

# FFT方法在ADC有效位测试中的应用探讨

李海涛,阮林波,田耕,田晓霞,渠红光

(西北核技术研究所 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024)

**摘要:**介绍了ADC的性能参数和有效位(ENOB)的计算公式,在分析了ADC的性能参数测试方法后,给出ADC的ENOB测试解决方案。对FFT方法在ADC的ENOB测试中的应用做了深入探讨,对频谱泄露现象给出了包括相干采样和加窗函数等在内的解决方案。采用一种改进的FFT方法对TI公司的ADS5400进行ENOB测试,得到ADS5400在400 MSps采样率情况下的有效位 $ENOB=9.12$  Bits( $f_{in}=1.123$  MHz)。

**关键词:** ADC性能参数; FFT; 频谱泄露; 相干采样; 窗函数; 有效位

中图分类号: TM930.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2013)10-0014-04

## Application and Discussion of the FFT Methods in the ADC ENOB Test

LI Hai-tao, RUAN Lin-bo, TIAN Geng, TIAN Xiao-xia, QU Hong-guang

(State Key Lab of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** After introducing the performance parameters of ADC, especially the ENOB, and discussing several test methods of ADC performance parameter, this paper puts forward a test solution for ENOB. The paper also analyzes the application of the FFT method in the ENOB test, including spectral leakage, coherent sampling and windowing functions, etc. An improved FFT methods is adopted in the ADC ENOB test, while the ENOB of ADS5400 working at 400 MSps sampling rate is 9.12 Bits( $f_{in}=1.123$  MHz).

**Key words:** ADC performance parameter, FFT, spectral leakage, coherent sampling, windowing functions, ENOB

### 0 引言

随着微电子技术和半导体制造工艺的飞速发展, ADC采样率和分辨率不断提高,目前ADC的最高采样率达到5GSps(e2v EV10AQ190)、分辨率达到12Bits(TI ADC12D1800)。作为连接模拟世界和数字世界的桥梁,ADC的性能直接影响整个系统的性能高低,因此,如何对ADC进行性能测试,是目前ADC研究的热门领域之一。

表征ADC性能的参数通常分为静态性能参数和动态性能参数。静态性能参数描述ADC的内在特性,主要关注稳定的模拟输入与相应数字输出代码之间的关系,与ADC内部电路的误差、噪声和谐波有关,包括ADC的增益误差、失调误差、积分非线性(INL)和微分非线性(DNL)等。动态性能参数描述的是ADC采样和重现时序变化信号的能力,关注ADC在交流条件情况下的性能表现,用于定量表示ADC动态性能的常用参数有六个,分别是:  $SINAD$ (信纳比)、 $ENOB$ (有效位

数)、 $SNR$ (信噪比)、 $THD$ (总谐波失真)、 $THD+N$ (总谐波失真加噪声)和 $SFDR$ (无杂散动态范围),这些动态性能参数可以通过对ADC的输出数据进行快速傅氏变换(FFT)计算得来<sup>[1]</sup>。在这些动态性能参数中, $ENOB$ 是表征ADC的动态性能的重要参数,ADC自身和外部电路产生的谐波、噪声等都可以在该参数中得到反映。

ADC的性能参数测试方法主要有两种:模拟方法和数字方法。模拟方法是将ADC采集的数字信号经DAC转换为模拟信号再用传统的测试方法对其进行测试,优点是易于理解,缺点DAC的噪声和谐波将影响ADC性能指标的测试;目前常见的数字测试方法主要有直方图法、正弦波拟合法和FFT法<sup>[2]</sup>,直方图法测试ADC的等效输入噪声以及无噪声码分辨率等性能参数,正弦波拟合法对ADC的动态性能给出总体描述,FFT方法测试ADC动态性能参数。模拟方法、直方图法和正弦波拟合法对信号源的幅度分辨率、频率分

分辨率和稳定性等有很高的要求,例如,测试12Bits的ADC,要忽略信号源输出幅度对测试带来的误差,要求信号源的幅度分辨率高达14Bits,这样的标准信号源在实验条件下很难获得,此外,三种方法测试得到的ADC性能参数单一。相比之下,使用FFT方法对信号源的要求不高,对于信号源误差可以在数据后续处理中进行抑制或者消除,获得的性能参数也较多,因此,目前在对ADC进行性能参数测试时以FFT方法应用最为广泛<sup>[3]</sup>,本文主要讨论如何使用FFT方法获得ADC的ENOB性能参数。

## 1 ADC的ENOB

一般来说,ADC的分辨率越高,其ENOB就越高。但是由于ADC自身的增益误差、失调误差、微分非线性性和积分非线性误差带来的噪声和谐波、采样时钟引入的噪声、系统的热噪声、电路板内信号串扰带来的噪声和电源噪声等,ADC的ENOB会有所下降<sup>[4]</sup>。公式(1)给出了ADC的有效位计算公式,该公式基于标准正弦波输入:

$$ENOB = \frac{SINAD - 1.76}{6.02} \quad (1)$$

注意,公式(1)假设使用ADC满量程输入,对于较低的输入信号幅度,在计算ENOB时有必要增加一个校正系数<sup>[5]</sup>,得到:

$$ENOB = \frac{SINAD - 1.76 + 20 \lg\left(\frac{\text{满量程幅度}}{\text{输入幅度}}\right)}{6.02} \quad (2)$$

此外,对于采用过采样技术的ADC,实际目标信号占用的带宽BW小于Nyquist带宽。如果使用数字滤波来滤除带宽BW以外的噪声成分,那么,计算ENOB时,在带宽BW范围内要增加一个校正系数(称为过采样“处理增益”)<sup>[6]</sup>,得到:

$$ENOB = \frac{SINAD - 1.76 + 10 \lg\left(\frac{f_s}{2 \times BW}\right)}{6.02} \quad (3)$$

目前,几大ADC生产厂商都给出了ADC的ENOB测试解决方案,如ADI公司的ADC Analyzer工具,TI公司的ADCPro工具,NS公司(已被TI收购)的ADC Wavevision工具等。这些工具都采用FFT方法对ADC的动态性能参数进行测试,其测试原理如图1所示<sup>[7]</sup>。

## 2 FFT测试方法

模拟信号经过ADC转换后变成数字信号,数字信号再经过FFT,从时域变换到频域。FFT是基于离散傅里叶变换(DFT)的一种快速算法<sup>[8]</sup>,采样点数为 $N_{FFT}$ 的

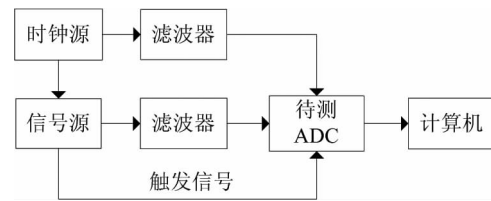


图1 ADC动态参数测量原理

Fig.1 Typical ADC evaluation setup

序列的DFT如公式(4)所示, $X(k)$ 、 $x(n)$ 均为复数, $W_{N_{FFT}}^{nk}$ 为旋转因子。FFT正是利用了DFT的旋转因子的周期性和对称性,将长序列的DFT分解为短序列的DFT,减少了运算量,降低了运算复杂度<sup>[9]</sup>。

FFT变换得到的是离散频谱数据,对采样点数为 $N_{FFT}$ 的数据,每条谱线的间距为 $\Delta f = f_s / N_{FFT}$ ,称为频率分辨率(也称为各频率“仓”的宽度)<sup>[10]</sup>。

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N_{FFT}-1} x(n) W_{N_{FFT}}^{nk}, k=0, \dots, N_{FFT}-1 \quad (4)$$

在FFT变换过程中,相当于有一个带宽为 $\Delta f$ 的带通滤波器作用于采样数据。因此,最终的FFT的理论噪底等于ADC的理论SNR加上FFT“处理增益” $10 \times \lg(N_{FFT}/2)$ ,如图2所示,可以通过提高 $N_{FFT}$ 来降低FFT的理论噪底,另外,可以通过多次FFT测量来减小各个噪声谱成分幅度之间的差异。

使用FFT分析ADC采样数据时存在频谱泄露问题,频谱泄露(Spectral Leakage)是指某指定频率点的能量进入邻近频率中,在频谱图上表现为该频谱线宽不再为一条线,而是一个包络。频谱泄露会使测试结果产生误差,通常采用相干采样和加窗函数的方法来抑制或者消除频谱泄露<sup>[11]</sup>。

相干采样在ADC动态性能测试中,应用十分广泛。如果条件满足,相干采样还可以提高FFT变换的精度,并且不需要加窗函数处理,相干采样的条件如

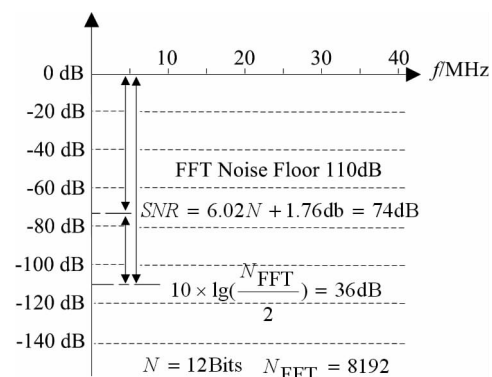


图2 FFT理论噪底

Fig.2 Theoretic FFT noise floor

公式(5)  $f_s$  是采样频率  $f_{in}$  是输入待采样波形的频率,  $M$  是采样的周期数,  $N_{FFT}$  是采样的样本点数, 要求  $M$  和  $N_{FFT}$  为整数, 且互为素数关系, 并且要求  $N_{FFT}$  为 2 的整数次幂<sup>[12]</sup>。

$$f_s \times M = f_{in} \times N_{FFT} \quad (5)$$

为了满足相干采样的要求, 在给定  $f_s$  和  $N_{FFT}$  之后, 需要通过反复计算, 才能求得满足该条件的  $M$  和  $f_{in}$ 。为了测试需要, 将公式的条件等价于  $N_{FFT}$  为 2 的整数次幂,  $M$  为奇数或素数, 建立该条件需要一个反复的计算过程。下面, 以某一具体计算为例, 假设  $f_s = 400\text{MHz}$ ,  $N_{FFT} = 8192$ , 假设要分析 ADC 在  $f_{in} = 1\text{MHz}$  频率附近的有效位, 则:

$$M = \text{int}(f_{in}/f_s) \times N_{FFT} = 20$$

由于该数为偶数, 在该数附近的奇数和素数分别为 21 和 23。可以得到:

$$f_{in}(21) = 400\text{MHz} \times (21/8192) = 1.025390625\text{MHz}$$

$$f_{in}(23) = 400\text{MHz} \times (23/8192) = 1.123046875\text{MHz}$$

可以看到, 相干采样对信号源的频率分辨率和稳定性有要求很高, 在实际使用时, 因为信号源的频率分辨率和稳定性都不够, 在对采样数据进行 FFT 分析时, 还是会造成信号的频谱泄漏, 需要采用其它的方法, 来减少频谱泄漏, 通常需要加窗函数来抑制频谱泄露。

加窗函数时, 窗函数的选择非常重要, 理想的窗函数是主瓣宽度尽量小, 过渡带尽量陡, 旁瓣相对于主瓣越小越好, 这样可使能量尽可能集中于主瓣内。实际应用较多的是矩形窗、汉宁(Hanning)窗、哈明(Hamming)窗、布莱克曼(Blackman)窗等。矩形窗的主瓣很窄, 但是旁瓣衰减却很慢, Hanning 窗、Hamming 窗、Blackman 窗等的旁瓣衰减有了明显的改进, 但是主瓣却宽了很多, 大概是矩形窗主瓣的二倍, Blackman 窗的主瓣还要宽<sup>[13]</sup>。图 3 给出了相干采样图形和非相干采样图形加窗函数后功率谱密度图形, 可以看到, 对于相干采样, 能量都集中在一个频率点上, 平均噪底很低; 对于非相干采样, 出现了明显的频谱泄漏现象, 平均噪底被抬高, 经过加窗函数处理, 平均噪底被压低, 能量分布也得到集中, 但是能量依然不如相干采样集中。

采用加窗函数的方式来抑制频谱泄漏是以主瓣展宽为代价的, 高的旁瓣抑制意味着更大的主瓣宽度, 在测试 ADC 动态性能参数时, 选择一个合适的窗函数并非易事, 不同的窗函数导致测试结果不一样。

### 3 使用 FFT 对 ADS5400 的 ENOB 进行测试

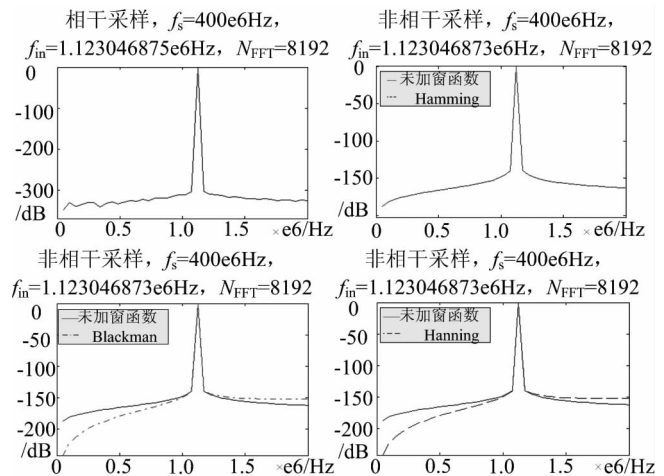


图 3 相干采样和非相干采样的功率谱密度

Fig.3 Power spectrum density (PSD) of coherent

and incoherent sampling

在对 ADC 的 ENOB 进行测试时, 存在很多不确定因素, 这会引入一定量的噪声和谐波, 这些噪声和谐波可以分为两类, 一类是 ADC 自身的噪声和谐波; 一类是 ADC 外围电路引入的噪声和谐波, 前者是 ADC 固有的, 是造成其动态特性恶化的根源, 而后者则是由测试设备带来的, 是测量误差的直接来源, 这些外围设备包括信号源、时钟源等。在测试时, 需要想办法抑制或者消除外围电路引入的噪声和谐波, 采用了参考文献[14]提到的 ADC 的 ENOB 测试方法, 利用公式(1)得到 ADC 的 ENOB, 该方法有效抑制和消除了信号源的噪声和谐波的干扰, 避免了单次测量带来的偶然误差, 实现了对 ADC 的 ENOB 的客观测量<sup>[14-15]</sup>。

在测试时, 将同一输入信号衰减  $m$  ( $m > 2$ ) 次对 ADC 进行测试, 然后将  $m$  个测量结果两两组合, 带入公式(6), 得到  $C_m^2$  个信纳比值, 取平均值后, 代入公式(1)求出 ADC 的 ENOB。

$$SINAD = 10 \lg \left( \frac{k_i^2 - k_j^2}{10^{-SINAD_i/10} - 10^{-SINAD_j/10}} \right) \quad i, j = 1 \cdots m \quad (6)$$

式中  $k_i$  为衰减倍数;  $-SINAD_{ki}$  为 ADC 输入信号幅度衰减  $k_i$  倍对应的信纳比, 具体测量步骤如下:

(1) 将信号幅度衰减  $k_1$  倍输入被测 ADC, 对采样数据做 FFT 谱分析, 求出  $SINAD_{k1}$ ;

(2) 将信号幅度衰减  $k_2 \cdots k_m$  倍, 重复步骤 1, 得到  $SINAD_{k2} \cdots SINAD_{km}$ ;

(3) 将  $m$  个测量结果两两组合代入公式(6), 求得  $C_m^2$  个信纳比值;

(4) 将  $C_m^2$  个测量值取平均, 代入公式(1)计算



ENOB。

每一 $k$ 值对应的 $SINAD$ ，可以通过多次测量求平均值的方式得到，这样可以降低单次测量中偶然误差的影响。

采用上述步骤对TI公司的ADS5400进行 $ENOB$ 测量，ADS5400是TI公司的一款高速大动态ADC，采样率范围100MSps~1000MSps，分辨率为12Bits。测量平台如图4所示，信号源采用Agilent 33250A任意波形发生器，滤波器使用国内定制的低通滤波器，通过频率为DC~5MHz，ADC的采样数据经过USB 2.0接口传输到计算机上进行FFT分析，FFT分析软件工具采用ADI公司的ADC Analyzer。

测试时，ADS5400采样率为400MSps，输入正弦波频率为1.123MHz。按照本节给出的步骤，使用ADC Analyzer软件对采样数据进行FFT分析，采样点数8192，采用Hanning窗函数，得到 $SINAD_{ki}$  ( $i=1, 2, \dots, m$ )，通过公式(6)求得ADC的 $ENOB$ 。图5显示了一组1.123MHz、4V<sub>pp</sub>正弦波采样数据的分析结果，采样数据由研制的数据采集系统获得，在计算机上进行处理。

最终，在输入信号频率1.123MHz、输入幅度满量程时，ADS5400的 $SINAD=56.66\text{dB}$ ，有效位 $ENOB=9.12\text{Bits}$  ( $f_{in}=1.123\text{MHz}$ )。对比ADS5400的Datasheet给出的 $ENOB$ 典型值 $ENOB=9.34\text{Bits}$  ( $f_{in}=125\text{MHz}$ )，可以发现，改进的FFT方法大大降低了输入信号的谐波成分以及其它外围电路噪声的干扰，基本实现了对ADC的 $ENOB$ 的准确测量。

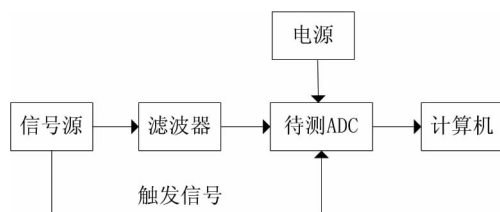


图4 ADS5400动态性能参数测试平台

Fig.4 ADS5400 dynamic parameters test platform

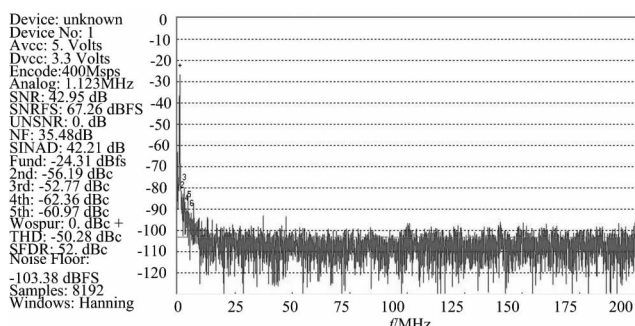


图5 1.123MHz、4V<sub>pp</sub>功率谱

Fig.5 PSD of sine wave 1.123MHz、4V<sub>pp</sub>

#### 4 结束语

在对ADC进行动态性能参数测试时，要注意抑制或者消除ADC自身和外围电路的引入的噪声和谐波，以期准确获得ADC的动态性能参数。将FFT方法用于高速高分辨率ADC的动态性能参数测试，注意到FFT分析采样数据时的频谱泄漏问题，给出了包括相干采样和加窗函数在内的解决方案。采用FFT方法对TI公司的高速高分辨率ADC—ADS5400进行测试，该方法可以很好地抑制和消除了信号源引入的噪声和谐波的干扰，在采样率为400MSps的情况下，获得了ADS5400的 $ENOB=9.12\text{Bits}$  ( $f_{in}=1.123\text{MHz}$ )，验证了使用FFT方法测量高速高分辨率ADC的有效位的可行性，该方法可以广泛应用在ADC的动态性能参数测试中。

#### 参考文献

- [1] Walt Kester. 了解 $SINAD$ 、 $ENOB$ 、 $SNR$ 、 $THD$ 、 $THD+N$ 、 $SFDR$ ，不在噪声底中迷失[EB/OL]. ADI, MT-003, 2008. <http://www.analog.com>.
- [2] 骆丽娜, 杨万全. 高速ADC的性能参数与测试方法[J]. 实验科学与技术, 2007, 5(2): 145-147.  
LUO Li-na, YANG Wan-quan. ADC Performance and the Test Methods [J]. Experiment Science and Technology, 2007, 5(2): 145-147.
- [3] 邓若汉, 余金金, 王洪彬, 等. 基于Labview的ADC综合性能测试系统[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(19): 4653-4657.  
DENG Ruo-han, YU Jin-jin, WANG Hong-bin, et al. Comprehensive Performance Test System for ADC Based on Labview [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(19): 4653-4657.
- [4] 张志强, 阮黎婷, 倪涛, 等. ADC模数转换器有效位计算[J]. 电子科技, 2010, 23(3): 84-86.  
ZHANG Zhi-qiang, RUAN Li-ting, NI Tao, et al. Calculation of Effective Numbers of Bits for the Analog-to-digital Converter [J]. Electronic Science and Technology, 2010, 23(3): 84-86.
- [5] 成章, 王建, 刘敏, 等. 关于ADC测试平台的探讨[J]. 电子信息对抗技术, 2012, 27(4): 77-80.  
CHENG Zhao, WANG Jian, LIU Min, et al. Discussion on ADC Parameters Testing Equipments [J]. Electronic Information Warfare technology, 2012, 27(4): 77-80.
- [6] Walt Kester. 揭开一个公式( $SNR=6.02N+1.76\text{dB}$ )的神秘面纱，以及为什么我们要予以关注[EB/OL]. ADI, MT-001, 2008. <http://www.analog.com>.
- [7] Chris Pearson. High-Speed ADC Basics[EB/OL]. ADI, SLAA510, 2011. <http://www.analog.com>.
- [8] 付贤东, 康喜明, 卢永杰, 等. 全相位FFT算法在谐波测量中的应用[J]. 电测与仪表, 2012, 49(2): 19-22.  
FU Xian-dong, KANG Xi-ming, LU Yong-jie, et al. Application of All Phase FFT Algorithm in Harmonic Measurement [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(1): 19-22.
- [9] 刘德福. 通用高速FFT/IFFT处理器的设计与实现[D]. 西安电子科技大学 2010.  
Liu De-fu. Design and Implementation of Universal and High Speed FFT/IFFT Processor[D]. Xi'dian University, 2010. (下转第 83 页)

## 作者简介:



岳长喜(1982—),男,陕西渭南人,2008年于西安交通大学获得硕士学位,2011年7月至12月作为国际交流访问学者赴德国物理技术研究院进行学术交流,现从事高电压、大电流以及电能计量技术研究。

Email: yuechangxi@sgepri.sgcc.com.cn



周峰(1980—),男,硕士,工程师,主要从事高电压计量技术方面的研究。



Enrio Mohs (1973—),男,2001年于德国 Braunschweig Wolfenbuettel 大学获得应用科学硕士学位,现于德国物理技术研究院(PTB)从事工频电压、电流和电能的精密测量技术研究。



雷民(1963—),男,博士,高级工程师,主要从事高电压大电流计量与测试技术研究。



章述汉(1955—),男,硕士,高级工程师,主要从事高电压大电流计量与测试技术研究。



项琼(1971—),女,硕士研究生,高级工程师,主要从事高电压计量技术方面的研究。

收稿日期 2012-12-19;修回日期 2013-08-14

(焦阳 编发)

## (上接第 17 页)

[10]NI. The Fundamentals of FFT - Based Signal Analysis and Measurement in LabVIEW and LabWindows/CVI[EB/OL]. NI, 2009, <http://www.ni.com>.

[11]崔庆林,蒋和全.高速A/D转换器测试采样技术研究[J].微电子学,2005,36(1):52-55.

CUI Qin-lin, JIANG He-quan. A Study on Test and Sample Technology for High-speed A/D Converters [J]. Microelectronics, 2005, 36 (1): 52-55.

[12]TI. High-Speed Analog-to-Digital Converter Basics [EB/OL]. TI, SLAA510, <http://www.ti.com>.

[13]陈建球,许俊,任俊彦.  $\Sigma \Delta$  调制器输出码流FFT谱分析的探讨[J]. 微电子学与计算机,2007,24(5):116-119.

CHEN Jian-qiu, XU Jun, REN Jun-yan. The Analysis of Sigma-Delta Modulator Bit-Stream FFT[J]. Microelectronics and Computer, 2007, 24 (5): 116-119.

[14]邱兆坤,王伟,马云,等.一种新的高分辨率ADC有效位数测试方法[J].国防科技大学学报,2004,26(4):1-5.

QIU Zhao-kun, WANG Wei, MA Yun, et al. A New Method for Testing ENOB of High-resolution ADC [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2004, 26(4): 1-5.

[15]向海生,赵豫斌,江晓山,等.八通道1Gbps数据采集系统设计与测试[J].核电子学与探测技术,2011,31(4):395-398.

XIANG Hai-sheng, ZHAO Yu-bin, JIANG Xiao-shan, et al. The Design and Test of Eight-channel 1 Gbps Data Acquisition System[J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2011, 31(4): 395-398.

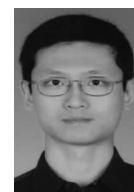
## 作者简介:



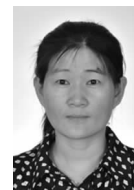
李海涛(1986—),男,硕士,从事核电子学工作。Email: lht2005b@mail.ustc.edu.cn



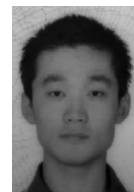
阮林波(1973—)男,硕士,从事物理电子学工作。  
Email: rlb\_sym@yahoo.com.cn



田耕(1978—)男,硕士,从事物理电子学工作。  
Email: tian\_gz@sohu.com



田晓霞(1976—)女,硕士,从事核电子学工作。



渠红光(1982—)男,本科,从事核电子学工作。  
Email: 29012271@qq.com

收稿日期 2013-01-08;修回日期 2013-04-03

(田春雨 编发)