

基于非均匀采样的模拟退火随钻电磁波电阻率测井检波系统研究

姜 明¹, 柯式镇¹, 吕世瑶², 李成远¹, 张文豪¹

(1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油新疆油田有限公司, 新疆克拉玛依 834000)

摘要:在以往的随钻电磁波电阻率测井仪器检波系统中,仪器采样过程大多为均匀采样,检波方法多采用数字相关法或数字相敏检波(DPSD)法,其检波结果往往受采样量化误差以及频谱泄漏影响。针对这一问题,提出一种基于非均匀采样的模拟退火(SA)检波方法,并研制快速检波电路系统,选取基于均匀采样的 DPSD 检波结果进行对比。结果表明,基于非均匀采样的 SA 检波方法选频能力强,能更加有效地抑制量化误差相关性以及频谱泄漏带来的检波误差,更适用于恶劣多变环境下的随钻测井仪器检波。

关键词:非均匀采样; 模拟退火; 量化误差; 频谱泄漏; 随钻电磁波电阻率测井仪器; 测井检波

中图分类号:P 631.811 **文献标志码:**A

引用格式:姜明,柯式镇,吕世瑶,等.基于非均匀采样的模拟退火随钻电磁波电阻率测井检波系统研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(1):78-84.

JIANG Ming, KE Shizheng, LÜ Shiyao, et al. SA demodulation system based on nonuniform sampling for LWD electromagnetic resistivity logging tool[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017,41(1):78-84.

SA demodulation system based on nonuniform sampling for LWD electromagnetic resistivity logging tool

JIANG Ming¹, KE Shizhen¹, LÜ Shiyao², LI Chengyuan¹, ZHANG Wenhao¹

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. Xinjiang Oilfield Company Limited, CNPC, Karamay 834000, China)

Abstract: Conventional demodulation systems of LWD electromagnetic resistivity logging use widely uniform sampling, and the measurements are usually processed using digital correlation or the digital phase sensitivity detector(DPSD) method. Consequently, the detection results are affected by the quantization error and the spectrum leakage in the sampling process. In this paper, an simulated annealing(SA) demodulation method based on nonuniform sampling is presented and a rapid detection circuit is designed. The detection results of the proposed method are compared with that of the DPSD methods with uniform sampling, and demonstrate that the former method has a strong frequency-selecting capacity, and the correlation with the quantization errors and the measurement errors brought by the spectrum leakage can both be suppressed effectively. This method is more suitable for demodulation systems of the LWD measurements in extreme environment.

Keywords: nonuniform sampling; simulated annealing(SA); quantization errors; spectrum leakage; LWD electromagnetic resistivity logging tool; well logging demodulation

随着石油勘探开发程度的深入,复杂油气藏的勘探与开发越来越受到重视,随钻电磁波电阻率测井作为一种重要的测井方法,其仪器的性能指标应

不断地改进和提高。不同于侧向、感应类测井仪器,随钻电磁波电阻率测井仪器须检测接收线圈感应信号的幅度与相位信息,这对采样方法与检波方法均

收稿日期:2016-04-26

基金项目:国家油气重大专项(2011ZX05020-002)

作者简介:姜明(1988-),男,博士研究生,研究方向为电法测井方法与仪器。E-mail:13811699549@163.com。

通讯作者:柯式镇(1967-),男,教授,博士生导师,研究方向为岩石物理、电法测井方法及仪器。E-mail:wkszc@cup.edu.cn。

有较高要求。在以往的随钻电磁波电阻率测井仪器检波系统中,采样方法大多为均匀采样,检波方法主要有过零检测法^[6]、数字相关法^[7]、数字相敏检波(digital phase sensitivity detector, DPSD)法^[8-12]以及时间差法^[13]等。其中,为了保证检波精度,过零检测法对电路温漂以及相位抖动有一定要求,同时对模数转换器(analog to digital converter, A/DC)转换速率与分辨率有较高要求。数字相关法与 DPSD 法二者本质上具有相似性,可以认为 DPSD 法为数字相关法的一种特例,由于引入了数字乘法器,这两种算法均具有较强的选频抗噪能力,因而被更多地采用,但其检波精度受每周期采样点数影响。由于以往的仪器采样过程多为均匀采样,造成在多周期采样时 A/DC 的量化误差具有互相关性^[1]。同时,当每个信号周期的采样点数为非整数时,数字相关法与 DPSD 法均会产生频谱泄漏误差。以上两个因素是限制检波精度的重要因素之一。针对上述情况,笔者提出一种基于非均匀采样的模拟退火(simulated annealing, SA)检波方法,以减小量化误差相关性与频谱泄漏带来的误差。

1 检波电路

本文中提出的随钻电磁波电阻率测井仪器检波电路采用超外差接收机原理,如图 1 所示。接收机有 R1 和 R2 两个信号通道,分别用于检测接收线圈 R1 和 R2 感应电动势的幅度与相位。对于其中任意接收通道,感应信号首先经低噪声放大器(low noise amplifier, LNA)放大,再通过混频器进行降频,其中混频器的中频信号由直接数字频率合成器(direct digital synthesizer, DDS)产生。感应信号混频后经过低通滤波器 F_{11} 或 F_{21} 后,频率降为 1 kHz,但相位不变。双通道 A/DC 采用 ADS8363 (Texas Instrument Inc.),其分辨率为 16 位,最大采样频率为 1 MHz。在信号进入 ADS8363 前,由可编程增益放大器(programmable gain amplifier, PGA)进行程控放大,然后再经抗混叠滤波器 F_{12} 或 F_{22} 进入 ADS8363。由于带通滤波器相频特性变化陡峭,在井下高温高压强震动的苛刻环境下不易保持相位稳定,因而接收机中滤波器均采用相位变化平缓的低通滤波器。图中 FPGA (Cyclone II, Analog Device Inc.) 负责控制 DDS 产生相应的本振信号和 PGA 的增益范围,并为 A/DC 提供高精度采样时钟 unclk; 内部包含 FIFO (first in first out)、SA 检波以及 SPI (serial peripheral interface) 模块。完成模数转换后,信号进入

FPGA 内部 FIFO 缓冲,再由 SA 检波模块进行检波,检波结果通过 SPI 总线上传至 DSP (TMS320 F28335, Texas Instrument Inc.),并由 DSP 上传至上位机。

该检波系统不仅适用于本文中提出的检波方法,也适用于基于均匀采样的数字相关或 DPSD 检波方法。为验证基于非均匀采样的 SA 检波方法精度,选取基于均匀采样的 DPSD 检波结果进行了对比,检波电路平台均采用图 1 所示的检波电路系统。

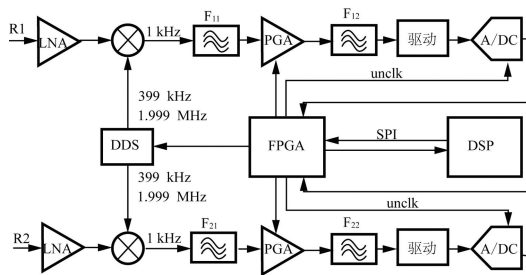


图 1 随钻电磁波电阻率测井检波电路系统

Fig.1 Sketch map of demodulation system of LWD propagation resistivity tool

2 非均匀采样

在采样过程中除外界环境噪声外, A/DC 量化误差是系统噪声的重要来源。当系统噪声互不相关时,随着采样长度增加,检波精度也会随之增加。由于均匀采样过程中 A/DC 采样频率为信号频率的整数倍,当进行多周期采样时不同信号周期的采样点相位值发生周期性重复,此时量化误差具有相关性。为了避免这种情况,本文中采用非均匀采样方法^[3],实现了采样点相位的非重复性采样。首先由 FPGA 产生并存储一系列 0 到 1 之间的随机数 rand, 如图 2 所示,并根据随机数对频率为 f 的采样时钟 clk 进行随机频率调制,产生以 f 为中心频率的随机调频方波信号 unclk。其中随机频率调制是将 clk 的低电平持续时间进行随机增减,而高电平持续时间不变,从而产生频率随机变化的 unclk。ADS8363 在 unclk 的下降沿进行采样,得到多周期的非均匀采样序列,由于不同信号周期的采样点相位具有随机性,因而有效避免了量化误差的相关性。采样完后再对非均匀采样序列进行数据重构,从而将多周期采样数据归并到同一周期中,效果如图 3 所示。该过程需要较大计算量,目前数据重构方法较多,较为常用的有多项式逼近重构算法等^[4]。对于不同重构方法,重构的精度与重构过程的计算量均成正比,直接通过 SA 对非均匀采样信号进行检波可以

免去重构环节,从而避免引入额外的误差。

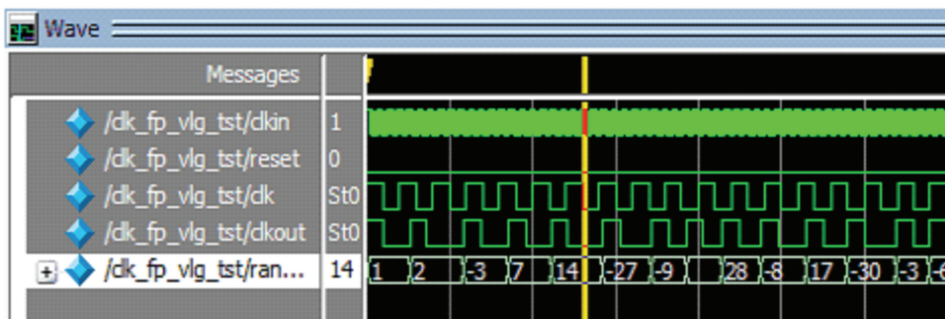


图2 非均匀采样时钟调制时序图

Fig. 2 Modulation sketch map of nonuniform sampling clock

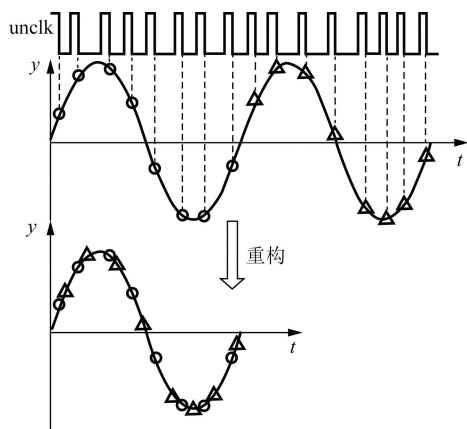


图3 非均匀采样与数据重构

Fig. 3 Sketch map of nonuniform sampling and data reconstruction

3 SA 检波

SA 方法属于智能优化方法范畴,智能优化方法是近年来发展起来的非常活跃的研究领域,适用于寻找复杂的非线性最优解,计算过程简单,易并行运算^[2]。SA 检波原理是对采样数据进行波形拟合,得到信号的幅度与相位。

随钻电磁波电阻率测井仪器接收线圈感应信号可表示为

$$f = A \cos(\omega t - \varphi) + B. \quad (1)$$

式中,待拟合参数 A 为幅度; ω 为角频率; φ 为初始相位; B 为直流偏置。基于 SA 的检波方法步骤如下:

(1) 算法初始化。给定初始解 $c[i]$ 、降温系数 a 、扰动系数 b 、开始温度 T 、终止温度 T_e 、内循环迭代次数 l 。由观测值(非均匀采样结果)估算给出初始解 $c[i]$, $i=0,1,2,3$ 。其中 $c[0]$ 为幅度,取观测值最大值与最小值之差的平均; $c[1]$ 为角频率 $\omega = 2\pi/n$, 其中 n 为每周周期采样点数; $c[2]$ 为初始相位,取

固定值 $\varphi = \pi/2$; $c[3]$ 为直流分量 B , 取观测值的累加平均值。以式(1)为目标函数,评价初始解与观测值之间的残差平方和 Q_{old} 。

(2) 产生邻域解。对旧解增加扰动,产生新解 $c[i] = c[i] + \text{scale}[i] \times \text{rand}(-0.5, 0.5)$, 并评价新解 Q_{new} , 其中 $\text{scale}[i]$ 初始值取 $c[i]$ 。

(3) 若 $Q_{new} < Q_{old}$, 则以一定概率接受步骤(2)中新解; 反之舍弃该解。

(4) 若达到当前温度下的热平衡(内循环次数大于 l) 则转下一步, 否则转步骤(2)。

(5) 降低当前温度 $T = T \times a$, 并缩小扰动 $\text{scale}[i] = \text{scale}[i] \times b$, $i=0,1,2,3$, 若当前温度小于终止温度, 即 $T < T_e$, 则算法终止, 输出当前解为最优解; 否则转步骤(2)。

SA 检波的最终结果不受初始解影响, 但合适的初始参数 a, b, l, T, T_e 对 SA 检波算法的执行效率以及能否充分搜索到最优解有较大影响。合适的 SA 初始参数选取需要大量试验, 本文中选用的初始化参数如下: $a=0.88, b=0.75, l=24, T=100, T_e=0.1$, 总迭代次数为 1296 次。

由于 SA 检波过程须进行迭代计算、浮点运算和三角函数运算, 运算量巨大。本文中采用 FPGA 实现 SA 检波方法, 对浮点数扩大 $2^{20}-1$ 倍, 将浮点数转换为定点数方法完成高精度浮点运算。在 FPGA 上实现三角函数运算, 坐标旋转数字计算机 (coordinate rotation digital computer, CORDIC) 方法^[5]被广泛采用, 其原理是将三角函数运算转换为加减移位运算, 进行多次迭代逼近。但由于 CORDIC 算法在逼近过程中须进行多次迭代, 占用较多计算资源, 且当角度为 0° 和 90° 时其计算误差偏大。本文中采用 10 阶泰勒展开的方法逼近三角函数, 并预先在 FPGA ROM 中固化了 $2! 4! 6! 8! 10!$ 的数值, 相比 CORDIC 方法简化了大量计算步骤, 且满足检波精

度要求。

采用并行运算结构可以大幅提高运算速度,但为节约 FPGA 逻辑资源,采用串行结构进行 SA 检波过程,整个 SA 检波部分占用逻辑资源为 5 970 LEs (logic elements,逻辑单元)。当采样长度为 1 600 个点时,系统完成一次 SA 检波的时间为 0.624 ms,对于带井眼补偿的具有深浅探测功能的随钻电磁波电阻率测井仪器,完成一个深度点探测的 SA 检波时间仅为 10 ms,完全满足随钻测井测速要求。

4 误差分析

4.1 信噪比对检波结果的影响

非均匀采样对量化误差有较强的抑制能力,而 DPSD 与 SA 检波本身也有较强的选频能力,可以有效抑制信号频率以外的噪声,因而检波系统具有较高的输出信噪比。由函数发生器产生形如式(1)的信号,叠加高斯白噪声后信噪比变化范围为 40 ~ 60 dB,变化步长为 5 dB,频率为 400 kHz 与 2 MHz,相位为 0.5。经过衰减网络后信号幅度为 10 mV,直流

偏置为 1 mV。检波电路系统中的 LNA 增益为 20 dB,控制 PGA 电路增益为 20 dB。将上述信号接入 R_1 、 R_2 端,信号到达 ADS8363 时频率为 1 kHz,幅度为 1 V。配置 ADS8363 输入动态范围为 0 ~ 1 V,设定采样频率为 50 kHz,因而每周期采样点数为 50,进行 4 个整周期采样。基于图 1 所示检波系统,本文对比了不同信噪比下,基于均匀采样的 DPSD 检波方法与基于非均匀采样的 SA 检波方法误差。由于通道 R_1 与通道 R_2 具有一致性,且 400 kHz 与 2 MHz 信号降频后频率均为 1 kHz,因而本文中取 2 MHz 信号输入通道 R_1 时的检波结果对检波系统进行评估。不同信噪比下检波误差如图 4 所示。可以看出,随着信噪比增大,两种采样检波方法的幅度与相位检测误差逐渐减小,其中基于非均匀采样的 SA 检波方法具有更优的抗噪能力,具有更好的检波精度。60 dB 时基于非均匀采样的 SA 检波方法幅度误差为 0.015 mV,相位误差为 0.002°。实际应用时对于信噪比较低的信号,可以对采样结果先进行数字滤波,再进行 SA 检波。

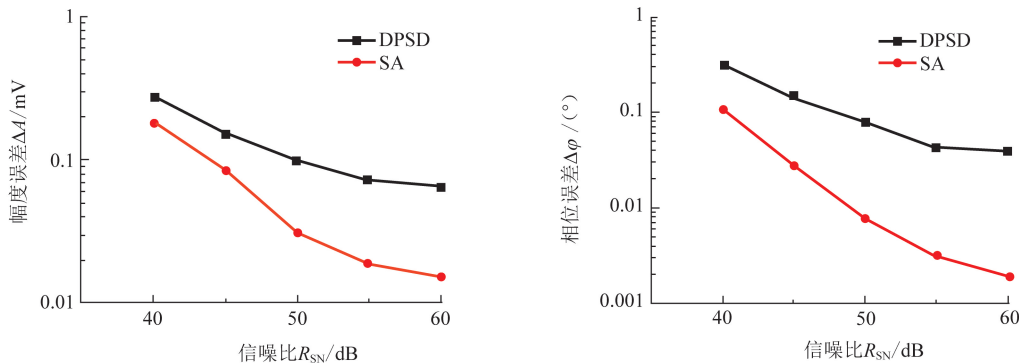


图 4 不同信噪比下基于均匀采样的 DPSD 与基于非均匀的采样 SA 检波方法误差对比

Fig. 4 Comparison of errors of DPSD based on uniform sampling and SA based on nonuniform sampling for different signal-noise ratio

4.2 采样长度对检波结果的影响

多周期采样时不同周期的均匀采样点之间的量化误差存在相关性,而非均匀采样点在各个信号周期中随机分布,因而不同采样点之间的量化误差不具有相关性。随着采样长度的增加,量化误差的相关性带来的检波误差不容忽视。当多周期采样时,DPSD 检波过程的累加环节,对随机噪声具有较强的抑制能力,且随着采样长度增加,对随机噪声的抑制能力越强。对于 SA 检波,新解的评价依据为检波值与观测值之间的残差平方和,因而采样长度越长,拟合所获得的残差信息越多,也更易搜索到全局最优解。

由信号产生器和衰减网络产生式(1)信号,频

率为 2 MHz,幅度为 10 mV,直流偏置为 1 mV,相位为 0.5,信噪比为 60 dB。配置 ADS8363 采样频率分别为 50、100、200、400 kHz,对应每周期采样点数为 50、100、200、400。分别进行采样长度为 1、2、4、8 个整周期采样,对不同采样长度下两种采样检波误差进行了对比,如图 5 所示。可以看出,当采样长度大于 4 周期时,基于均匀采样的 DPSD 检波方法与基于非均匀采样的 SA 检波方法误差趋于稳定,且采样长度越大,检波精度越高。其中基于非均匀采样的 SA 检波方法具有更佳的检波精度,当采样长度为 3 200 点时,幅度精度优于 0.001 5 mV,相位精度优于 0.001°。

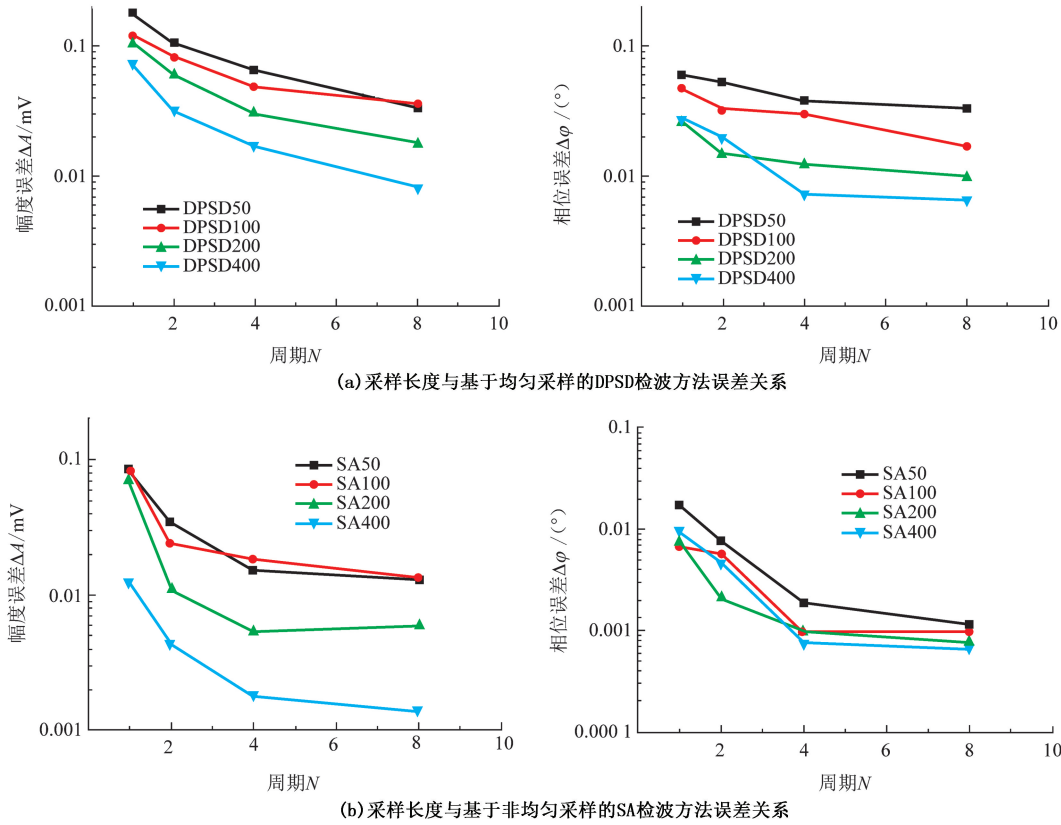


图 5 采样长度与两种采样检波误差的关系

Fig. 5 Correlations between periods of sampling and sampling errors by two methods

4.3 频谱泄露对检波结果的影响

在对连续周期性信号进行采样时,会不可避免地将连续信号进行截断,由此带来了频域上的频谱泄露现象。一般地,通过增加采样长度以及乘窗函数可以减小频谱泄露带来的误差,但无法从根本上消除。实际采样中外界环境的干扰(温度、电磁波等)对信号源以及采样时钟、A/DC 等电子器件的不利影响均会加剧这种误差。鉴于随钻测井的测量环境复杂恶劣,有必要对检波方法的频谱泄露抑制能力进行考察。

在室温下改变 ADS8363 采样时钟频率,模拟井下环境对采样时钟造成的漂移情况。首先,由函数发生器与衰减网络产生式(1)信号,频率为 2 MHz,幅度为 10 mV,直流偏置为 1 mV,相位为 0.5,信噪比为 60 dB。配置 ADS8363 转换速率为 50.25 kHz,因而每周期采样点数为 50.25,此时截取 200 个采样点作为 4 个整周期采样数据,由此模拟频谱泄露带来的检波误差。

考察了每周期采样点数分别为 50.25、100.25、200.25、400.25、800.25 时的频谱泄露造成的检波误差,其中采样长度均为 4 周期。DPSD 检波误差如图 6 所示,横坐标为单周期采样点数,代表采样频

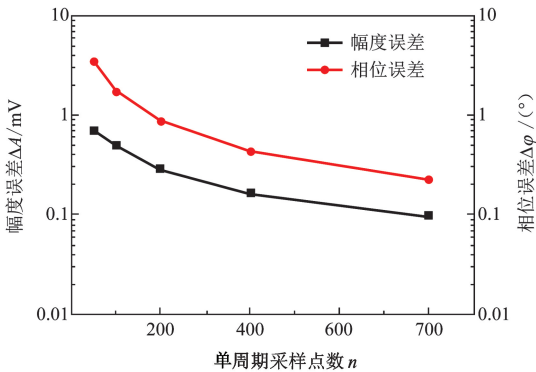


图 6 频谱泄露与基于均匀采样的 DPSD 检波方法误差

Fig. 6 Correlations between spectrum leakage and errors of SA based on nonuniform sampling

率漂移量由大到小的变化。从图中可以看出,随着采样频率漂移量减小,幅度误差与相位误差明显变小。当单周期采样点为 800.25 时,ADS8363 采样频率为 800.25 kHz,相比无频谱泄露时,采样频率偏移量为 312.5×10^{-6} ,此时 DPSD 幅度检波误差为 0.096 mV,相位检波误差为 0.22°。对比无频谱泄露时检波结果,如图 5(a)中,采样长度为 3 200 点时,幅度误差和相位误差分别为 0.008 mV 和 0.007°,均远小于以上检波误差,因而频谱泄露对 DPSD 检波结果影响较大。

SA 检波是一个全局寻优的过程,初始解的选取不会影响最终迭代结果。当每周周期采样点数 n 发生变化时,仅对角频率初始解 $c[1]$ 产生影响,即 $\omega = 2\pi/n$,频谱泄漏对 SA 检波结果影响十分有限。发生频谱泄漏时 SA 检波误差如图 7 所示。对比图 6 中数据可以看出,在采样频率漂移量相同情况下,频谱泄漏对 SA 造成的误差较 DPSD 小 2 个数量级以上。当每周周期采样点数大于 400 点时,即采样长度大于 1 600 点时,幅度相位检波误差趋于稳定。当采样长度为 200 点时,幅度相位检波误差分别为 0.017 mV 和 0.0026° ;当采样长度为 3 200 点时,幅度相位检波误差分别为 0.001 5 mV 和 0.001° 。对比图 5(b) 无频谱泄漏影响时检波误差,可以看出,随着采样长度增加,二者差距逐渐变小,当采样长度较大时,二者无明显差异。说明 SA 检波对恶劣环境造成的频谱泄漏具有较强的抑制能力,因而非常适合在随钻测量场合应用。

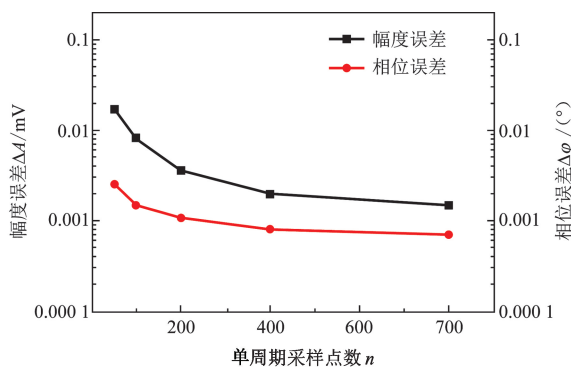


图7 频谱泄漏与基于非均匀采样的 SA 检波方法误差

Fig.7 Correlations between spectrum leakage and errors of SA based on nonuniform sampling

5 结论

(1) 非均匀采样可以有效抑制量化误差的相关性,通过多周期采样可以有效提高检波精度。结合 SA 检波方法,无须对非均匀采样数据进行重构,从而实现快速检波。实际应用时基于非均匀采样的检波系统采用 12 位到 16 位分辨率的 A/DC 即可满足检波要求。

(2) SA 检波方法具有较强的选频能力,其检波精度取决于信号的信噪比与采样长度。当采样长度为 3 200 点时,幅度精度优于 0.001 5 mV,相位精度优于 0.001° 。同时,该方法对频谱泄漏以及随机噪声有较强的抑制能力,适合随钻电磁波电阻率测井仪器恶劣多变的测量环境。由于 SA 检波方法计算量较大,实际应用时应采用高性能处理器,同时兼顾

高温性能,可选用 Altera 或 Actel 公司的相关 FPGA。可以根据不同仪器设计指标合理选用采样长度,降低检波时间开销,在采样长度小于 200 点时,可以采用高温浮点型 DSP 作为处理器。

参考文献:

- [1] DJAJAPUTRA D. Electrical impedance tomography: methods, history and applications[J]. Medical Physics, 2005,32(8):2731-2731.
- [2] RAM D J, SREENIVAS T H, SUBRAMANIAM K G. Parallel simulated annealing algorithms [J]. Journal of Parallel & Distributed Computing, 1996, 37(2): 207-212.
- [3] COOK R D, SAULNIER G J, GISSER D G, et al. ACT3: a high-speed, high-precision electrical impedance tomograph [J]. IEEE Trans Biomed Eng, 1994,41(8):713-722.
- [4] LAAKSO T I, TARCZYNSKI A, MURPHY N P, et al. Polynomial filtering approach to reconstruction and noise reduction of nonuniformly sampled signals [J]. Signal Processing, 2000,80(4):567-575.
- [5] DAI Yijun, BI Zhuo. CORDIC algorithm based on FPGA [J]. Journal of Shanghai University, 2011,15(4):304-309.
- [6] 李会银,苏义脑,盛利民,等. 多深度随钻电磁波电阻率测量系统设计[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2010,34(3):38-42.
LI Huiyin, SU Yinao, SHENG Limin, et al. Implementation of quadrature signal source based on CORDIC algorithm[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010,34(3):38-42.
- [7] 何明,李英波,刘金柱. 一种多频电磁波电阻率测量系统:204082133[P]. 2015-01-07.
- [8] 刘升虎,邢亚敏. 随钻电磁波电阻率测井采集系统研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2007,29(5):25-29.
LIU Shenghu, XING Yamin. A data acquisition system for electromagnetic propagation resistivity logging [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2007,29(5):25-29.
- [9] 刘升虎,邢亚敏. DPSD 技术在随钻电阻率测井中的应用[J]. 测井技术,2008,32(1):69-71.
LIU Shenghu, XING Yamin. Application of digital phase sensitive demodulation for electromagnetic propagation resistivity logging while drilling[J]. Well Logging Technology, 2008,32(1):69-71.
- [10] 徐闽斌,李建新,杨天池. 微弱信号的相位检测技术研究[J]. 信息工程大学学报,2010,11(1):40-44.
XU Minbin, LI Jianxin, YANG Tianchi. Research on

- the weak signal phase detection method[J]. Journal of Information Engineering University, 2010,11(1):40-44.
- [11] 尤嘉祺. 随钻电磁波电阻率信号采集技术研究[D]. 青岛:中国石油大学,2013.
- YOU Jiaqi. Signal acquisition technology study of electromagnetic wave propagation resistivity tool of LWD [D]. Qingdao: China University of Petroleum,2013.
- [12] 贾衡天,彭浩,邓乐,等. 随钻电磁波电阻率测量系统[J]. 电子测量技术,2014,37(6):123-126.
- JIA Hengtian, PENG Hao, DENG Le, et al. Electromagnetic resistivity MWD system[J]. Electronic Measurement Technology, 2014,37(6):123-126.
- [13] 袁阿明. 随钻电磁波传播测井井下电路研究[D]. 西安:西安石油大学,2009.
- YUAN Aming. Circuit design of electromagnetic wave propagation logging[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2009.
- [14] 徐闽斌. 基于电磁波传播理论的围岩电阻率测量方法研究与仪器实现[D]. 郑州:解放军信息工程大学,2009.
- XU Minbin. Research of formation resistivity measurement and implementation of corresponding equipment based on electromagnetic wave propagation theory[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2009.

(编辑 修荣荣)