

数字技术在航空伽马能谱仪中的应用

曾国强¹, 葛良全¹, 熊盛青², 倪卫冲³, 赖万昌¹

(1. 成都理工大学核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610051; 2. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 3. 核工业航测遥感中心, 河北 石家庄 050002)

摘要:基于峰值采样保持的模拟能谱仪无法满足大尺寸多晶体高计数率的航空能谱测量。本系统采用了Y/U双通道数控增益放大器实现了谱漂的双16位分辨率调节范围,通过高速ADC与CPLD实现数字化能谱仪,在CPLD内部用VHDL语言编程实现基线恢复与峰高数据采集,保证了能量分辨率。结果表明:计数最大通过率大于100 k/s, 1 024道分辨率¹³⁷Cs峰谱漂±1道,能量起始阈20 keV。实验证明本系统功耗低,性能可靠,体积小,可应用于航空能谱测量的场合。

关键词:航空能谱仪;数字能谱仪;数控增益放大;基线恢复

中图分类号: P631.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2010)02-0209-05

传统模拟能谱仪一直受到多种不利因素的困扰:①模拟滤波成形电路有限的处理能力达不到最佳滤波的要求;②模拟系统在高计数率下能量分辨率显著下降,脉冲通过率;③模拟电路固有的温漂和不易调整等特点,导致系统的稳定性、线性差,以及对不同应用的适应性不高;④在脉冲波形识别、电荷俘获效应校正等更复杂的应用场合,模拟系统无法胜任。在航空伽马能谱测量中为了提高瞬时计数率,通常采用多个大尺寸NaI(Tl)晶体(40 cm×10 cm×10 cm)作为探测器,有时探测器多达几十个,如果采用传统的模拟能谱仪方案则相当于需要设计几十个能谱仪,系统体积庞大,调试复杂,安装生产不便,无法保证所有能谱仪的一致性,其脉冲通过率通常低于50 k/s。为此需要引入数字能谱技术,尽

量减少模拟电路,通过数字滤波,数字脉冲反堆积和数字峰值保持算法取代传统的成形放大器,峰值采样保持器等电路,从而实现高的脉冲计数通过率,低的温度系数和较小的系统体积。

1 总体框图

图1为单晶体数字能谱仪的总体设计框图。光电倍增管输出的电流信号由高速前置放大器变换为电压信号输出到程控增益放大器,再经过抗混叠有源滤波器滤波后送入高速ADC(模拟至数字转换器,AD9224),经过模数转换得到的数据量在复杂可编程逻辑器件CPLD(EPM570T100)内部进行数字滤波去噪,数字脉冲抗堆积和数字峰值保持得到对应脉冲峰值的信息,最后输入到Cortex-M3架构的

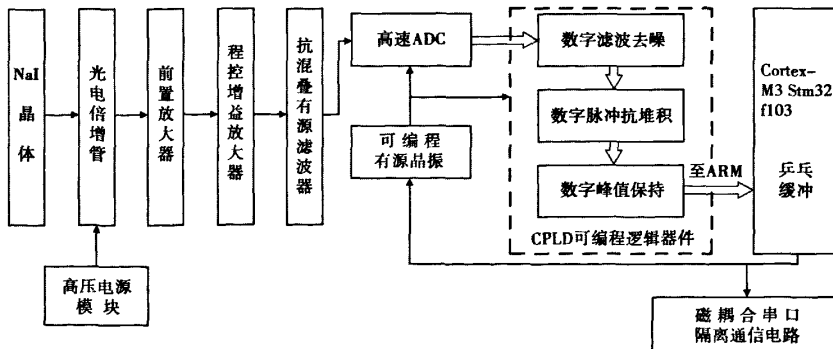


图1 单晶体数字能谱仪的总体设计框图

收稿日期:2009-08-10;修回日期:2009-11-17

基金项目:国家863计划重大项目(2006AA06A207)资助

工业级 ARM 芯片 STM32F103, ARM 芯片内部采用乒乓缓冲机制与快速中断结合, 实现谱线传输与谱线获取的不间断并行工作。磁耦合串口隔离通信电路采用的是 ADM3251E 实现数字能谱仪与外界环境的电气隔离与串口数据通信, 其最高数据传输速率为 460 kbps, 片内自带 DC-DC 隔离电源, 简化了电路的设计。

2 数控增益放大器设计

图 2 所示为采用 AD734 高速四象限模拟乘法器实现的双 16 位分辨率的数控增益放大器^[1-2], 其输出电压表达式为: $U_o = U_y/U_u \times U_i + U_z$, 可以通过输出不同的 U_y 、 U_u 电压值实现放大倍数的调节。当 $U_y > U_u$, 放大倍数大于 1, 当 $U_y < U_u$, 放大倍数

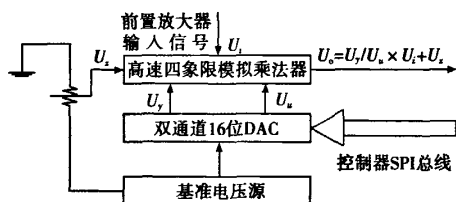


图 2 采用 AD734 高速乘法器构成的数控增益放大器

小于 1。系统中采用的是 DAC8532SPI 串行接口的双通道 16 位 DAC (数字至模拟转换器), 因此 U_y 、 U_u 都具有 16 位调节分辨率, 可满足精细的谱线漂移调节。由于系统采用的是直接耦合方式, 因此前置放大器和模拟乘法器本身会引入少量的直流偏移, 通过调节电压 U_z 来消除前置放大器和模拟乘法器带来的直流漂移。

3 数字能谱仪的设计^[3-4]

传统的模拟能谱仪通常包括: 微分电路、极零零极相消电路、微分成形放大电路、脉冲峰值采样保持电路等。由于所涉及的模拟器件较多, 系统线性度差, 而且随着温度的改变, 整体特性变化较大; 尤其是峰值采样保持电路高速工作情况下, 电容漏电流严重; 同时受限于峰值采样保持电路的跟踪采样速度, 所以通常脉冲最大通过率小于 50 k/s, 并且整体电路体积较大。本系统采用高速 ADC 直接对前置放大器输出的双指数信号进行高速采集, 通过 VHDL 语言编程实现数字滞回比较器、数字基线扣除、数字峰值采样等功能, 从而获得核脉冲的峰值信息 (图 3)。

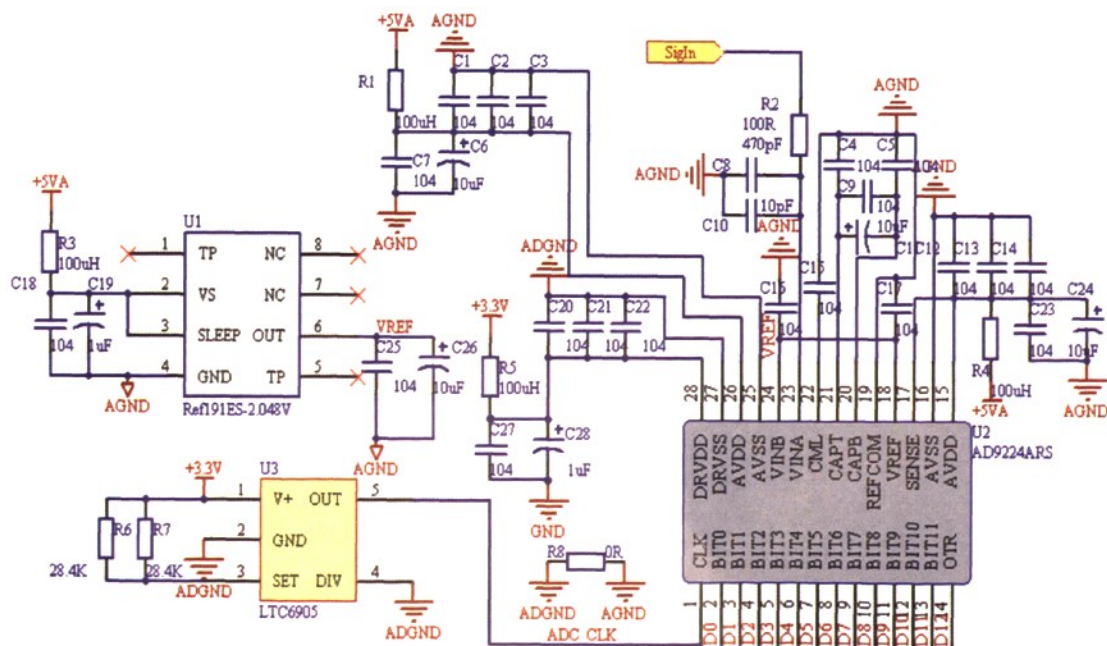


图 3 数字能谱仪模数转换电路

在电路设计中, 高速 ADC 的选择非常重要, 既要足够的能量分辨率, 又要保证其优异的差分非线性、积分非线性和高的转换速率, 还要保证其信号输入电压范围尽量大, 功耗尽量小, 因此笔者采用了

ADI 公司的 AD9224。该芯片最高转换速率为 40 Msps, 分辨率为 12 位, 最大功耗 415 mW, 具有 0~4 V 的输入信号范围, 在同类高速 ADC 中其功耗低, 输入信号范围大, 适合本数字能谱系统使用。

为了保证高速 ADC 的采样精度和分辨率,必须采用抖动极小的时钟。一般的有源晶振输出的时钟信号抖动较大,频率温度特性不好,且容性负载驱动能力不足,往往在接到 ADC 后,时钟信号畸变,抖动变大,从而降低了高速 ADC 的采样分辨率。本系统采用的是 LTC6905 可编程时钟信号芯片,其输出频率范围 17 ~ 170 MHz, CMOS 电平输出可直接驱动 500 Ω 负载, 170 MHz 时,时钟抖动小于 50 ps 通过外接精密低温系数电阻,设定输出时钟的频率 $f_{osc} = (168.5 \text{ MHz} \times 10 \text{ k}\Omega / R_{set} + 1.5 \text{ MHz}) / N$ 。其中, R_{set} 为外接的精密电阻; N 为分频系数,取决于 DIV 引脚的状态,当 DIV 引脚悬空,则 $N = 2$, DIV 引脚接地,则 $N = 4$, DIV 引脚接 VCC, 则 $N = 1$ 。本系统采用的采样频率为 30 MHz, 由于调理后的核脉冲信号上升时间在 1 ~ 1.5 μs 之间,因此在该上升期间,至少可以采样得到 30 多个点,可满足本系统的要求。

本系统中除了 AD9224 以外,还有多路 16 位 DAC, 由于 ADC 和 DAC 是典型的模数混合信号器件,因此为了保证 AD9224 的分辨率,必须合理设计供电电源,接地及元件布局。如图 4 所示,系统分成了三个电源:模拟电源,数字电源和逻辑电源。三种电源都通过 LC 滤波隔离得到,根据越容易受到干扰的电源放在越靠后位置,因此模拟电源连接在数字电源之后,并 LC 滤波隔离。为了保证模拟地平

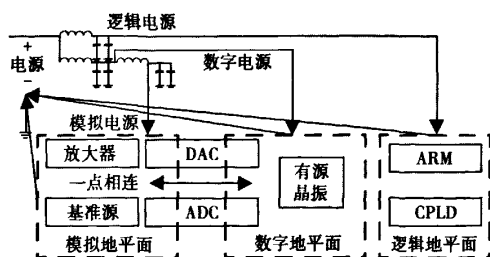


图4 模数混合电源接地设计与元件布局

面垂直立体空间区域内不放置数字芯片或逻辑芯片,同时保证多路 DAC 与 ADC 的芯片的模拟区域和数字区域放置在对应的地平面区域,然后选取模拟地平面与数字地平面的交界处到各 DAC、ADC 距离相同的点,一点连接模拟地与数字地,这样就可以保证模拟地平面与数字地平面的电流不会互相串扰,保证了高速 ADC 与 DAC 的有效分辨率。

根据 FPGA 的时延不固定,功耗大,电路较复杂,占用面积较大等缺点,本系统采用 CPLD,以提高数字滤波、数字滞回比较与峰值采样功能。由于 CPLD 内部单元数量有限,所以不能采用复杂的滤波^[5]算法,如 FIR 滤波。本系统采用的是 8 点滑动平均滤波法,对 ADC 输出的数据滤波,但该方法对异常的尖峰干扰脉冲抑制能力较弱,为此系统对前置放大器输出的信号通过二阶有源抗混叠低通滤波器,可大大抑制尖峰的干扰。由于本系统采用的是大尺寸晶体,因此计数率较高。为了保证有较精确计数率,避免由于叠峰引起的峰高判断误差,就必须进行基线扣除。传统模拟能谱仪采用的是硬件电路来完成该功能,但会引入噪声,导致能量分辨率变差。图 5 中 CPLD 内部的单元电路可实现自动的基线恢复^[6]与峰高采集。图 5 中的滞回比较器可由外部 ARM 控制器任意设定其上限和下限,以适应不同的应用场合,同时也可以抑制本底噪声的影响。当核脉冲信号落入该比较器上下限范围内,滞回比较器输出高电平,则启动谷值判断与峰值判断,且分别输出在比较器有效期间所出现的所有核脉冲的谷值与峰值,经过减法电路后输出峰高数据,在减法及触发电路中,同时判断谷值变化与峰值变化,当谷值发生变化使得触发信号为低,当峰值发生变化使得触发信号为高,当连续出现多个谷值或峰值发生变化时,触发信号不会误触发。经过内部时钟驱动的计数器延迟几个周期后输出到 ARM 芯片的中断信号,在 ARM 的中断函数中读取扣除了基线的峰高

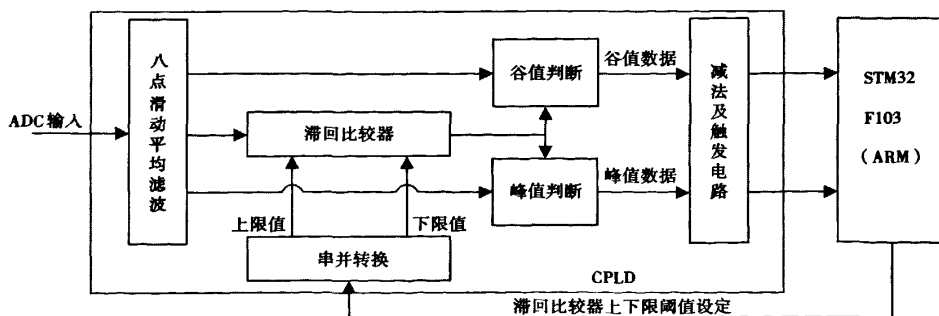


图5 CPLD 内部模块电路

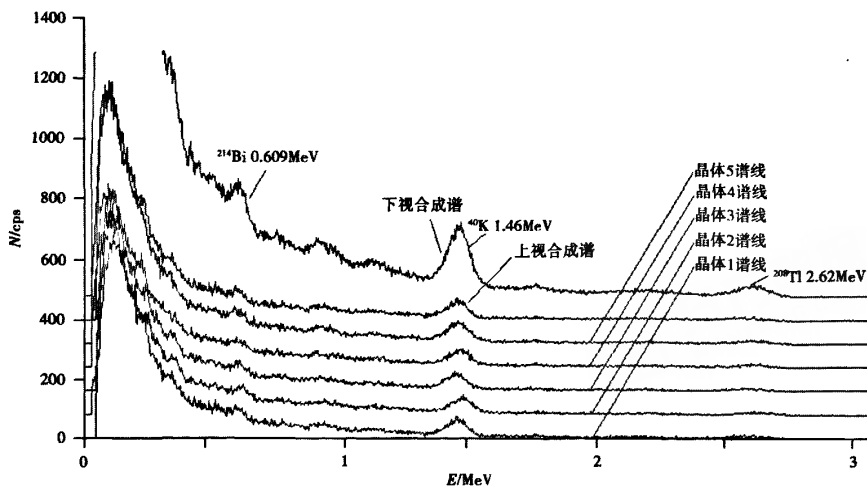


图6 单条上视晶体和4条下视晶体测量20 s得到的天然伽马能谱曲线

数据。当比较器输出低电平时,清空谷值判断,峰值判断输出的数据,同时使触发信号无效。所有CPLD内部单元电路都采用VHDL语言编写,经过QuartusII时序分析允许最高的ADC数据输入的频率可达100 MHz以上。

4 性能指标与测量谱线结果

图6为采用5个独立的数字能谱仪分别对1条上视晶体和4条上视晶体,同时测量20 s得到的原始天然伽马能谱曲线。图7为采用数字能谱仪同时测量 ^{241}Am 和 ^{137}Cs 源所获得的低能伽马能谱曲线。本系统实测的指标为:测量道数256、512、1024、512道分辨率 ^{137}Cs 峰谱漂 ± 0.5 道,1024道分辨率 ^{137}Cs 峰谱漂 ± 1 道,脉冲计数通过率大于100 k/s,当脉冲数小于100 k/s时,死时间可以忽略,能量范围0~3 MeV,能量起始阈值20 keV,单晶体数字能谱功

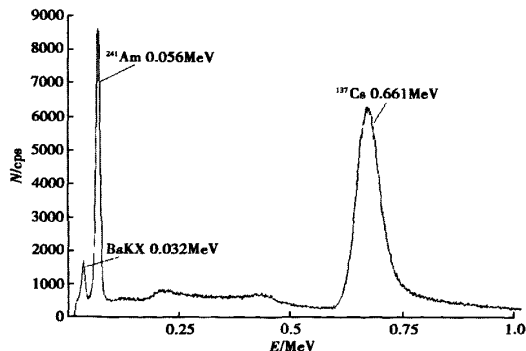


图7 单条晶体测量 ^{241}Am 和 ^{137}Cs 源获得的低能伽马能谱曲线

耗小于2 W,采用美国圣高邦(40 cm×10 cm×10 cm)大尺寸NaI晶体实测能量分辨率优于8.0%。

5 结论

基于高速ADC与CPLD的数字能谱仪,采用了高速数字采集与脉冲峰值判别技术,实现了脉冲通过率大于100 k/s,采用高速模拟乘法器与双16位DAC设计的数控增益放大器实现谱漂的精细调节,该系统可满足航空多晶体伽马能谱勘查系统的应用,而且各方面指标优于目前国内航空能谱勘查系统。

参考文献:

- [1] 赵媛媛,赵书俊,刘洋. 四象限乘法器/除法器AD734在伽马相机中的应用[J]. 现代电子技术, 2005(2).
- [2] 汤瑜瑜,危峻,翁东. 新型可编程自动增益放大器在微弱激光检测系统中的应用[J]. 科学技术与工程, 2005(12).
- [3] Miodrag Boli, Vujo Drndarevi. Digital gamma-ray spectroscopy based on FPGA technology[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2002, 482(3): 761.
- [4] Kihm T, Bobrakov V F. A digital multi-channel spectroscopy system with 100 MHz flash ADC module for the GENIUS-TF and GENIUS projects[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2003, 498(1-3): 334.
- [5] Gaetano Gerardi, Leonardo Abbene. Digital filtering and analysis for a semiconductor X-ray detector data acquisition[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2007, 571(1-2): 373.
- [6] Belli F, Esposito B. A method for digital processing of pile-up events in organic scintillators[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2008, 595(2): 512.

THE APPLICATION OF DIGITAL SPECTROSCOPIC TECHNIQUE TO AIRBORNE GAMMA-RAY INVESTIGATION

ZENG Guo-qiang¹, GE Liang-quan¹, XIONG Sheng-qing², NI Wei-chong³, LAI Wan-chang¹

(1. College of Applied Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610051, China; 2. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China; 3. Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, China)

Abstract: Analog spectroscopy based on peak sampling and holding circuit can't realize the airborne spectral measurement that uses several large size NaI(Tl) crystals. This system makes use of Y/U double channel digital controlled gain amplifier to adjust the spectral drift. The designed digital spectroscopy uses high speed ADC and CPLD to complete baseline restore and peak height acquisition, thus improving the energy resolution. With this method, the maximum pulse through output rate is 100 k/s, the spectral drift is ± 1 channel, and the start energy is less than 20 keV. This system has low power dissipation, small volume and high reliability. It can be used to perform airborne spectra measurement.

Key words: airborne spectroscopic investigation; digital controlled gain amplifier; digital gamma-ray spectroscopy; baseline restore

作者简介:曾国强(1980-),男,福建福鼎人,博士,讲师,主要从事核电子仪器开发的研究。

上接 208 页

Abstract: Theory and practice show that the observation of the transient magnetic field in the TEM has more advantages than that of the induced EMF. With the application and improvement of the high-temperature superconducting technology, the direct observation of transient magnetic field signal has become a reality in the TEM. However, the retrieve interpretation method for transient magnetic field data has become an urgent problem. In this paper, drawing on the interpretation method of the induced EMF, the authors made an overall explanation of the definition of apparent resistivity based on a study of the transient magnetic field and probed into the TEM transient magnetic field for PSEUDO-2D inverse technology. From the theoretical model and the measured data, the authors have verified the practicality of the method, which can provide technical support for the development of the high-temperature superconductor TEM method.

Key words: TEM; high-temperature superconductor; transient magnetic field; PSEUDO-2D inversion

作者简介:张杰(1977-),男,安徽滁州人,工程师,2009年毕业于中国地质大学(北京),硕士,从事电磁法研究工作。