

基于 USB 的高精度 AD 模块综合测试台设计

邱建鹰, 柏业超, 马 飞, 张兴敢

(南京大学 电子科学与工程系, 江苏 南京, 210093)

[摘要] 介绍一种基于 USB 接口的高精度 AD 模块综合测试台的设计方法. 根据雷达系统测试需要, 该测试台可以自动测试 AD 模块的量化信噪比、信号比噪声加失真、总谐波失真、有效位数、无杂散动态范围、双音互调失真、零偏、正交通道幅相误差、镜像抑制比、线性调频脉冲特性等参数. 采用 USB 接口与计算机连接, 参数的分析计算由计算机完成, 简化了硬件, 体积小、成本低、携带方便. 并给出了测试方法、电路原理框图和计算机软件流程图. 该测试台已经用于雷达 AD 模块的自动测试.

[关键词] AD 模块参数, 通道一致性, USB, 数据采集

[中图分类号] TP274.2 [文献标识码] B [文章编号] 1672-1292(2008)01-0013-05

Design of Precise AD Module Testing System Based on USB

Qiu Jianying Bai Yechao Ma Fei Zhang Xinggan

(Department of Electronics Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract A design of precise AD module testing system based on USB is introduced. According to the demands of radar systems, the testing system is able to automatically test many parameters, including signal-to-noise ratio, signal-to-noise and distortion ratio, total harmonic distortion, effective number of bits, spurious free dynamic range, two-tone intermodulation distortion, zero offset, amplitude and phase error of orthogonal channels, image rejection ratio and characteristics of linear frequency modulated pulse compression. USB is employed to connect the computer. The computer completes the analysis of parameters. The use of computer simplifies the hardware. The testing system is small cubage, low cost and portable. Circuit schematic diagram, software flow chart and calculation method of parameters are provided in this paper. The testing system has already been used in automatic test for the AD module in radar systems.

Key words AD module parameter, channel conformance, USB, data collection

雷达接收机多采用中频正交采样技术. 正交相干检波能够保留信号的复包络信息, 中频采样技术可以实现较高的镜像抑制比. 随着数字信号处理技术的发展及高速 A/D 的不断出现, 使得直接中频采样成为可能. AD 模块的性能直接影响到接收机系统的指标, 从而使 AD 模块的性能测试变得非常重要. 接收机后续信号处理依赖于正交通道的一致性, 实用中需要对正交通道幅相误差、镜像抑制比等参数进行测试. 本文设计的基于 USB 的高精度 AD 模块综合测试台可以测试 AD 模块的各项参数及正交通道的一致性.

1 AD 模块综合测试台的电路设计

1.1 电路系统框图

AD 模块综合测试台的电路系统框图如图 1 所示. 信号源由 DDS 芯片构成, 产生的正弦信号经 ADC 后变为数字信号, 再经正交变换后成为同相分量和正交分量, 分别记作 I 路、Q 路. 两路数据经 RAM 缓存后, 由 FPGA 读取, 经 USB 控制电路进入 PC 机进行处理.

1.2 USB 数据采集

图 2 为 FPGA 与 USB 控制芯片的电路连接图, 电路中 FPGA 选用 EP1C3T144C8, USB 控制芯片选用 CY7C68013.

收稿日期: 2007-09-05

作者简介: 邱建鹰(1977), 工程师, 研究方向: 雷达信号处理. E-mail: jianyqi@126.com

通讯联系人: 张兴敢(1956), 教授, 博士, 研究方向: 雷达信号处理. E-mail: zhxg@njnu.edu.cn

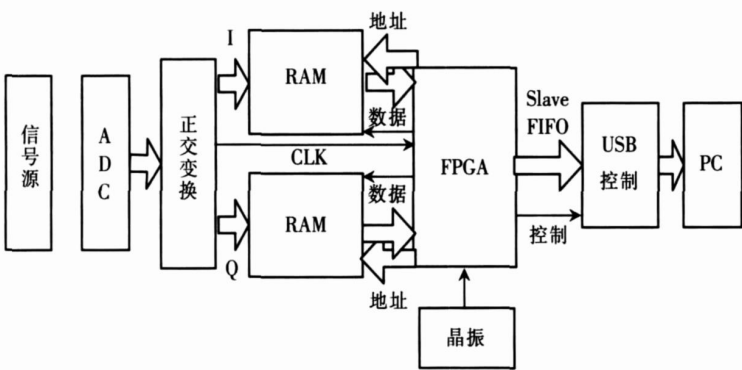


图 1 AD 模块综合测试台的电路系统框图

Fig.1 Block diagram of AD module testing system

图 3 为 FPGA 与 USB 控制芯片的通信时序, 两芯片间的通信流程如下:

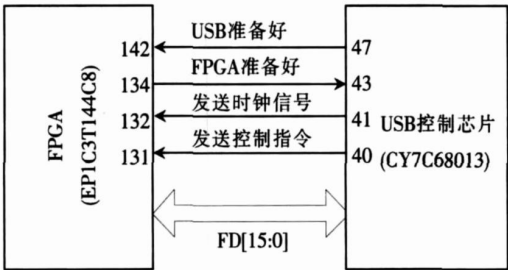


图 2 FPGA 与 USB 控制芯片的电路连接图

Fig.2 Diagram of connecting between FPGA and USB control chip

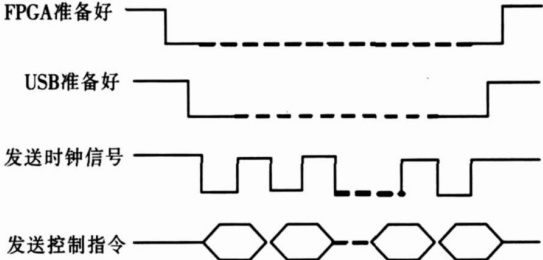


图 3 FPGA 与 USB 控制芯片的通信时序

Fig.3 Sequence diagram of communication between FPGA and USB control chip

- (1) FPGA 发送 $FPGAready$ 信号 (低电平有效) 给 USB 控制芯片, 表示 FPGA 准备好;
- (2) USB 控制芯片发送 $USBready$ 信号 (低电平有效) 给 FPGA, 表示在 $USBready$ 为低电平期间将有控制指令传送;
- (3) USB 控制芯片由 $Send_CLK$ 发送时钟信号, 同时由 $Send_DATA$ 发送控制指令给 FPGA, 控制指令在时钟信号上升沿有效;
- (4) FPGA 收到控制指令, 执行相应动作. 如: 采集数据指令. FPGA 发送各种控制时序信号和 RAM 地址, 把 I 路、Q 路数据存在 RAM 里, 而后将数据读到 FPGA, 再通过 $FD[15:0]$ 以字的形式传给 USB 控制芯片的从属 FIFO 端点 EP8 缓冲区, 由 PC 机读取.

2 AD 模块综合测试台的软件设计

软件由 3 部分组成: 数据采集、数据分析和前端界面. 最终软件运行在 Windows XP 操作系统平台下.

数据采集: 完成对 AD 模块综合测试台的数据进行读取, 读回来的数据称为 RAW;

数据分析: 完成对采集回来的 RAW 数据或由软件模拟产生的数据 (称为 EMU) 进行分析 (具体分析内容详见后面描述), 分析后产生的数据称为 DATA;

前端界面: 主要完成 RAW 和 DATA 数据的波形显示等功能. 软件工作流程如图 4 所示.

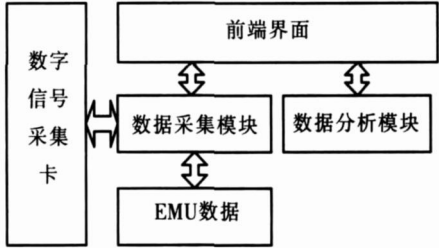


图 4 软件工作流程

Fig.4 Software flowchart

3 参数测试

AD 模块综合测试台测试的参数有: AD 模块的量化信噪比、信号比噪声加失真、总谐波失真、有效位数、无杂散动态范围、双音互调失真、零偏、正交通道幅相误差、镜像抑制比、线性调频脉压特性. 下面用到

的幅度均方根的计算方法为: 将采集到的信号合成复信号 $(I_n + jQ_n)$, 再变换到频域, 相应频率处的幅度即为要求的幅度均方根。

(1) 量化信噪比 (SNR)

该信噪比可直接计算, 不需测量, 计算公式为:

$$\text{SNR} = 6.02N + 1.763(\text{dB}), \quad (1)$$

式中, N 为 AD 的位数。

(2) 信号比噪声加失真 (SNAD)

信号比噪声加失真指 ADC 输出端信号有效值 $(A_{\text{signal}}[m s])$ 与奈奎斯特频率以下的全部噪声和谐波分量 (不包括直流分量) 的总有效值 $(A_{\text{noise}}[m s])$ 之比, 计算公式为:

$$\text{SNAD}_{\text{dB}} = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{\text{signal}}[m s]}{A_{\text{noise}}[m s]} \right). \quad (2)$$

(3) 总谐波失真 (THD)

总谐波失真的计算公式为:

$$\text{THD}_{\text{dB}} = 20 \log_{10} \frac{\sqrt{V_{\text{HD}_2}^2 + V_{\text{HD}_3}^2 + \dots + V_{\text{HD}_N}^2}}{V(f_{\text{in}})}, \quad (3)$$

式中, $V(f_{\text{in}})$ 为基波分量; V_{HD_n} 为 n 次谐波分量。镜像频率算作负一次谐波, 谐波从 $-10 \sim 10$ 次 (信号带外的不计入谐波)。

(4) 有效位数 (ENOB)

有效位数是指在噪声和失真存在时, ADC 实际可达到的位数。计算公式为:

$$\text{ENOB} = (\text{SNAD} - 1.763) / 6.02 \quad (4)$$

(5) 无杂散动态范围 (SFDR)

无杂散动态范围指输出信号幅度均方根 $(A_{\text{FUNDAMENTAL}}[m s])$ 与最大伪波幅度均方根 $(A_{\text{SPURIOUS-MAX}}[sn s])$ 之比。伪波包括直流分量。用分贝数表示:

$$\text{SFDR}_{\text{dB}} = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{\text{FUNDAMENTAL}}[m s]}{A_{\text{SPURIOUS-MAX}}[sn s]} \right). \quad (5)$$

(6) 双音互调失真 (TTMD)

当 ADC 输入两个频率靠近的信号时, 由于 ADC 传递函数的非线性, 将导致互调失真。

计算公式为:

$$\text{TTMD}_{\text{dB}} = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{\text{MF_SUM}}[m s] + A_{\text{MS_DIFF}}[m s]}{A_{\text{FUNDAMENTAL}}[m s]} \right). \quad (6)$$

式中: $A_{\text{MF_SUM}}[m s] + A_{\text{MS_DIFF}}[m s]$ 表示输入信号频率成分的各种可能的整数倍组合。

(7) 零偏

零偏为 AD 模块输入信号为零时, 输出数据的平均值。

(8) 正交通道幅相误差

正交通道幅相误差包括正交通道幅度一致性误差和正交通道相位正交性误差。

将采集到的正交信号 I_n 和 Q_n 去直流得:

$$I_n = I_n - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_n, \quad Q_n = Q_n - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Q_n. \quad (7)$$

正交通道幅度一致性误差 为:

$$= 20 \log \left(\frac{A_{\text{In}}}{A_{\text{Qm}}} \right), \quad (8)$$

其中,

$$A_{\text{In}} = \sqrt{\frac{2}{N} \sum_{n=1}^N I_n^2}, \quad A_{\text{Qm}} = \sqrt{\frac{2}{N} \sum_{n=1}^N Q_n^2}. \quad (9)$$

正交通道相位正交性误差 为:

$$= \frac{360}{N} \frac{1}{A_{\text{Im}} A_{\text{Qm}}} \sum_{n=1}^N I_n Q_n (). \tag{10}$$

(9) 镜像抑制比

镜像抑制比为镜像电平分量 ($A_{\text{MAGE}}[m s]$) 与信号分量 ($A_{\text{FUNDAMENTAL}}[m s]$) 之比. 其中镜像电平分量和信号分量可在信号幅度谱中读取. 计算公式为:

$$20\log_{10}\left[\frac{A_{\text{MAGE}}[m s]}{A_{\text{FUNDAMENTAL}}[m s]}\right]. \tag{11}$$

(10) 线性调频脉压特性

线性调频脉压特性指设定线性调频脉冲的时宽、频宽、采样频率和脉压极性参数后, 进行海明加权, 匹配滤波. 显示脉压输出波形, 计算主瓣宽度, 主副瓣比.

4 实验结果

上述测试台用某新型雷达 A/D 模块进行了测试验证. 测试时, A/D 模块输入信号为 27.9MHz 的正弦波, 雷达接收机中频为 28MHz A/D 变换器输出数据经过希尔伯特变换, 输出数据率为 4MSPS 的零中频数字信号. 对该模块的测试结果如图 5 所示.

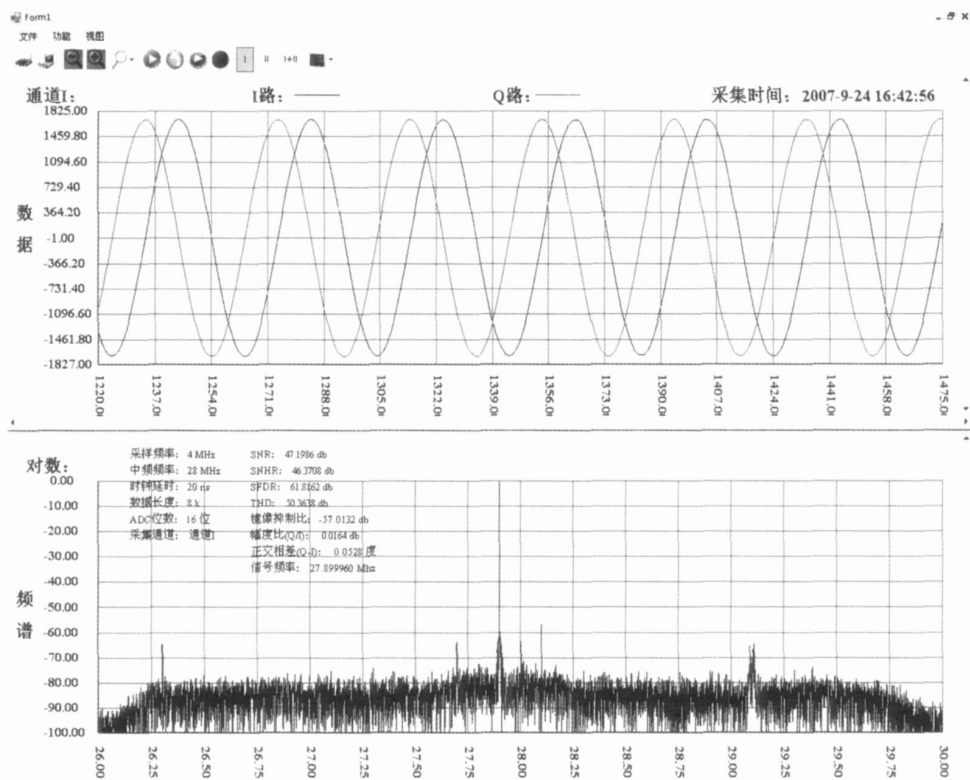


图 5 测试结果

Fig.5 Test result

信号频率: 27.899960MHz 正交相位误差: 0.0528; 幅度比: 0.0164 db 镜像抑制比: -57.0132 db 量化信噪比 (SNR): 47.1986 db 无杂散动态范围 (SFDR): 61.8162 总谐波失真 (THD): 50.3638

5 结论

雷达信号处理对前端 AD 模块的性能和正交通道一致性的要求越来越高, 因此对这些特性的测试变得非常重要. 本文介绍的基于 USB 的高精度 AD 模块综合测试台可以实现对 AD 模块参数和正交通道一致性的自动测试. 测试台将采集到的数据通过 USB 接口送至 PC 机, 由 PC 机完成各种特性参数的计算, PC 机可继续进行后续的雷达信号处理, 因此测试台具有很好的扩展性和广阔的应用前景.

[参考文献] (References)

- [1] 黄伟. 一种基于 PC 打印机口设计的 A/D 转换器 [J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2003, 3(1): 62-64.
Huang Wei The A/D interface based on printer port of PC [J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2003, 3(1): 62-64 (in Chinese)
- [2] 朱延海. 电子测量仪器信道噪声的对消 [J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2005, 5(3): 12-15
Zhu Yanhai On the noise silencing in the channel of electronic measuring apparatus [J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2005, 5(3): 12-15 (in Chinese)
- [3] 李军, 李榕, 常鸿森. 基于 MATLAB 平台和 GPIB 接口的测试系统开发及应用 [J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2005, 5(1): 86-88
Li Jun, Li Rong, Chang Hongsen Development and application of measurement system based on MATLAB and GPIB [J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2005, 5(1): 86-88 (in Chinese)
- [4] 林茂六, 吴芝路, 王金龙, 等. 高速 ADC 及由其构成的并行/交替式数据采集系统的非线性研究 [J]. 电子学报, 2000, 28(2): 72-74
Lin Maoliu, Wu Zhilu, Wang Jinlong et al Nonlinearity of high-speed ADC and a data-acquisition system with interleaving/multiplexing [J]. ACTA Electronica Sinica, 2000, 28(2): 72-74 (in Chinese)
- [5] 陈光, 刘开华. 通用 USB 总线接口设计与应用 [J]. 电子测量技术, 2006, 29(3): 164-165
Chen Guang, Liu Kaihua Design and application of USB universal interface [J]. Electronic Measurement Technology, 2006, 29(3): 164-165 (in Chinese)
- [6] 乔鹏, 葛宝臻. 基于 USB 总线高速数据采集系统 [J]. 电子测量技术, 2003(4): 51-52
Qiao Peng, Ge Baozhen The research and implementation of the high-speed DAQ system based on USB [J]. Electronic Measurement Technology, 2003(4): 51-52 (in Chinese)
- [7] 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(1): 145-147.
Luo Lina, Yang Wanquan ADC parameters and the test method [J]. Experiment Science and Technology, 2007, 5(1): 145-147 (in Chinese)
- [8] 张建强, 冯建华, 冯建科. 基于自动测试系统的 ADC 测试开发 [J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(2): 279-283
Zhang Jianqiang, Feng Jianhua, Feng Jianke Testing development for ADC on automatic test system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(2): 279-283 (in Chinese)
- [9] 刘泽西, 程晶晶, 孔力. 基于 USB2.0 接口的高速实时数据采集系统 [J]. 测控技术, 2007, 26(2): 34-37
Liu Zexi, Cheng Jingjing, Kong Li High speed data acquisition system based on USB 2.0 interface [J]. Measurement and Control Technology, 2007, 26(2): 34-37 (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]