

文章编号: 2095-4980(2020)05-0857-06

一种用于电磁脉冲测量的数字积分器设计

郭晓东, 朱宇洁, 王建忠

(中国工程物理研究院 计量测试中心, 四川 绵阳 621999)

摘要: 在激光打靶实验过程中会产生电磁脉冲(EMP)信号, 测量这些电磁脉冲信号所使用的电场探头输出信号多数为微分信号, 需要进行积分后才能得到测量结果。模拟积分器由于带宽限制, 不能满足测量要求, 需通过数字积分器完成积分。本文基于小波变换与傅里叶变换对数字积分器进行设计, 采用小波软阈值法与低频去零漂法对微分信号中高频随机噪声及零漂误差进行处理。经过研究分析, 可对上升时间小于 100 ns 的电磁脉冲信号进行积分, 并取得较好的效果。

关键词: 电磁脉冲; 数字积分; 小波; 软阈值; 零漂

中图分类号: TN12

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019161

A digital integrator design for Electro Magnetic Pulse measurement

GUO Xiaodong, ZHU Yujie, WANG Jianzhong

(Metrology and Measurement Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Electro Magnetic Pulse(EMP) signals are generated in laser shooting experiment. The output signals of electric field probe utilized to measure these EMP signals are differential signals, which need to be integrated before the measurement results can be obtained. Because of the bandwidth limitation, analog integrator cannot meet the measurement requirements, the integration can be completed only through digital integrator. In this paper, the digital integrator is designed based on the wavelet transform and Fourier transform. The wavelet soft threshold method and the low frequency zero drift removal method are adopted to deal with the high frequency random noise and zero drift error of differential signals. After research and analysis, it can integrate the EMP signals whose rise time is less than 100 ns, and has achieved good results.

Keywords: Electro Magnetic Pulse; digital integration; wavelet; soft threshold; zero drift

激光打靶实验过程中会产生电磁脉冲(EMP)信号, 这些电磁脉冲信号上升时间最快可达 ps 量级^[1-3]。对于电磁脉冲信号的测量, 目前国内多采用电场探头。激光打靶实验使用的电场探头为 MONTENA 公司生产的 SEG3-5 型, 其在 3.5 GHz 内输出信号为微分形式, 需要积分器对探头的输出信号进行积分。目前常采用的积分器是由电阻、电容组成的无源积分器^[4]以及加入运算放大器组成的模拟有源积分器^[5-7]。

激光打靶过程中产生的电磁脉冲信号最快为 ps 量级, 对应积分器带宽为吉赫兹甚至几十吉赫兹。由于组成模拟积分器使用的电容以及运算放大器的频响最高仅为几百兆赫兹, 模拟积分器的使用受到带宽的限制。且在实际应用中, 运算放大器的输入失调电压、输入失调电流以及输入偏置电流等将作为等效输入偏移量被积分, 并且漂移量随着积分时间的增加而增大, 这部分误差将会影响数据的准确度。因此使用模拟积分器无法对激光打靶产生的电磁脉冲信号进行准确还原。

数字积分器利用一定算法将微分信号进行积分还原。首先利用数据采集系统采集电场探头的输出电压信号, 采集到的信号为电磁脉冲信号的微分形式; 然后利用积分方式最终将信号还原^[8-9]。数字积分器的优点在于没有带宽限制, 其性能完全依赖于数据采集系统的性能; 且数字积分器不会出现模拟积分器中运放、电容引入的误差, 可用于电场探头微分信号的还原。

利用数据采集系统对微分信号进行采集时, 会引入较多噪声, 且数据采集系统自身存在零漂, 对微分信号进行积分过程中, 会把这些噪声和零漂引入的误差都进行积分, 导致最终积分结果与原始信号偏差太大。因此在积

收稿日期: 2019-05-15; 修回日期: 2019-06-20

作者简介: 郭晓东(1987-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为微波与无线技术。email:715408178@qq.com

分前，首先要将微分信号中的噪声以及零漂误差减小甚至消除，然后再进行积分，才能得到准确的积分结果。

1 数字积分器设计思路

图 1(a)为利用电场探头对电磁脉冲信号测量时的输出电压曲线。从测量结果可以看出，信号中包含了很多高频噪声。图 1(b)为电场探头输出电压曲线的积分结果。从积分结果可以看出，由于数据采集系统的零漂导致整个积分曲线向上倾斜，对积分结果造成了严重的影响。

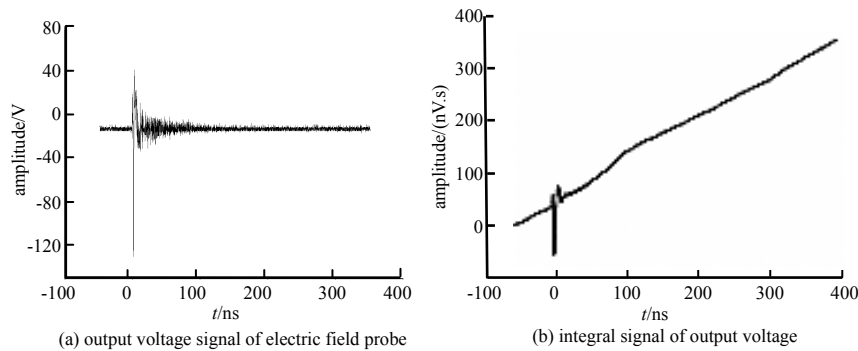


Fig.1 Output signal and integral result of unprocessed electric field probe

图 1 未处理的电场探头输出信号及积分结果

传统的信号滤波去噪方法有限幅滤波、加权平滑滤波、复合滤波以及经典数字滤波等，这些方法通常是去除噪声所在的频率段，适用于含低频信号和高频噪声的信噪分离。但在信号谱和噪声谱相互混叠的情况下，这些方法都有局限性^[10]。与传统的去噪方法相比，小波去噪具有低熵性、多分辨力、去相关性和选基灵活性等特性^[11]，可以很好地对信号进行去噪。本文把小波去噪法用于电磁脉冲测量领域，将电磁脉冲微分信号进行去噪处理，减小噪声对积分结果的影响。

使用信号采集系统对微分信号进行采集时，存在零漂问题。王勇^[12-14]等研制的差分积分器可以很好地解决零漂问题，但由于差分积分器的带宽不高，不能用于电磁脉冲微分信号的积分。袁中权^[8]和李进玺^[15]研制的数字式积分器在处理零漂问题时采用了斜率扣除法。这种方法默认了零漂在整个积分过程中是固定不变的，且需要在实验前采取一次积分，将积分曲线做线性拟合，然后在实验中将拟合后的斜率扣除。但零漂在整个积分时间内不一定是一个定值，且实验前与实验中的零漂也不一定一致，这种方法不能很好地解决零漂问题。本文经过对电磁脉冲微分信号中零漂特性分析，通过傅里叶变换的方法，最终消除了零漂引入的误差，使积分结果更加准确。数字积分器总体设计思路如图 2 所示。

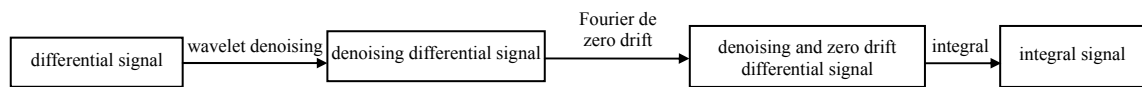


Fig.2 General idea of digital integrator

图 2 数字积分器总体思路

2 小波软阈值去噪

小波变换广泛用于信号处理领域。式(1)为离散的小波变换表达式。式(2)为利用基于小波系数对波形的重构。其中 $W_{m,n}(t)$ 是小波变换系数； $f(t)$ 是原函数； $\Psi_{m,n}(t)$ 是小波函数， m, n 分别表示伸缩参数和平移参数，且为整数。

$$W_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi_{m,n}(t) dt = 2^{-m/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi_{m,n}(2^{-m}t - n) dt \tag{1}$$

$$f(t) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \langle f, \Psi_{m,n} \rangle \Psi_{m,n}(t) \tag{2}$$

由式(1)可以看出，在不同的伸缩参数下，可以得到不同的小波系数： m 较小时，对应的小波基较宽，此时时域分辨力较低，对应的是原始信号的低频部分；相反， m 较大时，对应的小波基较窄，此时时域分辨力较高，对应的是原始信号的高频部分。这就是小波变换的多分辨力的意义，可以在不同分辨力下分析原始信号。由图 1 所示的电磁脉冲微分信号可以看出，噪声遍布整个时域，且均为高频的随机噪声。这样就可以利用小波变换将原

始信号分解为多个分辨力下的小波域，对小波域下的高频部分进行处理，以达到去噪的目的。

图 3 为小波软阈值法去噪流程。首先将含噪信号进行小波变换，选择小波基与分解层数，本文选择 *coif5* 小波基。这一步将含噪信号分解为多个分辨力下的小波系数组合。

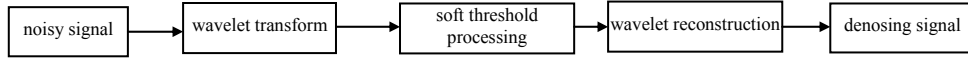


Fig.3 Procedure of wavelet soft threshold denoising

图 3 小波软阈值法去噪流程

然后对分解后的小波系数进行软阈值处理。采用 Birge-Massart 提出的非参数自适应密度估计理论^[9]。在非参数情况下，数据可以自适应地寻找合适的模型，从而更好地描述数据，估计的结果会更加准确，从而达到更好的去噪效果。

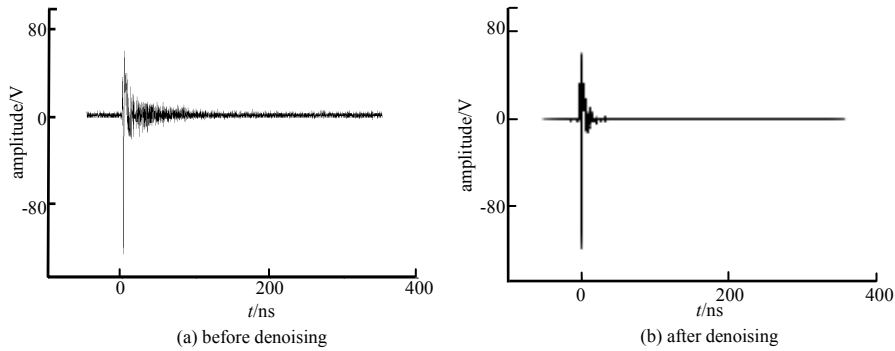


Fig.4 Denoising effect of EMP differential signal

图 4 电磁脉冲微分信号除噪效果

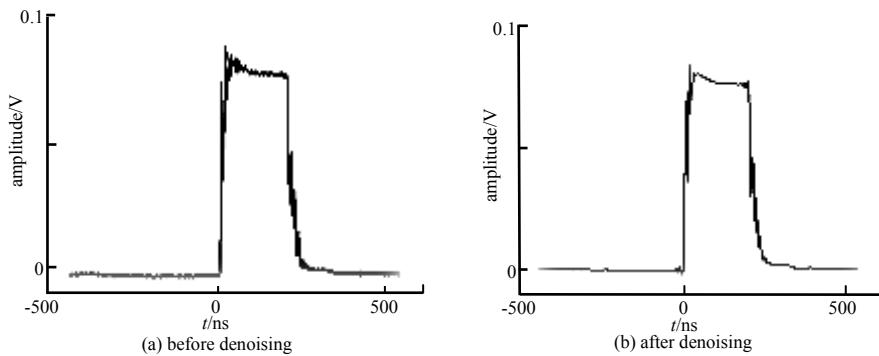


Fig.5 Denoising effect of square wave signal

图 5 方波信号除噪效果

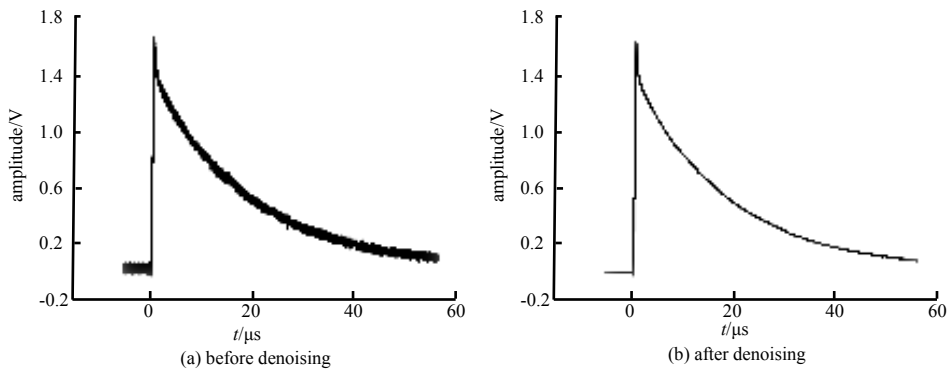


Fig.6 Denoising effect of double exponential signals

图 6 双指数信号除噪效果

Birge-Massart 软阈值处理表达式如下：

$$w_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k}, & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (3)$$

式中： $w_{j,k}$ 为 j 尺度上各点的小波系数； λ 为阈值。当 $w_{j,k}$ 的绝对值大于阈值时，说明小波系数足够大，非噪声的概率较高，对其不做处理；反之，当 $w_{j,k}$ 的绝对值小于阈值时，说明其为噪声的概率较高，做置零处理。

最后将处理后的小波系数进行重构。重构后的电磁脉冲微分信号结果与处理前信号对比如图 4 所示。图 5 为方波信号除噪效果，图 6 为双指数信号除噪效果。可以看出，小波软阈值除噪法可以很好地对几种常见波形进行去噪。

3 傅里叶变换去除零漂

进行除噪后的信号仍存在零漂误差，因为零漂是数据采集系统及环境共同导致的，并非单纯的高频随机噪声。通过小波软阈值去噪后，基本将高频噪声滤除。袁中权^[7]等研制的数字积分器采用了斜率扣除法，即所有实验数据整体减去一个斜率值。这种处理零漂的方法可以改善零漂带来的影响，但效果不是非常理想。

本文首先对测量引入零漂进行分析。截取图 1 原始微分信号中的一段杂波信号，如截取 200~300 ns 时间段之间的采集信号，采用周期方法进行拓展，将此信号段拓展为与原始信号长度一样，如图 7(a)所示。将此杂波信号进行小波变换去除高频噪声，得到的信号主要成分为零漂误差。对此误差信号进行傅里叶变换，如图 7(b)所示，可以看出，其主要成分为低频信号。如图 8 所示，signal 曲线为原始微分信号去除高频噪声后的低频成分，noise 曲线为零漂误差的低频成分，将 2 条曲线进行对比可以看出，2 条曲线非常吻合，说明零漂误差主要是原始微分信号中的低频部分。因此，利用低频去零漂法，滤除原始微分信号中低频成分，即可完成零漂误差的滤除。

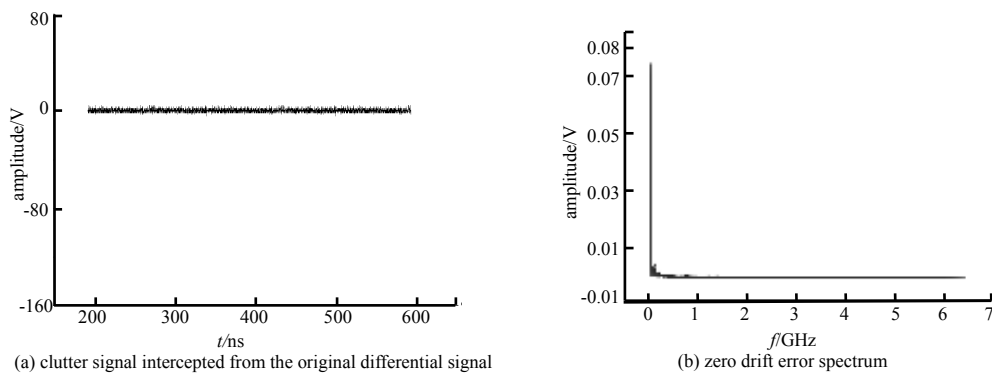


Fig.7 Clutter signal and its frequency spectrum with zero drift error

图 7 杂波信号及其零漂误差频谱图

图 9 为去除零漂前后微分信号对比，图 10 为去除零漂前后积分结果对比。由图 9 可以看出，利用低频去零漂法对电磁脉冲微分信号的时域几乎没有影响，但由图 10 所示的积分结果可以看出，经过低频去零漂后，积分后的基线在零点附近小幅波动，较去零漂前，有了非常明显的改善，很好地去除了零漂。

为研究上升时间与积分效果的关系，现将原始有效信号在时域分别扩展 5 倍、10 倍、50 倍、100 倍。由于原始信号上升时间约为 1 ns，则相应的上升时间扩展为 5 ns, 10 ns, 50 ns 与 100 ns。其低频成分与数字积分效果见图 11~图 12。上升时间为 1 ns, 5 ns 及 10 ns 时，频谱在 3 MHz 内与噪声信号频谱吻合非常好；当上升时间为 50 ns 时，其频谱在 450 kHz 内与噪声信号频谱吻合较好；当上升时间为 100 ns 时，仅在极低频内与噪声信号频谱吻合。出现这种结果的原因之一为：当上升时间变慢时，相对应的频谱低频成分幅度增大，将零漂信号淹没。所以在对应不同上升时间的电磁脉冲信号时，对应的滤除低频的部分也不同。上升时间越慢，低频滤除部分则越少，则噪声引入误差越大。

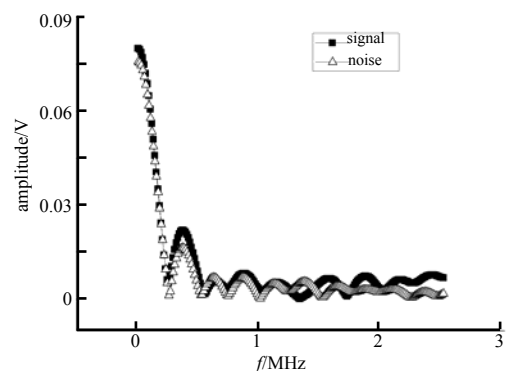


Fig.8 Comparison of the low frequency between the original differential signal and the zero drift error

图 8 原始微分信号与零漂误差低频曲线对比

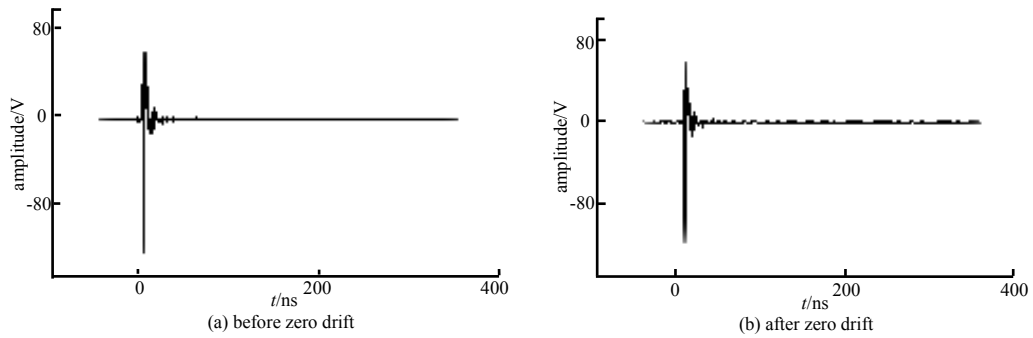


Fig.9 Differential signal comparison before and after zero drift removal

图 9 去零漂前后微分信号对比

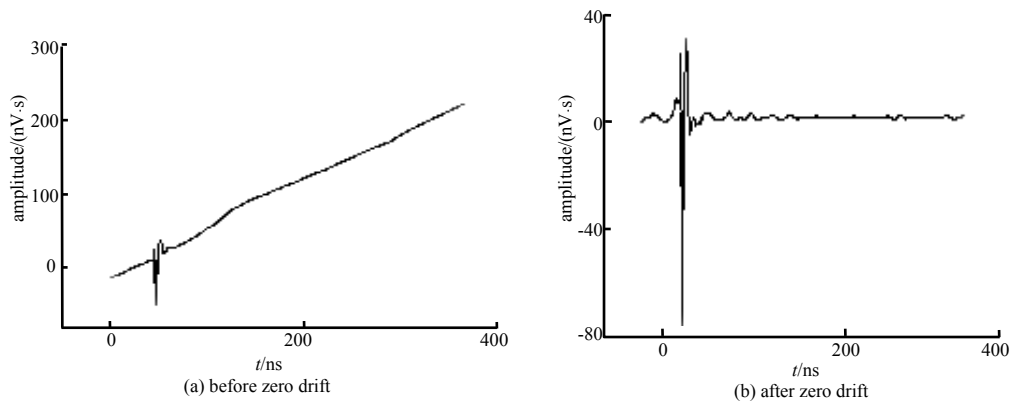


Fig.10 Comparison of integral curves before and after zero drift removal

图 10 去零漂前后积分曲线对比

图 12 为上升时间为 1 ns, 5 ns, 10 ns, 50 ns, 100 ns 的电磁脉冲信号, 分别滤除 8 MHz, 2 MHz, 1.5 MHz, 0.2 MHz 和 0.1 MHz 低频信号的积分结果。可以看出, 积分效果均较好。但当上升时间为 50 ns 和 100 ns 时, 由于低频信号滤除较少, 波形后面基线明显大于 0。所以在上升时间为 50 ns 和 100 ns 时, 零漂信号引入误差较大, 但仍能对原始信号进行很好地积分。

4 结论

本文通过小波软阈值去噪法以及低频去零漂法对数字积分器进行设计, 很好地去除了电磁脉冲微分信号测量过程中引入的高频随机噪声以及零漂误差, 能够对上升时间小于 100 ns 的电磁脉冲微分信号进行很好的积分。

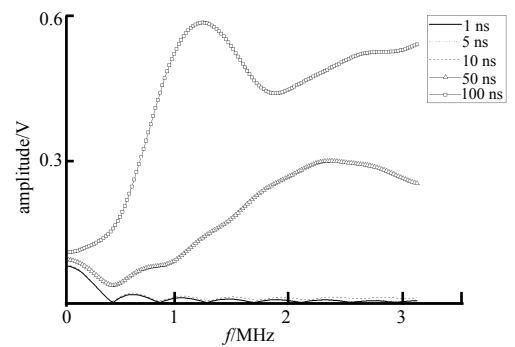
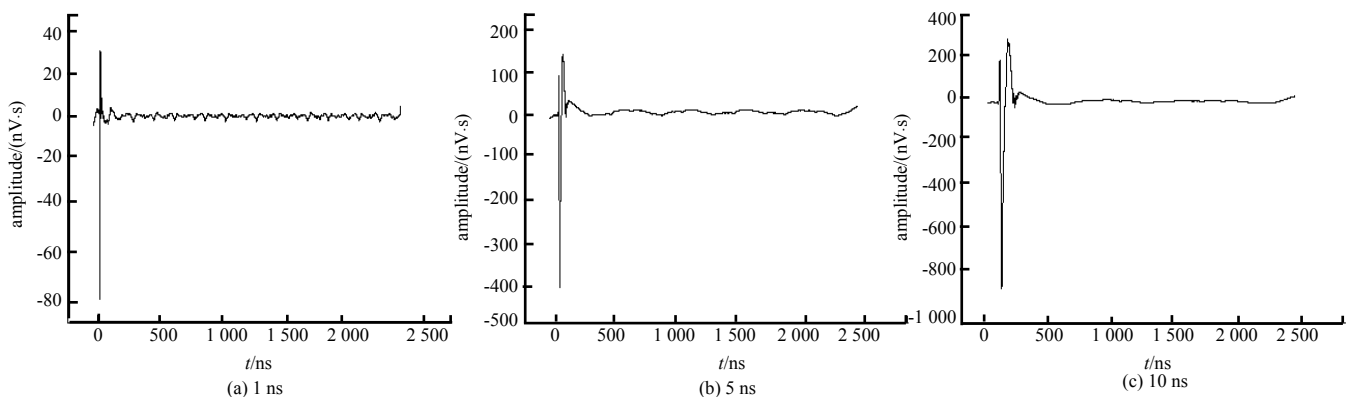


Fig.11 Comparison of low frequency curves with different rising time

图 11 不同上升时间低频曲线对比



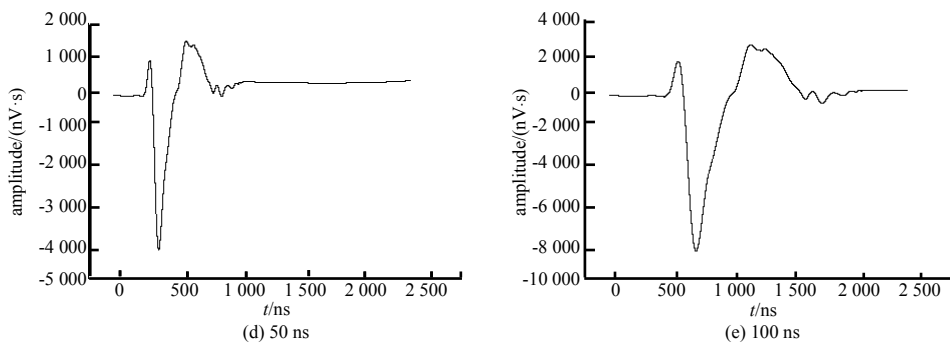


Fig.12 Integral results of different rising time
图 12 不同上升时间积分结果

参考文献:

- [1] 易涛,景峰,王新彬,等. 神光Ⅲ装置电磁脉冲测量[J]. 安全与电磁兼容, 2017(6):83-85. (YI Tao,JING Feng,WANG Xinbin, et al. Electromagnetic pulse measurement at Shen Guang Ⅲ laser facility[J]. Safety & EMC, 2017(6):83-85.)
- [2] 杨进文,杨鸣,李廷帅,等. 基于神光Ⅲ主机装置激光打靶产生电磁脉冲特性研究[J]. 电气技术, 2016(11):21-24. (YANG Jinwen,YANG Ming,LI Tingshuai,et al. Investigation of electromagnetic pulses generated by the laser shooting based on SG-Ⅲ facility[J]. Electrical Technology, 2016(11):21-24.)
- [3] 杨进文,易涛,李廷帅,等. 激光打靶过程中的电磁脉冲特性[J]. 强激光与粒子束, 2015,27(10):116-121. (YANG Jinwen, YI Tao,LI Tingshuai,et al. Electromagnetic pulse characteristic in process of laser shooting[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015,27(10):116-121.)
- [4] 卫兵,傅贞,王玉娟,等. 无源 RC 积分器频率响应特性分析[J]. 高电压技术, 2008,34(1):53-56. (WEI Bing,FU Zhen, WANG Yujuan,et al. Frequency response analysis of passive RC integrator[J]. High Voltage Engineering, 2008,34(1):53-56.)
- [5] 张学亮. 模拟电子技术基础[M]. 北京:人民邮电出版社, 2016. (ZHANG Xueliang. Fundamentals of analog electronics technology[M]. Beijing:Posts and Telecommunications Press, 2016.)
- [6] 彭程程,谷鸣,刘波,等. 模拟有源积分器在脉冲磁场测量中的分析和应用[J]. 核技术, 2007,30(9):725-729. (PENG Chengcheng,GU Ming,LIU Bo,et al. The analysis and application of analog integrator in pulsed magnetic field measurement[J]. Nuclear Techniques, 2007,30(9):725-729.)
- [7] 张明明,张艳,李红斌,等. Rogowski 电流互感器的积分器技术[J]. 高电压技术, 2004(9):13-16. (ZHANG Mingming, ZHANG Yan,LI Hongbin,et al. Technology of designing integrator of rogowski current transducer[J]. High Voltage Engineering, 2004(9):13-16.)
- [8] 袁中权,肖炳甲,季振山,等. 基于 PXI 的数字式长时间积分器[J]. 微计算机信息, 2012(9):116-118. (YUAN Zhongquan, XIAO Bingjia,JI Zhenshan,et al. A digital long-time integrator based on PXI[J]. Microcomputer Information, 2012(9):116-118.)
- [9] 庞晶,丁群,孙晓军. 数字积分器的设计[J]. 现代电子技术, 2006,29(12):27-29. (PANG Jing,DING Qun,SUN Xiaojun. Design of digital integrator[J]. Modern Electronic Technology, 2006,29(12):27-29.)
- [10] LUCIEN Birgé,MASSART P. From model selection to adaptive estimation[M]. Festschrift for Lucien Le Cam:Research Papers in Probability and Statistics. New York:Springer, 1997.
- [11] 郭常盈,张芳,禹延光. 小波阈值法在光干涉信号除噪中的应用[J]. 光通信研究, 2009(2):42-44. (GUO Changying, ZHANG Fang,YU Yanguang. Applications of wavelet threshold method in denoising optical interferometer signals[J]. Study on Optical Communications, 2009(2):42-44.)
- [12] 王勇,季振山,刘广君,等. EAST 上低漂移差分积分器的研制[J]. 原子能科学技术, 2014(5):920-924. (WANG Yong,JI Zhenshan,LIU Guangjun,et al. Development of low drift integrator for EAST[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014(5):920-924.)
- [13] 吴一纯,王勇,刘冬梅,等. EAST 积分器系统的设计[J]. 原子能科学技术, 2009,43(12):1133-1137. (WU Yichun, WANG Yong,LIU Dongmei,et al. Design of integrator on experiment advance superconductor tokamak[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009,43(12):1133-1137.)
- [14] 王勇,季振山,罗家融. EAST 装置交替式积分器设计[J]. 核聚变与等离子体物理, 2009,29(3):275-278. (WANG Yong, JI Zhenshan,LUO Jiarong. Design of alternant integrator on EAST tokamak[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2009, 29(3):275-278.)
- [15] 李进玺,郭景海,赵墨,等. 电磁脉冲微分测量信号的数值积分[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(5):738-741. (LI Jinxi,GUO Jinghai,ZHAO Mo,et al. Processing of electromagnetic pulse signal based on numerical integration[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(5):738-741.)