

# PXI 峰值功率分析仪的设计技术研究

徐达旺<sup>1,2</sup> 赵浩<sup>1,2</sup> 董占勇<sup>1</sup> 李强<sup>1</sup> 刘元商<sup>1</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第四十一研究所 青岛 266555; 2. 电子测试技术重点实验室 青岛 266555)

**摘要:**介绍了一种 PXI 峰值功率分析仪的设计技术,该峰值功率分析仪采用 PCI 接口芯片+ FPGA+ DSP 的紧凑的体系架构,较大的发挥了 FPGA 的灵活性,并充分利用 DSP 的数字信号处理能力,可用于采集和处理复杂的微波峰值功率信号。运用多种采样、校准和补偿技术实现对被测脉冲调制信号的多种幅度和时间参数的自动精确的快速测量,校准速度提升超 36 倍,测量准确度优化率达 3%。阐述了 PXI 峰值功率分析仪的系统框架、整机原理和软件详细设计,对其中的数据采集、功率校准和功率补偿等关键技术进行了重点说明。

**关键词:** PXI; 数据采集; 校准; 温度补偿; 频响补偿

**中图分类号:** TM931 TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

## Research on design technology of PXI peak power analyzer

Xu Dawang<sup>1,2</sup> Zhao Hao<sup>1,2</sup> Dong Zhanyong<sup>1</sup> Li Qiang<sup>1</sup> Liu Yuanshang<sup>1</sup>

(1. The 41st Research Institute of CETC, Qingdao 266555, China;

2. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, Qingdao 266555, China)

**Abstract:** This paper has introduced a new design method of PXI peak power analyzer. The PXI peak power analyzer's compact architecture uses PCI interface chip, FPGA DSP. It takes full advantage of FPGA's agility and DSP's data process ability. The analyzer can be used to acquire and process complex microwave peak power signal. Many methods of sampling, calibration and compensation are used, in order to make automatic and accurate measurement of input pulse modulation signal for many parameters. The speed of calibration is improved more than 36 times, and the accuracy optimization is up to 3%. In this paper, the system frame, machine principle and software detailed design are discussed. Many key techniques are emphatically described, including data acquisition, power calibration and power compensation.

**Keywords:** PXI; data acquisition; calibration; temperature compensation; frequency response compensation

### 1 引言

峰值功率分析仪可用于测量雷达、电子对抗、通信、制导、导航、广播电视、微波医疗设备等许多电子系统脉冲调制微波信号的多种幅度和时间参数,是表征脉冲调制信号特性的测量工具。

本文介绍了一种 PXI 峰值功率分析仪。相对于传统的峰值功率分析仪,由于减少了显示、外部接口等许多部件,使得 PXI 峰值功率分析的体积、重量和功耗等大大减少、可靠性得到了提升。并且具有速度快、精度高、即插即用等特点,可方便快速组成测试系统。到目前为止,国内

外尚未公开过 PXI 峰值功率分析产品。

### 2 PXI 总线简介

PXI 是 PCI 总线在仪器领域的扩展,将 PCI 总线技术发展成适合于试验、测量与数据采集场合应用的机械、电气和软件规范。

PXI 具有 PCI 总线的性能和特点;此外它通过增加专门用于多模块同步的触发总线、系统参考时钟、星形触发来满足数据通信要求。PXI 总线增加了专门的系统参考时钟、触发总线、星形触发线,来满足高精度定时、同步和数据通信要求<sup>[1]</sup>。

收稿日期:2015-11

### 3 系统框架

系统框架如图 1 所示,主要由 PXI 主机、PXI 接口控制、DSP + SDRAM、通道采集模块、时基模块、触发模块、电源管理模块、IIC 总线接口等部分构成。

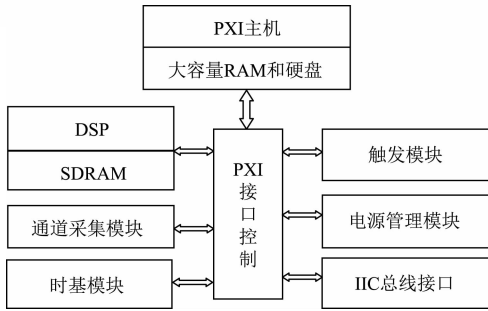


图 1 PXI 峰值功率分析仪的系统框架结构

DSP 采用 TI 公司的低功耗的 TMS320C6747 数字信号处理器,主要进行数据处理,其外接的 SDRAM 用于 DSP 程序的运行和数据的存储。

PXI 接口控制包括 PCI9054 模块和 FPGA 数据采集与接口时序控制。

通道采集模块用于对输入的被测信号进行对数放大、带宽控制、峰值检测<sup>[2]</sup>等处理,经过模数转换后由 FPGA 控制存入 RAM 中,DSP 进行后续处理。

时基模块用于控制数据采集时长和采样方式,并对于不同的时基,采用不同的采集模式。

触发模块的功能是实现内外触发源的选择,并进行触发电平、触发延时、触发迟滞、触发释抑等控制,用于稳定信号显示、防止重复触发等。

### 4 整机原理设计

峰值功率分析仪的整机原理如图 2 所示。

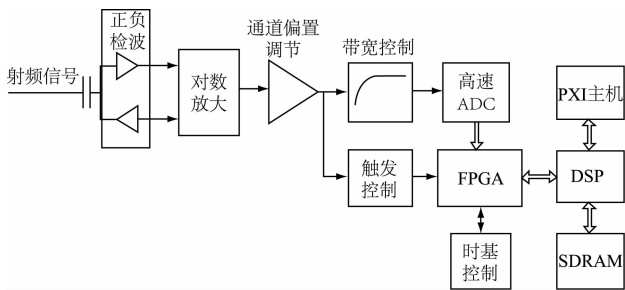


图 2 PXI 峰值功率分析仪的整机原理

脉冲调制信号首先经过双二极管检波器进行检波,输出正、负两路的脉冲包络信号,检波器输出的两路脉冲包络信号送至宽带对数放大器进行对数放大。带宽分为高低两种,用户可以选择。

对数放大器输出的信号经过通道运放偏置单元调整后,将被测信号的动态范围调整至高速模数转换器的工作范围之内。

通道运放偏置单元输出的信号分为两路,其中一路送至高精度的高速 ADC 进行 AD 转换;另一路信号送至高速触发电路。

DSP 处理单元是整个系统的关键,它从 FPGA 的内部存储区中将有效 ADC 数据读出,DSP 程序完成数据处理,并将运算结果储存于 DSP 的内部 RAM 的高速缓存(Cache)中。Cache 具有速度快等特点,用于存放需要由 PXI 主机读取的测量数据。SDRAM 具有容量大、速度快等特点,用于运行 DSP 程序和存放数据处理的中间结果。

### 5 软件详细设计

整个系统软件主要由 DSP 主控软件、设备驱动程序和二次开发用的动态库等 3 部分构成,其中,DSP 数据处理软件运行于 DSP+SDRAM 中,后面两个运行于 PXI 主机上。动态库程序提供了仪器初始化、关闭、各种配置和检测的 API 函数,供用户调用;驱动程序用于建立应用程序与硬件之间数据交流的通道。主控程序软件是系统的控制程序,通过设备驱动程序中封装的 HPI 接口协议与 PXI 主机进行数据交互、通过接收 FPGA 采集的数据进行数据处理,包括功率线性校准、通道自动校零、通道自动校准、数据修正、温度补偿、频响补偿、波形运算、数据存储等。

#### 5.1 DSP 主控软件

分析仪的 DSP 主控软件是系统的核心软件,其主要功能有:

- 1) 实时功率信号数据采集与信号处理功能;
- 2) 全新的校准技术;
- 3) 多种补偿和数据修正模型,实时数据校准和修正,主要包括功率线性校准、温度补偿、频响补偿等;
- 4) 基于 PXI 的 HPI 主机接口功能;
- 5) 多达 15 种脉冲调制信号幅度和时域参数的自动测量。

下面仅对前 4 个主要功能进行介绍。

##### 5.1.1 数据采集与信号处理

数据采集存储和数据处理部分完成脉冲包络信号的 AD 转换、数据的快速存储以及数据校准和补偿等任务,本项目采用随机采样技术<sup>[3]</sup>和实时采样技术相结合实现数据的采集。采集的数据由 DSP 读出并经过 DSP 处理后,形成原始的功率缓冲区,由 PXI 上位机读出并进行一系列后续处理。

##### 5.1.2 功率校准技术

峰值功率分析的一个重要指标是测量的准确性和稳定性,选择合适的校准和补偿算法是设计的关键。

目前比较通用的校正算法有神经网络建模方法<sup>[4]</sup>和功率动态校准法<sup>[5]</sup>。其中,功率动态校准法是在整个通道的动态范围内,从高功率到低功率进行校

准,形成原始功率插值样点,并运用插值技术<sup>[6]</sup>产生精密的校准表格。

上述校准算法的缺点是需要一个高稳定的动态校准源,且校准时间很长(一般超过 2 min)。

本方案在满足测试指标的情况下,采用全新的功率校准技术:工厂定标和单点直流校准技术,完全替代了功率动态校准技术。一方面节约了开发成本,另一方面,校准时间提高了 20 倍以上(校准时间由 2 min 缩短为不到 5 s),方便用户使用。

下面对该校准技术进行介绍。

工厂定标是指用外接标准信号对分析仪的通道进行功率线性校准,形成原始功率插值样点,并存放在通道的 EEPROM 中。校准过程与利用分析仪内置校准源校准算法基本一致,不同点在于校准信号源是外置的。一般可采用标准功率计对信号源进行定标,使得信号源的输出功率准确,然后采用功率校准技术对通道的功率线性进行标定。

单点直流校准技术是指为了消除不同通道之间的差异,在通道检波的前端设置一个稳定的直流信号,通过检测该直流信号,实现功率测量的归一化。

峰值功率分析仪在初始化过程中,将通过工厂定标得到的原始功率插值样点从 EEPROM 读取,并利用三次自然样条插值技术进行精度表格扩展。为了提高测量的速度,本方案采用以 ADC 最小分辨率为步进进行精度表格扩展,对于任意 ADC 值,以其作为索引可直接从精度表格中获取功率值。

### 5.1.3 功率补偿技术

为了保证峰值功率分析仪在全频带、全动态、宽温度范围内具有很高的准确度,本软件使用了很多补偿或修正技术,包含温度补偿、频响补偿、功率线性修正等,得到准确的功率值。

#### 1) 温度补偿

温度补偿<sup>[7-8]</sup>模型是一个关于功率、温度、误差(即温度补偿系数 TC)的三维曲面,表示如下:

$$TC(T, P) = f(T, P) \quad (1)$$

式中:  $T$  小于 1, 是归一化的温度 AD,  $P$  是被测信号的功率,  $TC(T, P)$  为温度补偿系数。上述函数  $f$  可以表示为  $T$  的泰勒级数,如下所示:

$$TC(T, P) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i(P) T^i \quad (2)$$

式中:  $a_i(P)$  为仅与功率有关的函数。

如表 1 所示为功率为 0 dBm 的 6 个温度点的测试数据,可以看出在不同温度,温度补偿系数在 0.9 到 1.5 之间。如果不进行温度补偿,则有最大超过 50% 的测量误差。

表 1 典型功率点的温度补偿系数

温度点(°C)	补偿系数
-5	1.51
5	1.20
15	1.07
25	1.00
35	0.94
45	0.91

本案采用有限次数的曲线拟合技术<sup>[9]</sup>,如 4 次切比雪夫曲线拟合,产生上述补偿多项式。对于任意给定的温度 ADC,代入多项式,可得到给定功率、给定温度的温度补偿系数。

#### 2) 频响补偿

频响补偿,即校准因子<sup>[10]</sup>,主要补偿探头的失配误差和检波管的频响特性。

传统的校准因子只补偿 0 dBm(1 mW)一个功率点,实验表明,校准因子不仅随频率变化而变化,也随功率的变化而变化,如表 2 所示。在窄带检波时,校准因子随功率的变化较小;对于测量宽带峰值信号时,需要用到宽带检波,校准因子随功率变化较大。因此为了保证整个功率动态范围和频率范围内的功率测量准确性,本方案采用以 10 dB 为功率步进、100 MHz 为频率步进补偿整个功率动态范围和频率范围的频响,如表 3 所示。该方法比传统的方法在测量准确度上优化了 3% 左右。

表 2 两个功率点的校准因子清单(%)

频率点/GHz	功率点/dBm	
	0 (%)	20 (%)
1	101.42	103.36
10	98.57	99.37
20	93.75	91.20

表 3 多个功率点的校准因子清单(%)

频率点/GHz	功率点/dBm		
	0 (%)	10 (%)	20 (%)
1	101.42	102.13	103.36
10	98.57	98.72	99.37
20	93.75	92.33	90.20

### 5.1.4 外部接口

PXI 峰值功率分析仪的外部接口是指与 PXI 主机进行数据通信的接口。本案采用 TMS320C6747 自带的 HPI 接口,实现从上位机加载程序和与上位机数据交换。HPI 信号连接如图 3 所示。

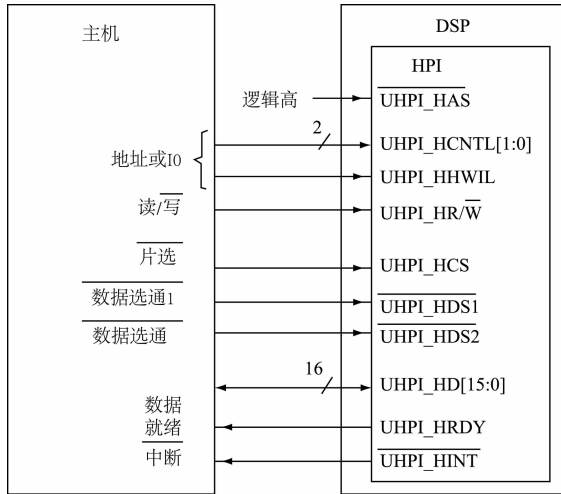


图3 HPI信号连接

表4 UHPI\_HCNTL1/0信号的访问类型选择

UHPI_HCNTL1	UHPI_HCNTL0	访问类型
0	0	HPIC 存取
0	1	HPID 自动增量存取
1	0	HPIA 存取
1	1	HPID 非自动增量存取

分析仪有大量的数据需要上传到 PXI 主机,采用 HPID 的自动增量存取的方式,可大大减少主机 CPU 的开销,提高主机的读取速度。

### 5.2 设备驱动程序

设备驱动程序实际上指一系列控制硬件设备的函数,提供连接到计算机的硬件设备的软件接口。本方案采用 Driver Studio 开发 PXI 设备 WDM 驱动程序。PXI 主机通过设备驱动程序与 DSP 进行数据通信,包括参数配置和测量数据的读取操作。

为了减小 PXI 主机的开销,提高读取速度,本方案将 HPI 的控制封装在设备驱动程序中,主机只需给设备驱动程序传入 DSP 的内存地址和数据长度,即可将该内存地址的数据一次性读取到主机内存中,使得进出内核的次数降低为 1 次。实验表明,读一帧数据(2 004 个字节)的速度比原设计提高了 2~3 倍。

设备驱动程序开发完成后,需要安装在目标 PXI 主机上,PXI 主机识别到该设备后,进行后续的通信。

### 5.3 二次开发用的动态库

二次开发用的动态库是为简化用户使用 PXI 峰值功率分析仪而封装的函数库。

动态库开发环境为 VC++,可被目前主流开发工具调用,如 VC++、C#、LabWindows/CVI 等。

动态库中包括初始化函数 PXIxxxx\_Init、复位函数 PXIxxxx\_Reset、关闭函数 PXIxxxx\_Close、波形读取函数 PXIxxxx\_WaveRead 等。

## 6 结论

本文提出了 PXI 峰值功率分析仪的完整解决方案,通过采用比较成熟的数据采集、功率校准和功率补偿等技术,不仅大幅提升了速度,而且测量准确性和稳定性得到了保证。与传统的峰值功率分析仪相比,本分析仪具有速度快、精度高、功耗低、体积小、重量轻、即插即用等优点。上述设计技术对于开发其他仪器仪表具有一定的借鉴意义。

### 参考文献

- [1] 郭恩全,苗胜.测试总线发展的回顾与展望[J].电子测量与仪器学报,2009,23(8):1-6.
- [2] 王飞.基于FPGA的全数字化峰值时刻检测技术[J].电子测量与仪器学报,2015,29(6):914-919.
- [3] 刘俊斌,吴松林,周卫星.基于FPGA实现的高速等效采集系统[J].电子技术应用,2011,37(10):84-86.
- [4] 何伟铭,宋小奇,甘屹,等.传感器校正的优化灰色神经网络建模方法研究[J].仪器仪表学报,2014,35(3):504-512.
- [5] 赵凯华,周华.便携式真峰值功率计设计[J].自动化仪表,2006,27(9):33-35.
- [6] 周锋,王瑞宝.一种选取有效测量点简化测量不确定度计算的方法[J].国外电子测量技术,2015,34(6):37-39.
- [7] 周英平,刘祖望,龙泳.数字测量系统中传感器温度补偿的一种新方法[J].传感器技术,2005,24(11):10-14.
- [8] 李坤党,徐达旺.二极管功率计的数字校准补偿技术[J].国外电子测量技术,2007,26(7):45-47.
- [9] 曾金芳,滕召胜.信息熵在曲线拟合辨识中的应用[J].电子测量与仪器学报,2012,26(2):171-176.
- [10] 闫道广,朱军,李健一.新型功率传递系统构建方案研究[J].宇航计测技术,2008,28(5):27-30.

### 作者简介

徐达旺(通讯作者),1972年出生,男,学士,高级工程师,主要研究方向为微波测量仪器。  
E-mail: xudawang2008@163.com