimated. And the algorithms and their applicability were analyzed. By this presented DLIA simulation platform, the needs in the design of DLIA could be satisfied, so it was believed that it would have practical potentiality in this field.

Key words: DLIA; MATLAB; simulating platform; algorithm

1 引言

锁相放大技术起源于对微弱信号检测的需求, 第一台锁相放大器诞生于 1962 年, 并应用于俄歇电子谱仪中, 从大量二次电子中测得 Auger 电子^[1]。随着集成电路技术、数字信号处理(DSP)技术的飞速发展, 数字锁相放大(DLIA)已成为这一领域的新趋势, 具有精度高、稳定性好、灵活性强等优点, 得到了广泛应用^[2]。利用数字锁相放大器构建光电化学型蛋白质芯片测控系统, 并成功地实现了对多种肿瘤标志物的联合检测^[3]。采用双锁相放大系统, 可实现在脉冲强磁场强干扰环境下微弱电流信号的测量^[4]。

在 DLIA 的设计过程中, 互相关算法的设计是

其关键环节, 算法设计的质量直接影响 DLIA 的性能。自上世纪 80 年代至今先后提出了多种 DLIA 算法, 早期的大部分算法主要是通过加减计数或累加平均实现锁定放大的, 很好满足了当时实验检测的需要^[5-7]。随着 DSP 技术的进步, 数字相关解调算法得以实现, 并应用于 DLIA, 获得了较好的谐波抑制效果和较宽的工作频率^[8]。分段累加算法^[9]、快速锁相算法^[10]是 DLIA 设计中常用方法, 其中采样频率、数据长度等关键参数的设计直接影响 DLIA 的性能, 因此对算法及多种参数设计的仿真与结果分析, 是 DLIA 设计中的必要环节。

本文首先简述了 DLIA 基本原理及数字锁相放大算法理论, 然后提出了基于 MATLAB 的 DLIA

收稿日期: 2012-11-20; 修回日期: 2012-12-22

基金项目: 天津市应用基础及前沿技术研究计划(12JCZDJC22400)

互相关算法及其关键参数的仿真分析平台,并对该算法及关键参数的设计进行了仿真和结果分析,这对于进一步提高 DLIA 系统的设计效率具有较好的实际意义。

2 DLIA 原理与算法

2.1 DLIA 基本原理

DLIA 以互相关检测为基础,通过对待测信号 $x(t)$ 与参考信号 $r(t)$ 的互相关运算,实现对待测信号中有效信号 $s(t)$ 的提取,达到提高信噪比的目的。其中互相关原理简述如下,设:

$$x(t) = s(t) + n(t) \quad (1)$$

其中, $n(t)$ 为噪声信号。待测信号与参考信号的互相关运算为:

$$\begin{aligned} R_{xr}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T [s(t) + n(t)] \cdot r(t - \tau) dt \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T s(t) \cdot r(t - \tau) + n(t) \cdot r(t - \tau) dt \\ &= R_{sr}(\tau) + R_{nr}(\tau) \end{aligned} \quad (2)$$

由于参考信号与噪声之间是相互独立的,所以 $R_{nr}(\tau) = 0$, 进而 $R_{xr}(\tau) = R_{sr}(\tau)$ 。故可将待测信号中的噪声信号不予考虑。

2.2 DLIA 算法

基于上述 DLIA 原理,设其中的待测信号 $x(t)$ 为:

$$x(t) = s(t) = A \sin(2\pi f t + \theta) + DC \quad (3)$$

其中, A 为信号幅值, f 为信号频率, θ 为信号初相位, DC 为直流分量。同时,设参考序列为与其同频的正余弦序列:

$$S[k] = \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \quad (4)$$

$$C[k] = \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \quad k=0, 1, 2, \dots, M-1$$

设采样频率为 $f_s = Nf$ ($N \geq 3$ 且为整数), 采样间隔为 $\tau = \frac{1}{Nf}$ 。为建立简洁有效的互相关算法,对信号进行整周期采样,对信号采样 q 个周期,总采样点数为 $M = Nq$ 。对输入信号进行采样得到信号序列:

$$\begin{aligned} X[k] &= A \sin(2\pi f \cdot k\tau + \theta) + DC \\ &= A \sin\left(\frac{2\pi k}{N} + \theta\right) + DC \end{aligned} \quad (5)$$

($k=0, 1, 2, \dots, M-1$)

采样后的信号分别与正交的参考序列相乘实现数字相敏检波,再通过 M 点平均滤波器,完成互相关运算:

$$R_{xs} = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} X[k] \cdot S[k] \approx \frac{A}{2} \cos\theta \quad (6)$$

$$R_{xc} = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} X[k] \cdot C[k] \approx \frac{A}{2} \sin\theta \quad (7)$$

计算幅值和相位得:

$$A = 2 \sqrt{R_{xs}^2 + R_{xc}^2} \quad (8)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{R_{xc}}{R_{xs}}\right) \quad (9)$$

当 $x(t)$ 为 M 个采样点所构成的信号数组时,对于第 j ($j=0, 1, 2, 3, \dots, M-1$) 个采样点,经 DLIA 处理后,输出信号的幅值、相位分别为

$$A(j) = 2 \sqrt{R_{xs}(j)^2 + R_{xc}(j)^2} \quad (10)$$

$$\theta(j) = \tan^{-1}\left(\frac{R_{xc}(j)}{R_{xs}(j)}\right) \quad (11)$$

上述 DLIA 算法中,采样频率 f_s 、总采样点数 M 是决定 DLIA 信号处理效果的关键参数。但在参数设计的具体过程中,还需结合输入信号 $x(t)$ 的频率 f 、信噪比、幅值、波形等多项因素综合考虑。因此,对 DLIA 算法的研究有必要建立一个强有力的仿真平台,为 DLIA 算法提供了人机交互的仿真环境。

3 DLIA—MATLAB 仿真平台的设计与应用

3.1 系统设计

MATLAB 在科学计算、图形化用户界面 (GUI) 开发方面提供了丰富的资源。本文以 MATLAB 为开发工具,设计了数字锁相放大算法的仿真平台,系统设计框架如图 1 所示。本系统主要由 5 个模块构成。简述如下:

①主控界面为系统入口。负责进行参数的传递,以及由参数输入至参数分析,系统整体运行的控制;

②参数输入。主要完成被测信号的输入以及算法关键参数的输入,同时传输给算法设置;

③算法设置。完成算法的加载,本系统中使用的算法为经典数字相关解调法、分段累加法^[9]、快速锁相算法^[10];

④仿真结果。利用上述两个模块给定参数和算法信息进行仿真计算,并以图形的形式将仿真结果(幅值、相位)反馈给用户;

⑤参数分析。从信噪比改善、输出信号的准确性两个方面对关键参数设计进行综合仿真,并以对比曲线的形式显示出来。

3.2 系统应用与讨论

3.2.1 系统运行结果

本文建立了几种不同 DLIA 算法的仿真分析平台,借由经典的数字相关解调算法,对该仿真平台关键参数及信号特性分析结果进行讨论,充分显示了该仿

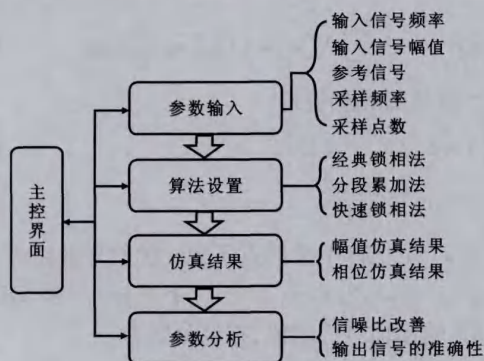


图1 系统设计框架

真平台的灵活性及实用价值。图2为DLIA算法仿真分析平台用户界面,该界面包含了设计框架中的各个模块,将参数输入后,利用菜单选择要使用的DLIA算法,对算法进行幅值及相位的仿真,选择要分析的参数,通过信噪比改善以及输出信号的准确性对参数进行分析,从而选择最佳的参数以及适合的特性。

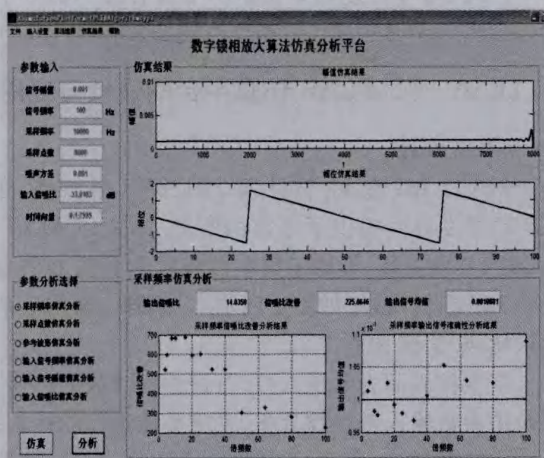


图2 数字锁相放大算法仿真分析平台界面

数字锁相放大算法的主要性能指标主要有测量精度和频率分辨能力,由文献[8]可知,二者均与总的测量时间成正比关系,总的测量时间为 $M\tau$,数字锁相放大算法性能理论上与采样频率成反比,与采样点数成正比。但实际仿真分析中会有所不同。

3.2.2 采样频率仿真分析

对于一个确定的系统,系统的采样频率必然为有限个值。根据奈奎斯特定理,采样频率必须大于2倍的待测信号的频率;尽量使采样频率与待测信号的频率的比值为一个整数,否则将会由于非整周期采样给数字锁相的结果带来误差,而且该误差会随着输入信噪比的降低而增大;因为噪声是宽带的,在采样频率以上的噪声通过A/D后会起混叠现象,使性能变坏,故合理地选择应该满足 $f_s > 10f$,在 f_s

$> 32f$ 时,对信噪比改善的效果下降。

例如,给定如下条件:信号频率为100Hz,信号幅值为0.001,输入信噪比为-33.0103dB,采样点数为8000,为保证整周期采样,故设 $f_s = N * f$ (N 为整数),观察不同的倍频数 N (N 取4,5,8,10,16,20,25,32,40,50,64,80,100)对锁相放大效果的影响如图3所示。从图中可以看出,采样频率不同,对锁相放大效果的影响很大,由信噪比改善效果看,当采样频率是信号频率的8,10,16,20,25倍时,信噪比改善、输出信号的准确性比较好,因此要设计一个高性能的锁相放大器,建议采样频率取 $10f \sim 32f$ 之间的整数倍频。

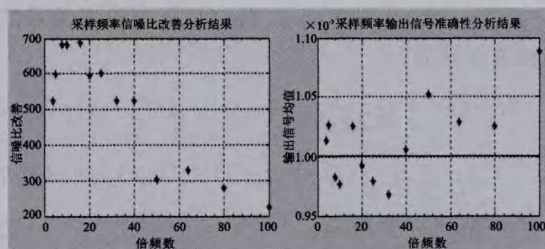


图3 不同采样频率对锁相放大效果的影响

3.2.3 采样点数仿真分析

采样点数 M 即对应着数据长度,要提高DLIA算法的测量精度和频率分辨能力,必须增加数据长度。理论上随着采样点数的增加,输出信号的信噪比改善应该越来越好,输出信号越精确,但是,当采样点数过多时,数值计算带来的舍入误差被逐渐累加,信号的不确定度反而会增加。对输入信号做如下设置:幅值为0.001,频率为100Hz,采样频率为1600Hz,输入信噪比为-33.0103dB,选择不同的采样点数,观察输入信号采样不同点数下锁相放大效果的变化情况如图4所示。由仿真分析结果可以看出,随着采样点数增加,信噪比改善越来越好,当超过采样点数超过8000后,信噪比改善增长缓慢,输出信号的准确性也开始有所下降。同时,高的精度是以牺牲速度为代价的,因此,实际中要兼顾速度与精度,适当选取采样点数。

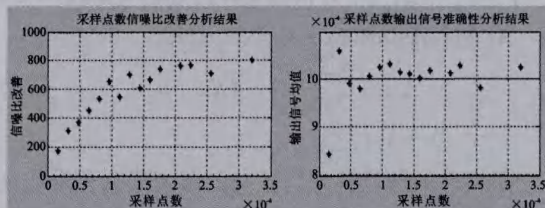


图4 不同采样点数对锁相放大效果的影响

3.2.4 算法适用输入信号仿真分析

输入信号的频率、幅值、信噪比范围,都需要多

次仿真才可以确定实现. 本文利用经典的数字相关解调算法,对 DLIA 算法适用的信号特性进行了仿真分析. 例如,设输入信号幅值为 0.001,采样点数为 8000,采样频率为信号频率的 16 倍,输入信噪比为 -33.0103dB ,信号频率取 10^{-n}Hz (n 取 -9 到 9 之间的所有整数),信噪比改善效果及输出信号的准确性相差无几. 因此,无论输入信号是高频信号还是低频信号,都可用该算法进行检测出来. 又如,设定信号频率为 100Hz ,采样频率为 1600Hz ,采样点数为 8000,改变信号幅值(从 10^{-8} 到 10). 该算法适合于微弱信号检测,可用于检测 nV 级的微弱信号.

设定信号幅值为 0.001,信号频率为 100Hz ,采样频率为 1600Hz ,采样点数为 8000,改变输入信噪比. 通过图 5 可以看出,随着输入信噪比的增加,输出信噪比先逐渐增加后趋于平稳,信噪比改善先增加后下降,该算法对输入信噪比高于 -40dB 的输入信号的锁相放大效果较好.

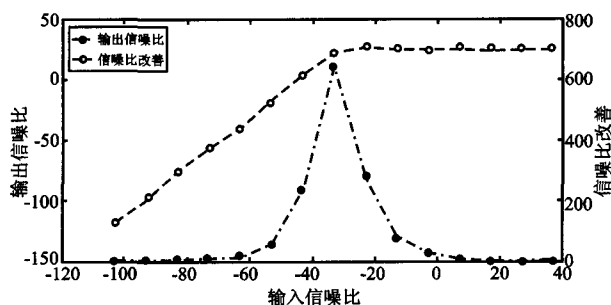


图5 不同输入信噪比的锁相放大效果分析

通过对不同参数的输入信号的锁相放大效果的分析,可分析出算法能检测的信号特性范围,进而选择合适的 DLIA 算法.

3.2.5 参考波形仿真分析

参考信号的波形应尽量与被测信号的波形一致,图 6 所示中,参考信号分别为正弦波形和方波波形,对输入波形为正弦波形的信号进行锁相放大,其中信号幅值为 0.001,输入信号频率取 100, 200, 300, ..., 1000, 输入信噪比为 -33.0103dB ,可看出参考信号为正弦信号的信噪比改善效果比参考信号为方波信号的要好.

4 结束语

DLIA 是微弱信号检测中最常用的方法,本文通过 MATLAB GUI 建立了 DLIA 算法的仿真分析平台,为 DLIA 研究中的算法选择及其参数设置提供了辅助分析工具,对研发高性能 DLIA 具有一定的理论和实际意义.

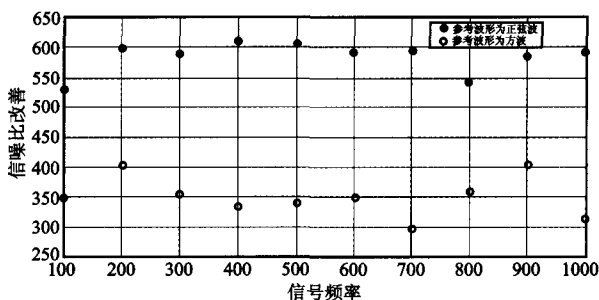


图6 不同参考信号对锁相放大效果的影响

参考文献:

- [1] 陈佳圭. 微弱信号检测的意义、内容及进展[J]. 物理, 1983(6): 329-337.
- [2] 吴成雄, 蔡华, 胡宁, 等. 基于集成芯片的细胞生理多参数自动分析仪[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2012, 46(9): 1715-1721.
- [3] Jia Yunfang Jia, Gao Chunying, Jia He, et al. Unlabeled multi tumor marker detection system based on bioinitiated lightaddressable potentiometric sensor[J]. Analyst, 2012(137): 3806-3813.
- [4] 陈子玉, 黄彦, 曹霞, 等. 双锁相法在脉冲强磁场弱信号测量中的应用[J]. 电子测量技术, 2012, 35(8): 27-30.
- [5] Momo F, Ranieri G A, Sotgiu A, et al. Microcomputer based phase sensitive detector [J]. J. Phys E: Sci Instrum, 1981(14): 1253-1256.
- [6] Saniie J, Luukkala M. Digital phase detection based on in-phase and quadrature sampling [J]. J. Phys E: Sci Instrum, 1983(16): 606-607.
- [7] Gerritsma G J, Weezep W J, Overweg J A, et al. An on-line digital phase sensitive detector in the 2Hz - 2KHz [J]. J Phys E: Sci Instrum, 1983(16): 270.
- [8] 戴逸松. 测量低信噪比电压的数字相敏解调算法及性能分析[J]. 计量学报, 1997, 18(2): 126-132.
- [9] 左营喜, 徐之才. 用分段累加法实现数字相敏检测[J]. 数据采集与处理, 1998, 13(3): 224-228.
- [10] 李刚, 周梅, 何峰, 等. 基于数字锁相相关计算结构的优化算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(3): 744-748.

作者简介:

李龙华 女, (1988-), 硕士研究生. 研究方向为信号与信息处理.

梁天翼 男, (1989-), 硕士研究生. 研究方向为电路与系统.

贾芸芳 女, (1974-), 博士, 教授. 研究方向为传感器与测控系统.