

高光谱微波辐射计宽带高速数字系统设计

罗阳锦^{1,2}, 张升伟¹, 陆浩¹

(1. 中国科学院国家空间科学中心微波遥感技术重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100190)

摘 要: 高光谱微波辐射计是基于频谱分析技术的精细谱段微波辐射计, 通过增加探测通道实现高垂直分辨率大气探测, 解决传统微波辐射计通道数少, 频谱分辨率低的问题. 该系统采用高性能模数转换器 (Analog-to-Digital Converter, ADC) 实现对模拟输入信号进行 10Gsps 采样, 8bit 量化, 并基于高性能现场可编程门阵列 (Field Programming Gate Array, FPGA) 芯片获取输入信号的功率谱. 文章详细介绍了宽带高速数字系统设计、器件选型和测试方法, 给出了测试结果, 分析表明硬件系统设计符合设计要求.

关键词: 谱分析技术; 高光谱微波辐射计; 功率谱; 高性能模数转换器; 现场可编程门阵列

中图分类号: TP6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021)02-0380-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20190815

The System Design of Wide Frequency Band and High Speed Digital System of Hyperspectral Microwave Radiometer

LUO Yang-jin^{1,2}, ZHANG Sheng-wei¹, LU Hao¹

(1. The Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190 China)

Abstract: Hyperspectral microwave radiometer is based on the technological analysis of spectrum. It is able to increase vertical resolution of measurement of atmosphere by increasing frequency measurement channels. The back-end system of hyperspectral microwave radiometer sampled analogical signal with 4GHz frequency band at 10Gsps by using high-performance analog-to-digital converter (ADC). The output digital signal from ADC was dealt with on field programming gate array (FPGA) by implementing the algorithm of power spectrum. The detailed subsystem design, the ways to choose components meeting the design requirements and the testing methods were presented. In addition, some basic test results and analysis results were presented.

Key words: technology of spectrum analysis; hyperspectral microwave radiometer; power spectrum; high-performance analog-to digital converter (ADC); field programming gate array (FPGA)

1 引言

在大气、海洋、陆地及深空等遥感探测领域, 微波辐射计发挥着越来越重要的作用. 高精度、高空间分辨率、高时间分辨率、高频谱分辨率、小体积、低功耗、低成本已经成为微波辐射计发展的方向^[1]. 在提高频谱分辨率方面, 国内外采用不同的技术体制进行尝试并取得了一定的结果^[2-5]. 瑞士伯尔尼大学研制出了微波辐射计 MIAWARA 及 SWARA^[1] 和 MIAWARA-C^[1,4], 其中 MIAWARA-C 观测频带范围为 500MHz, 通道数为 16384 (16k), 频率分辨率达到 31.25kHz, 探测水汽在最大吸

收频点 22.235GHz 处的微波辐射亮温, 反演海拔 20 ~ 80km 水汽剖面图, 实验结果清晰反映了水汽在 22.235GHz 处的吸收峰. MIAWARA-C 的核心技术是通过大规模可编程逻辑门阵列 (FPGA) 将输入信号进行实时快速傅里叶变换及功率谱计算, 但其不足之处在于探测频带窄, 不利于获取更多的大气信息. 林肯实验室于 2012 年研制出了一种机载式高光谱微波辐射计 HyMAS, 该机载辐射计包含了用于 183.31GHz 频段处的 16 个水汽探测通道和用于 118.75GHz 频段处的 36 个氧气探测通道, 提高了温湿度廓线的反演精度和垂直分辨率^[6]. 高光谱微波辐射计 HyMAS 的关键在于中

频部分使用了低温共烧陶瓷(Low Temperature Co-fired Ceramic, LTCC)技术,使得中频滤波器组模块小型化,但不足之处在于较难提高系统频谱分辨率.2013北京航空航天大学^[5]采用滤波器组的方法研究实现了一种地基式K波段(18~26GHz)共80个探测通道的微波高光谱辐射计.该滤波器组的方法不利于灵活改变系统的频谱分辨率,且当探测通道数增加时,用滤波器组的方法较难实现微波高光谱辐射计系统.国家空间科学中心^[7]在2015年实现了通道数为16384,频谱分辨率为15kHz的数字谱分析系统设计,但其探测频带只有250MHz.微波辐射计后端采用数字频谱分析仪的形式在微波探测领域已经表现出自己的优势,如体积小,频谱分辨率高,适用范围广,灵活性好等优势.电子技术的发展为数字频谱仪低功耗、小体积和低成本的实现提供了充分的条件.高采样率的ADC芯片结合高性能FPGA芯片使微波辐射计系统能够在更高的带宽范围内实现高频谱分辨率,从而实现更高垂直分辨率的大气探测.

本系统为微波辐射计的后端系统,用于微波辐射计探测50~60GHz频段处大气温度廓线,探测通道数为1024个,频谱分辨率为10MHz.此后端系统相比于其他微波辐射计后端系统,同时具有频谱分辨率可调、探测频带可拓展的优点.本文将从系统结构、系统硬件设计、硬件测试方法和测试结果四个方面介绍高光谱微波辐射计高速宽带数字系统.

2 系统结构

传统的微波辐射计系统结构可以简单描述成天线、接收机前端和接收机后端三部分,如图1所示.天线将接收到的目标辐射信号传递给接收机前端,信号在接收机前端经过低噪声放大、混频、滤波等处理,从射频信号下变频至中频信号,在接收机后端经过检波和低频放大后进行采样量化变成数字信号,经过定标后获得所需大气亮温数据.随着数字器件处理速度的不断提高,接收机后端也根据不同观测目标需求,由传统的检波、滤波等模拟技术向高速数字采样、频谱分析和数字相关处理等数字技术发展,极大地提高了频谱分辨率,使得高光谱微波辐射计的研发成为可能.

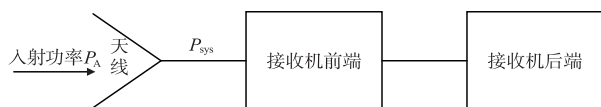


图1 微波辐射计系统框图

本系统前端采用跳频的方式将输入信号处理成频率范围为0~4GHz的中频信号并输出给后端高速宽带数字处理系统.高速数字系统将中频模拟信号经过高速ADC采样量化后传输给高性能FPGA,由FPGA芯片对ADC输出的数字信号进行快速傅里叶变换(Fast

Fourier Transform, FFT),如式(1)所示,获得输入信号的功率谱,如式(2)所示.该数字后端实现对输入模拟信号的频谱分析,因此也被称为数字谱仪.表1为该数字谱仪的系统性能参数.数字谱仪可以应用于不同频率的微波辐射计系统,因此采用高速数字技术的后端系统具有较好的灵活性.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp(-j2\pi nk/N), \quad (1)$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1$$

$$P[k] = |X[k]|^2 \quad (2)$$

表1 数字频谱仪的系统性能参数

输入信号幅值	250mVpp,差分信号
输入信号频率范围	0~4GHz
ADC时钟频率	5GHz, LVDS
ADC采样率	10Gsps
ADC精度	8bit
子系统频谱分辨率	10MHz

高光谱微波辐射计后端数字系统主要由主控单元,高速采样和功率谱分析单元两部分组成,系统结构如图2所示.主控单元主要包括了高速时钟信号产生模块和控制模块.高速时钟信号产生模块为高速ADC工作提供5GHz时钟信号;控制模块不仅对高速采样和功率谱分析模块输出的频谱信号进行打包上传给上位机,而且控制高速采样和功率谱分析模块的处理进程.高速采样和频谱分析单元主要包括了高速采样模块和功率谱处理模块.高速采样模块实现对接收机前端输出的高速模拟信号进行高速采样,功率谱处理模块将ADC输出的高速数字信号进行功率谱分析,并将获得的功率谱信号输出给主控单元,两部分结构通过高速接口实现互连.主控单元上的另外四组高速接口使该子系统可扩展为更大带宽的数字频谱仪,如8GHz,12GHz,16GHz和20GHz带宽的数字谱仪.

系统的程序控制流程如图3所示.系统上电后首先下载配置数据文件进行初始化,该过程结束后点亮相应的信号指示灯.待5GHz时钟模块输出稳定时钟信号后,ADC开始自动检验,与此同时主控单元准备同步信号,频谱仪开始工作.当ADC自动检测完成,谱仪接收到主控单元发出的同步信号后开始工作,ADC对输入信号进行高速采样,输出至功率谱处理模块进行处理,获得输入信号的功率谱数据.当获得第一帧功率谱数据时开启输出数据指示信号,主控单元将功率谱数据进行打包,并通过以太网上传给上位机.

系统采用快速傅里叶变换的方法实现数字频谱分析,频谱分辨率 Δf 与采样率 f_s 和FFT变换点数的关系如式(3)所示,其中 f_s 表示ADC芯片的采样率, N 表示

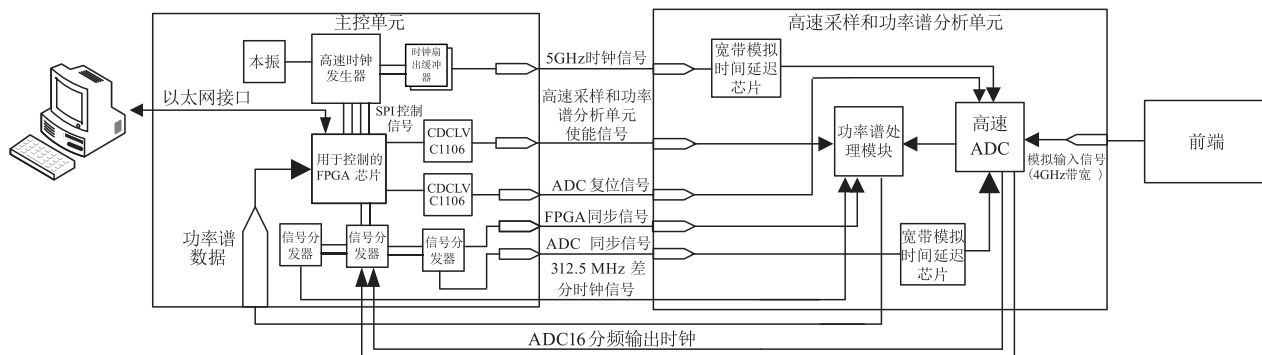


图2 高光谱辐射计数字后端的关键信号线和系统结构框图

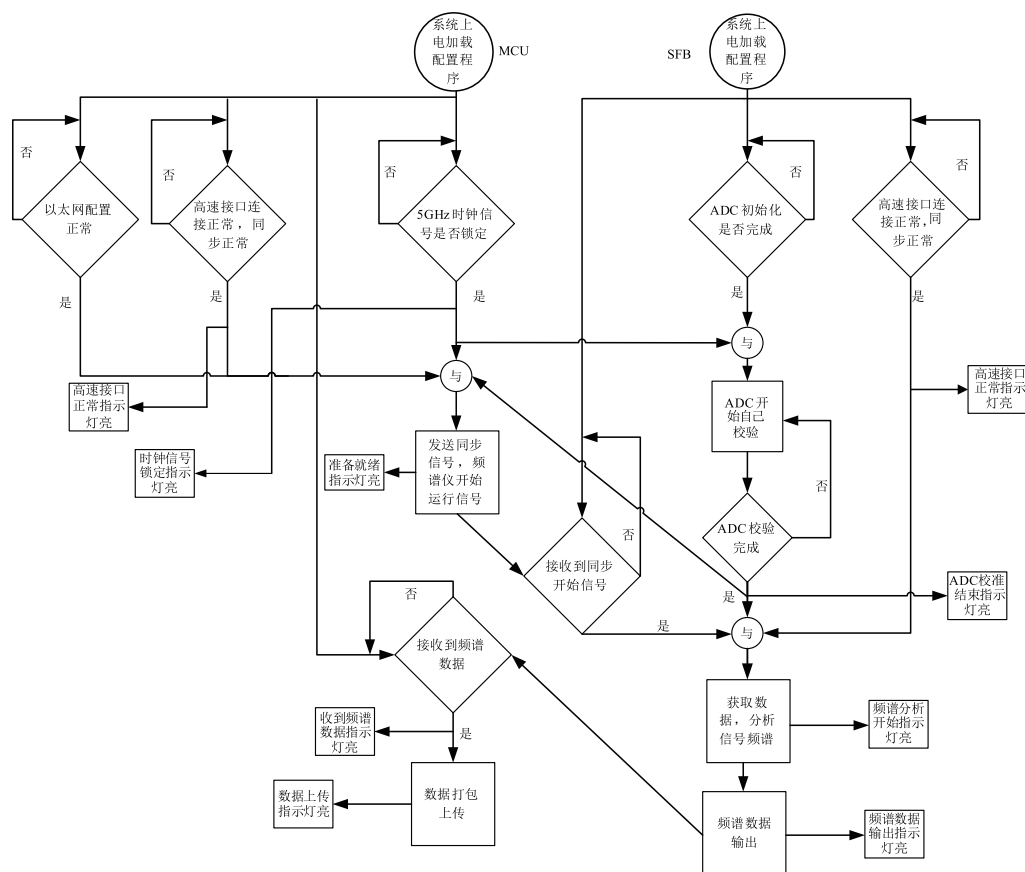


图3 系统工作流程图

FFT的变换点数. 本系统采样率为10Gsps, FFT变换点数为1024, 因此其频谱分辨率为10MHz. 可以通过对高速采样和功率谱分析单元中的FPGA芯片进行算法设计, 即改变FFT点数 N 实现调整高光谱微波辐射计数字后端系统频谱分辨率. FPGA芯片具有可重复编程的性能, 因此该系统可以根据需求调整功率谱算法中的相关参数从而调整系统频谱分辨率. 所选FPGA芯片资源的多少限制了数字频谱仪最高可达到频谱分辨率, 因此器件的选型十分关键.

$$\Delta f = f_s / N \quad (3)$$

3 系统设计

系统根据功能进行划分为5GHz时钟信号产生模块、高速采样模块、FPGA控制与数据处理模块.

3.1 5GHz时钟信号产生模块

时钟信号产生模块采用德州仪器的LXM2592的高性能宽带射频合成器^[8]生成5GHz时钟信号. 该芯片内部结构如图4所示. 该时钟芯片采用3.3V单电源供电, 融入了锁相环和倍压器积分噪声与集成线性稳压器, 具有频率设置灵活的特点. 该芯片可采用交流耦合的形式输入频率范围为5MHz到1400MHz的信号. 通

过串行外设接口或四线制串行接口对其寄存器实现编程控制,从而产生 20 ~ 9800MHz 的时钟信号。

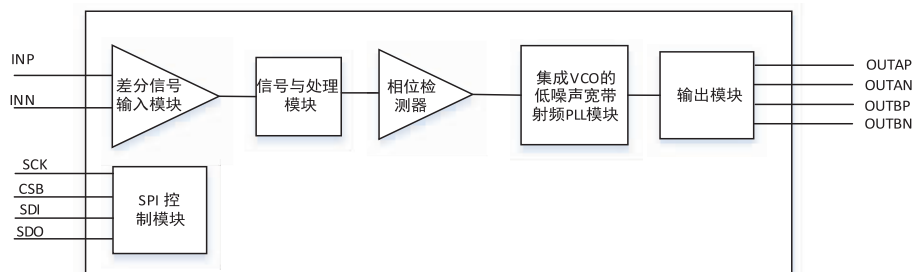


图4 时钟芯片内部结构简化图

3.2 高速采样模块

高速采样模块是系统实现高速大带宽性能的关键部分,它由 ADC 输入部分和高速 ADC 及其外围电路组成。高速 ADC 芯片 A8104 由 4 个 ADC 核通过交织采样的方式实现高速采样,可以实现 4 通道、2 通道和 1 通道差分输入,其采样率分别为 2.5Gsps、5Gsps 和 10Gsps。其主要性能参数如表 2 所示。

在该数字后端系统设计中,采用 ADC 单通道输入,10Gsps 的模式对 4GHz 宽带信号进行高速采样。ADC 为差分输入,在实际工程中,接收机前端输出的信号多为单端信号,因此需在信号输入 ADC 前将其转化为差分信号。由于输入信号最高频率达到 4GHz,为了避免引入额外噪声,因此采用无源单端信号转差分信号器件巴伦。该系统用于获得输入信号的功率谱,信号幅值对系统性能的影响是主要考虑因素。通过比较多个巴伦器件的性能,选用 Marki Microwave 的 BALH-0006S^[9],其主要性能如图 5 所示。它的幅值特性在 0db,其相位特

性在 180°附近随频率变化比较平缓,且在 4GHz 处信号的幅值变化小于 0.5dB。

表 2 ADC 主要性能参数

型号	A8104-C
输入时钟频率	5GHz
输入信号格式	差分输入,250mVp-p
采样率	2.5Gsps,5Gsps,10Gsps
精度	8bit
输出数据组成	8bit 数据位,1bit 超量程位,数据时钟输出
采样方式	交织采样
ADC 核心	4 个
输出信号	格雷码, LVDS(DDR) 数据
控制方式	SPI
电源	3.3V(内核电压)1.8V(I/O 口电压)
全运行功耗	10.8W
封装/引脚	BGA/24 × 24

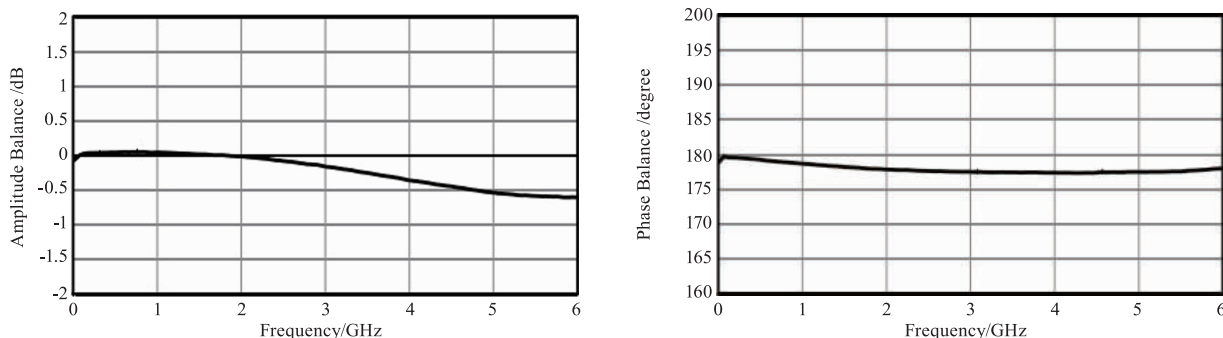


图5 BALH-0006S的性能图(输出端口间的幅值平衡图;输出端口的相位平衡图)

ADC 输出为 1.8V 的 LVDS 信号, LVDS 标准有利于降低高速信号传输中的共模噪声,将 ADC 的输出数据直接输入 FPGA 中进行处理,降低系统复杂度,且有利于信号的完整性。

3.3 控制模块和功率谱模块

FPGA 芯片具有速度快、可靠性高的特点,广泛应用于高速数字电路中。在器件选型时应根据系统主要

功能和所需资源,结合 FPGA 器件的特点选择满足需求的芯片。FPGA 芯片拥有多种资源,如逻辑资源和 I/O 资源、布线资源、DSP 资源、存储器资源、锁相环资源、串行收发器资源、硬核微处理器资源、时钟资源。在资源满足需求的情况下还要考虑器件接口的电气标准、器件速度、器件工作温度、器件封装和价格^[10]。在满足系统要求的前提下,适当提高 FPGA 芯片的选型指标有

助于后续系统算法的改进和功能的提升。

控制模块实现以下三种功能:控制时钟模块产生 5GHz 时钟信号,为高速采样和功率谱分析单元提供控制信号,将功率谱数据打包传输给上位机.该模块选择 Xilinx 的 XC6SLX150T-2FGG900C 芯片^[11]作为控制芯片.

功率谱处理模块将功率谱分析算法转化为硬件电路从而实现对信号的功率谱分析.本系统的功率谱算法采用快速傅里叶变换方法,如式(1)(2)所示.其中 k 表示在频谱图中的第 k 点,该处对应的频率值为 $\Delta f \bullet k$.在功率谱处理模块中包含较多的数学运算,为了方便调整频谱分辨率,提高系统的灵活性,采用 XC7KC410T-2FFG900 芯片^[12].XC7KC410T 包含高性能(HP-high performance) bank 和高范围(HR-high range) bank,其中 bank32、33 和 34 为 HP bank,其输出电压(VCCO)最高只能为 1.8V,而 HR bank 的输入输出电压(VCCO)最高可以达到 3.3V. ADC 的输出数据是 1.8V 的 LVDS 标准信号,FPGA 芯片可以在程序中设置 100 欧终端电阻,将它们直接连接到 FPGA 的 HP bank.

4 系统检测

4.1 检测方法

根据工程实践和文献[13],基本的检测方法如下.

①裸板检测:PCB 信号走线是否与原理图一致,是否存在 PCB 内部线路短路或断路的情况.检测方法为,可以按照信号流从信号的输入端到输出端对裸板逐一引脚、逐一走线进行检测,检测电源与地是否短接、各非地焊盘与地是否短接.

②在第一步无误的情况下,对电路板进行检测,检测内容为是否存在虚焊、漏焊的情况.

③在第二步无误的情况下,用万用表对电路板进行短路检测,确保电源部分无短路情况.

④在第三步无误的情况下,按照先后顺序对各部分进行上电检测,确保各器件的供电电源的正确性和稳定性.

⑤在第四步符合要求的情况下,检查各晶振的输出是否符合要求.

⑥在以上步骤都正常的情况下,通过 JTAG 接口下载已经准备好的简单的程序(如控制流水灯的程序)到 FPGA 中观察控制情况,从而检测 FPGA 的 JTAG 链路是否正常.

⑦在第六步的控制良好的情况下,可以对电路板上电调试.

4.2 检测结果及分析

按照 3.1 节中的硬件检测方法进行检测,电路板无虚焊、漏焊.用万用表检查焊接板是否存在短路情况时,发现有多处出现短路情况,最终查明情况将短路问题解决.在选用元器件时尽量避免使用 0402 封装的电阻、电容、电感等元件.如果必须使用,可以将 0402 封装的两焊盘之间的距离稍微增大一点,这样可以有效减少焊接短路的情况.在使用万用表进行短路情况检查时需注意由于不同万用表通断档的电阻阈值不一样,存在用不同的万用表可能出现不同的通断情况,也有可能出现不同的短路情况.为避免由于阻值小于通断档的电阻阈值而造成短路的错判,在用万用表进行短路检测时最好用欧姆档检测.最终上电后检测各部分电源输出电压在要求范围内.通过下载流水灯程序,主控单元板以及高速采样和功率谱分析单元板能实现基本的工作如图 6 所示,后续将进行各模块的检测和调试.

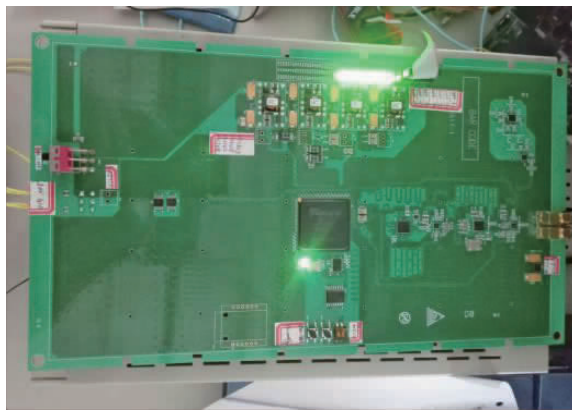
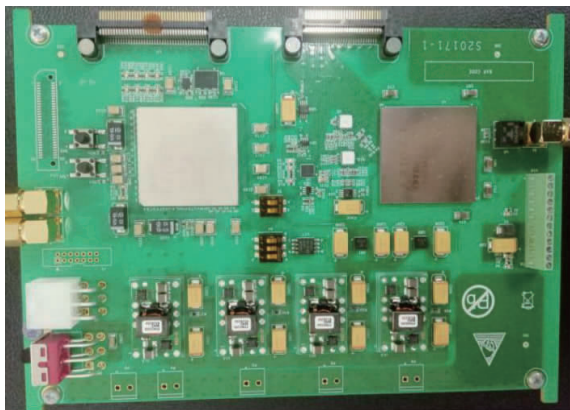


图6 高速采样和功率谱分析单元板(左,尺寸为120mm×310mm)主控单元板(右,尺寸:176mm×310mm,其背面还具有5对高速接口,可用于同时实现对最高20GHz带宽信号的功率谱获取)

4.3 系统初步测试结果

系统检测后,首先对 5GHz 时钟模块进行调试,生成 5GHz 时钟信号,为 ADC 提供采样时钟.5GHz 时钟信号如图 7 所示,所采用的频谱仪是 Agilent Technolo-

gies N9030A,其幅值为 4.42dBm,频谱纯净. ADC 模块的输入为模拟信号发生器 Agilent Technologies E8257D 产生的 10MHz 正弦波. ADC 的输出数据为 DDR 数据,数据码型为格雷码. FPGA 通过 IDELAY 模块和 ISER-

DESE2 模块实现对 ADC 输出信号延时和 1:4 串转并的降速处理,并在 chipScope Pro Analyzer 软件上实时显示各通道的转换结果,如图 8 所示.将各通道的转换结果导出,在 MATLAB 中计算所采集到的信号频率,如式(4)所示. S_{min1} 和 S_{min2} 表示的是两个相邻最小值之间的位置号,也可以用两相邻最大值的位置号表示, $T_{chipscope}$ 表示 chipScope Pro Analyzer 软件的采样周期.这里 S_{min1} 和 S_{min2} 之差为 62, $T_{chipscope}$ 为 1.6ns,故采集到的信号频率为 10MHz,与输入信号相符,表明 5GHz 时钟信号的可用性,也进一步表明控制单元板和高速采样和功率谱分析单元板的系统设计和硬件设计的可用性.

$$f = 1 / ((S_{min1} - S_{min2}) \times T_{chipscope}) \quad (4)$$

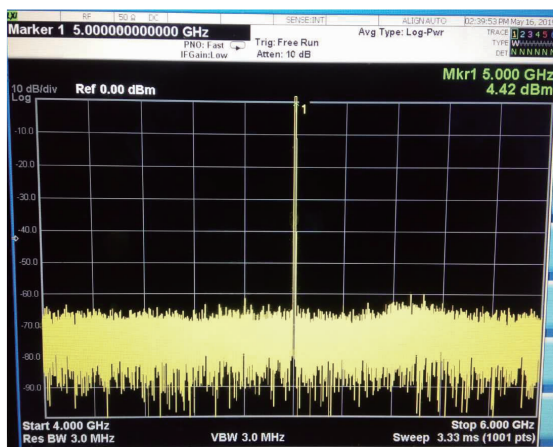


图7 5GHz时钟信号

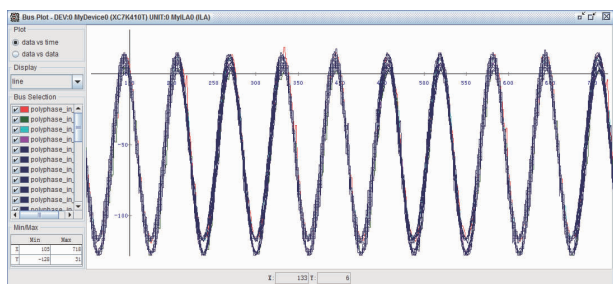


图8 ChipScope中各通道实时波形

对高速 ADC 进行偏置校准、增益校准和相位校准才能减小信号的失真.如图 9 所示是高速 ADC 未进行任何一项校准的输出波形图,图 10 为高速 ADC 进行偏置校准和增益校准后的输出波形图.校正前后的输入信号均为 10MHz 的模拟正弦波.从校正前后的波形图

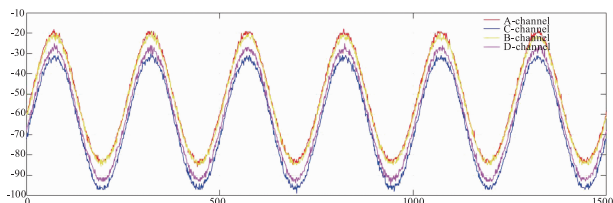


图9 校正之前ADC的4通道输出波形图

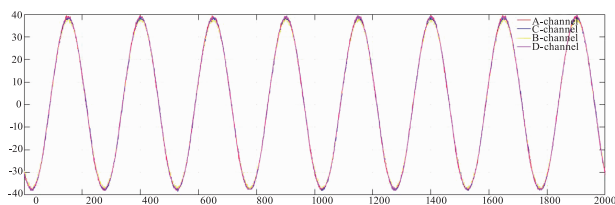


图10 校正之后ADC的4通道输出波形图

可以看出高速 ADC 的校正能有效减小信号的失真.

5 结语

本文从系统结构、系统硬件方面完成了后端数字谱仪系统研制,给出了硬件检测方法和测试结果,实验证实了 5GHz 时钟信号的有效性,实现了对输入信号的 10Gps 采样,8bit 量化,证实了该硬件系统满足设计要求,为高光谱微波辐射计的进一步应用发展打下了基础.

参考文献

- [1] Blackwell W J, Galbraith C, Hancock T, et al. Design and analysis of a hyperspectral microwave receiver subsystem [A]. 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. Munich, GER: IEEE, 2012. 3435 - 3438.
- [2] Blackwell W J, Bickmeier R, et al. Hyperspectral microwave atmospheric sounding[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(1): 128 - 142.
- [3] Deuber B, Kämpfer N, Feist D G. A new 22-GHz radiometer for middle atmospheric water vapor profile measurements [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(5): 974 - 984.
- [4] Straub C, Murk A, Kämpfer N, et al. Development of a 22 GHz correlating radiometer for the observation of stratospheric water vapor [A]. 2008 Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment [C]. Firenze, IT: IEEE, 2008. 1 - 4.
- [5] Xie Yan, Chen Jing-xiong, et al. Development and calibration of a K-band ground-based hyperspectral microwave radiometer for water vapor measurements [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2013, (140): 415 - 438.
- [6] Hilliard L, Racette P, Blackwell W, Galbraith C, Thompson E. Hyperspectral microwave atmospheric sounder (HYMAS) architecture and design accommodations [A]. MT: 2013 IEEE Aerospace Conference [C]. Big Sky, USA: IEEE, 2013. 1 - 11
- [7] 封天. K 波段微波辐射谱仪的设计与实现 [D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2015. FENG Tian. Design and Implement of K-band Microwave Radiometer With A Fast Fourier Transform Spectrum Analysis Backend [D]. Beijing: a Dissertation in Electronics and

- Microwave Engineering of the University of Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)
- [8] Texas Instruments. LMX2592 High Performance Wideband PLLatinum RF Synthesizer with Integrated VCO [J/OL]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmx2592.pdf>, 2017; 1-40.
- [9] Microwave Marki. High Power Surface-mount Balun Balh-0006SMG [J/OL]. <https://www.markimicrowave.com/Assets/datasheets/BALH-0006SMG.pdf?v=072320>, 2015. 1-4.
- [10] 童鹏, 胡以华. FPGA 器件选型研究[J]. 现代电子技术, 2007, (20): 66-68.
TONG Peng, HU Yi-hua. Studying about the selection of FPGA Devieces [J]. Modern Electronics Technique, 2007, (20): 66-68.
- [11] Xilinx. Spartan-6 Family Overview [J/OL]. <https://china.xilinx.com/support.html#documentation>, 2011. 1-11.
- [12] Xilinx. 7 Series FPGAs Data Sheet; Overview [J/OL]. <https://china.xilinx.com/support.html#documentation>, 2016. 1-18.
- [13] 胡东方. 多通道高速信号采集与传输技术的研究与应用[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
HU Dong-fang. Research and Application of Multi-channel High-speed Signal Acquisition and Transmission Technology [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)

作者简介



罗阳锦 女, 1992 年出生, 四川人. 本科就读于兰州理工大学, 于 2015 年获得学士学位, 现阶段为中国科学院国家空间科学中心博士研究生. 主要研究领域为被动微波遥感探测技术与应用. E-mail: luoyangjin123456@163.com



张升伟 男, 1963 年出生, 山东人. 理学硕士, 博士生导师. 2001 年至 2014 年为中国科学院空间科学与技术研究中心研究员, 主持和参加国家重大科研项目十余项. 目前研究领域为被动微波遥感探测机理、技术与应用研究, 先进微波传感器系统设计与研制.