

1024 道航空伽玛能谱仪器设计

孙肖南, 孙陶

(核工业航测遥感中心, 石家庄 050002)

摘要: 随着计算机技术的发展, 航空放射性伽玛能谱测量技术也在不断地发展提高, 航空伽玛射线多道能谱鉴别精度也达到了更高的技术水平, 为航空放射性伽玛能谱找矿和航空放射性环境测量提供了更为丰富的、精准的测量信息; 1024 道航空伽玛能谱仪器设计基于 FPGA 开发技术, 研究利用 FPGA 电路控制和进行伽玛射线数据采集、能量鉴别和脉冲数据处理的分析方法, 设计构建了实现其方法的硬件电路和软件执行程序, 实现了对伽玛能谱射线数据的高速采集、高速处理、实时输出, 并能够实时接收和监测所采集到的放射性伽玛能谱数据信息, 完成了 1024 道伽玛射线能谱仪器的设计制作, 掌握了 1024 道航空伽玛能谱测量仪器的设计制作的核心理念, 对于航空伽玛能谱仪器自主研发的发展有着积极的促进作用。

关键词: 航空物探; 多道能谱分析; 核信号高速采集; FPGA

Design of 1024-channel Gamma Ray Energy Spectrum Analyzer

SUN Xiaonan, SUN Tao

(Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, China)

Abstract: With the development of computer technology, aeronautical radioactivity gamma spectrum measurement technology has constantly developed and improved, and the identification accuracy has also reached a higher level, which provides more abundant and accurate measurement information for aeronautical radioactivity gamma spectrum prospecting and aeronautical radioactivity environment measurement. Design of 1024 Channel Aeronautical Gamma Spectroscopy instrument is based on FPGA technology. It contains the hardware circuit of 1024 channel aeronautical gamma spectrum instrument and the function of multi-channel energy spectrum analysis software embedded in FPGA. It realizes the acquisition of radioactive gamma ray and the high speed analog digital conversion, as well as the storage and graphic display of radioactive 1024 channel full spectrum data, which plays a positive role in promoting the development of independent research and development of aeronautical gamma spectrum instrument.

Keywords: aeronautical geophysical exploration; multi-channel energy spectrum analysis; high-speed nuclear signal acquisition; FPGA

0 引言

在航空放射性地球物理探测技术领域中, 我国航空伽玛射线能谱测量技术经过几十年的技术发展, 从当初的只能进行 4 道 (钾, 铀, 钍, 总道) 模拟能谱窗数据测量, 逐步发展到具有放射性能谱 256 道数字化测量技术的先进水平, 当前更是达到了具有国际先进水平的航空放射性 1024 道能谱分析测量的新高度^[1]。但是, 目前我国航空伽玛能谱 1024 道测量仪器主要来自于进口, 设备的核心部件“多道能谱分析器”更需要从国外引进, 不掌握核心技术。针对这一现状, 本文设计研究了 1024 道航空放射性伽玛能谱测量仪器制作技术, 掌握了航空放射性伽玛能谱仪器 1024 道能谱分析的技术核心。

航空放射性伽玛能谱测量主要是利用晶体探测器接收放射性元素发出的伽玛射线粒子, 对伽玛能谱射线产生的电信号进行提取分析脉冲计数得到测量数据结果。航空放射性 1024 道伽玛能谱仪器设计主要包括: 伽玛射线数据采集、能谱脉冲信号数字化分析处理, 放射性全谱数据图形

显示和数据存储, 具体为: 将自然界中放射性元素发出的 0~3 MeV 能量的伽玛能谱射线^[2]进行数据采集并进行快速数字化分析处理, 伽玛能谱数据分别对应累加记录到 0~1023 道的数据存储位置上, 监测显示的主要放射性元素伽玛射线能谱为: 钾道设置: 457~523 道 (1370~1570 keV), 铀道设置: 553~620 道 (1660~1860 keV), 钍道设置: 803~937 道 (2410~2810 keV)^[3]。

设计内容主要为: 1) 放射性 1024 道能谱仪器的硬件电路设计: 包括光电倍增管高压调整电路、脉冲信号放大电路、高速 A/D 数据采集电路、FPGA 功能模块电路、以及 1024 道能谱数据输出电路; 2) 放射性 1024 道能谱分析功能的 FPGA 硬件程序设计: 具体包括对伽玛射线能谱信号进行高速数据采集, 信号脉冲幅度的快速识别、信号脉冲基线检查、信号脉冲堆积的识别和处理、宇宙射线的识别, 能谱射线脉冲实时分析累加; 3) 放射性 1024 道全谱数据和放射性元素能谱窗数据的实时图形显示和原始数据记录。

收稿日期: 2020-11-14; 修回日期: 2021-02-10。

作者简介: 孙肖南(1962-), 男, 河北巨鹿县人, 高级工程师, 主要从事航空物探设备的研究管理维护工作方向的研究。

引用格式: 孙肖南, 孙陶. 1024 道航空伽玛能谱仪器设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(12): 252-256.

1 系统设计

1.1 方案设计

自然界中天然放射性物质的原子核放射出的伽玛射线能量都在 3 MeV 以下, 超过 3 MeV 能量的伽玛射线都为来自外太空的高能粒子。因此 1024 道能谱数据对应的伽玛射线能量为 0~3.07 MeV, 3KeV/道, 超过 3.07 MeV 能量的伽玛射线粒子计为宇宙射线。设计内容主要为: 伽玛能谱射线采集, 光电信号转换, 电脉冲信号放大, 模拟数字转换, 能谱脉冲数据分析处理, 全谱数据串口传输, 放射性能谱 1024 道全谱数据实时记录和图形窗口显示。

放射性 1024 道伽玛能谱仪器设计主要包括: 1) NaI (Tl) 晶体和光电倍增管电路; 2) 脉冲信号放大电路; 3) 高速 A/D 数字采集电路; 4) FPGA 硬件电路和实现 FPGA 对脉冲信号分析处理的硬件程序; 5) 能谱分析器输出的 1024 道全谱数据实时观测软件。电路结构设计见图 1。

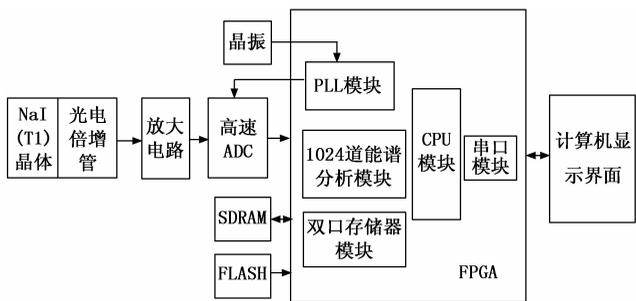


图 1 电路结构设计

1.2 硬件设计及原理

1.2.1 能谱探测器

伽玛能谱探测器采用 16 英寸的 NaI (Tl) 晶体和光电倍增管构成的闪烁体探测器, 光电倍增管高压供电选用最大为 1400 V 的可调整高压电源模块。

伽玛射线照射进 NaI (Tl) 晶体, 在晶体中产生大量激发电子, 能发出荧光的激发电子产生的光子打到光电倍增管阴极产生光电子, 经多次倍增放大, 在阳极产生电荷电流信号脉冲, 其电荷放大关系可表示为: $A = (\delta$ 为光电倍增管打拿极倍增系数, n 为打拿级个数), 这些电荷经阳极电容收集产生信号脉冲, 脉冲信号幅度与入射的 γ 射线能量有线性关系。光电倍增管阳极输出信号可由下列公式表示^[4]:

$$u = -U_0 \frac{\tau_a}{\tau_{fl} - \tau_a} (e^{-\frac{t}{\tau_{fl}}} - e^{-\frac{t}{\tau_a}})$$

τ_{fl} 为 NaI (Tl) 晶体发光时间常数, 约为 0.25 μ s; τ_a 为充电时间常数; U_0 为电荷完全被收集后最大电压幅度。

1.2.2 脉冲信号放大电路与 A/D 采集电路设计

A/D 数据采集选用 AD9226 芯片, 其特性为 12 位高速 A/D 转换、并行输出, 最高转换速率可达到 65 MSPS, 本设计选用 50 MHz 采样频率、为了能够能谱数据采样和数据读取的时钟同步, A/D 转换器

的时钟由 FPGA 锁相环模块提供, 采样周期为 20 ns, AD9226 芯片 VREF 设为 2 V, 对应的模拟输入脉冲信号范围 1~3 V 及 2 V_{p-p} 值。

脉冲信号放大电路将光电倍增管阳极输出的电流脉冲信号, 放大转换为符合 AD9226 芯片输入特性的电压脉冲信号; 设计要求为: 将 0~3.07 MeV 能量的伽玛射线在光电倍增管阳极产生的输出脉冲信号, 放大为 1~3 V 的电压脉冲信号。放大电路设计选用高频运算放大器 AD8065 芯片, 放大电路供电设计采用低纹波系数、线性、+5 V 单电源供电。

放大电路设计如图 2 所示。

放大电路中 AD8065 输出 u_1 点信号电压幅度可由下列公式表示:

$$\Delta v \frac{Q}{C_1}; Q = E_\gamma * N_{\text{phot}} * \epsilon G_{\text{PMT}}$$

E_γ 为 γ 射线的能量 (MeV); N_{phot} 为 γ 射线进入闪烁体中产生的光子数 (MeV)。 ϵ 为光电倍增管阴极收集光子的效率; G_{PMT} 为光电倍增管增益。

1.2.3 FPGA 硬件电路和输出电路设计

FPGA 选用 ALTERA 公司的 Cyclone 系列 EP4CE15F23 芯片, 选用的外部晶振为 50 MHz, 晶振频率信号通过 PLL 模块电路为各功能部件提供稳定的时钟信号; AD9226 芯片并口输出的 12 位数字输出引脚与 FPGA 接口引脚相连, AD9226 芯片需要的 50 M 时钟频率由 FPGA 提供。数据输出芯片选用 USB 转 UART 芯片 CP2102, FPGA 分析处理的 1 024 道全谱数据通过 CP2102 实时发送到外部数据采集计算机, 在计算机界面显示中实时显示和记录所采集到的全谱数据。

1.2.4 宇宙伽玛射线鉴别方法设计

一些型号的航空伽玛能谱仪, 在测量到伽玛射线能量比较高的放射性元素异常点时, 例如: 放射性元素钍异常区域, 伴随着能量窗计数数据的增加, 宇宙射线道也会发生不同程度的计数增加现象, 使宇宙射线道计数发生较大的偏差。

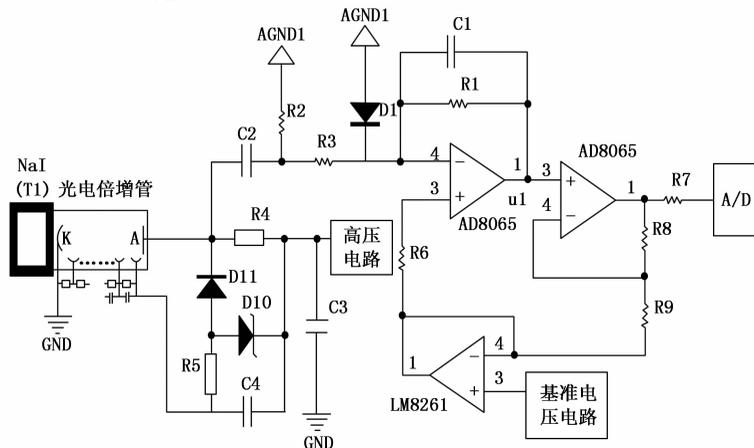


图 2 信号放大电路

宇宙伽玛射线为地球外太空中进入地球的高能伽玛射线粒子,其能量超过 3 MeV^[2]。本设计中 A/D 转换器输入电压范围为 1~3 V,其对应的所接收的 γ 射线能量为 0~3.07 MeV 所产生的电脉冲幅度信号。大于 3 MeV 能量的伽玛射线产生的脉冲信号在 A/D 转换器中会产生溢出。A/D 转换器引起溢出的信号脉冲,既有宇宙 γ 射线产生的脉冲信号,又有非宇宙伽玛射线在同一时刻,发生两个或两个以上粒子在很短时间内、几乎同时进入探测器产生信号叠加而引起的较大的超过 2V_{p-p} 的信号脉冲,这些信号脉冲也会发生 A/D 溢出;所以不能将 A/D 转换器溢出的脉冲信号判断为大于 3 MeV 能量的宇宙射线的计数,否则这可能会引起伽玛射线能谱探测器在伽玛射线能量比较高的天然放射性元素异常点上测量时,宇宙射线道计数明显偏高,宇宙射线记录偏差比较大的现象。

Exploranium 公司研制的 GR-820 航空伽玛射线能谱仪器为了减小宇宙射线的计数偏差,将宇宙射线计数阈值设置为 4 MeV^[5],超过 4 MeV 能量伽玛射线对应产生的电脉冲信号计为宇宙射线。

本设计宇宙射线提取采用监测脉冲幅度、宽度的方法。放大电路输出的脉冲信号:满量程时 2V_{p-p} 对应接收的伽玛射线量子能量为 3.07 MeV;通过编制软件测量脉冲信号超过 2V_{p-p} 时信号的脉冲溢出时间,发现宇宙射线产生的电信号脉冲溢出时间在本电路的 RC 放电时间常数的设计中大多在 3.5~4 μ s 范围内。而大多数由电脉冲信号叠加而产生的超过 2V_{p-p} 信号脉冲溢出时间都在 2 μ s 以下。本设计采用的方法:检测伽玛射线对应的电脉冲信号,当电脉冲信号幅度大于 2V_{p-p} 值时,开始检测脉冲信号的溢出时间,当溢出时间超过 1.8 μ s 时记录为宇宙射线计数。这种方法极大的降低了能量比较高的放射性元素发出伽玛射线进入宇宙射线道计数的概率。

1.3 FPGA 硬件程序设计

FPGA 硬件程序主要为在 FPGA 中实现 1024 道能谱分析功能的程序模块,FPGA 硬件程序设计结构如图 3 所示。

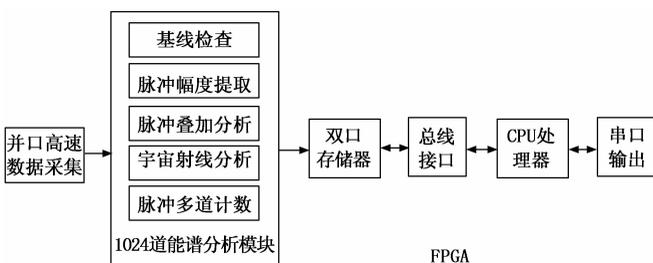


图 3 FPGA 设计图

FPGA 程序功能设计:工程中分别建立 PLL 锁相环模块、双口存储器模块:建立 2 个 16 位数据宽度、1024 个存储单元的双口存储器、CPU 软核模块、UART 串口等模块;

FPGA 程序设计采用 Verilog HDL 编程语言,1024 道 γ 射线能谱分析硬件程序设计主要包括:50 MHz/秒高速的

接收 ADC 电路采集数据,设计编写信号并行分析处理模块,采用寄存器数组对数据进行跟踪记录,快速滤波、信号起点基线判断、采用脉冲形状分析方法^[6-7],提取脉冲信号幅度、脉冲堆积识别,依据脉冲的重叠大小,采取舍弃或修正的处理方法处理脉冲堆积数据,对宇宙 γ 射线的判断鉴别处理;采集到的能谱数据实时的通过双口存储器 A 口记录到 1024 道存储器中,并在存储器中进行全谱数据计数累加。

能谱分析 1024 道数据传输采用嵌入式 CPU 控制方式,将上述多道能谱分析功能模块程序设计制作成为基于 Avalon 总线接口模块,作为 CPU 软核处理器的一个外设,制作的多道能谱分析模块通过 Avalon 从总线接口与 CPU 处理器连接在一起,CPU 处理器通过双口存储器 B 口读取采集到的 1024 道全谱累加数据,两个双口存储器采用乒乓工作方式轮流的进行全谱数据记录和全谱数据读取,即多道能谱分析模块向一个双口存储器中记录 1024 道能谱数据时,CPU 从另一个双口存储器读取 1024 道全谱数据,两个双口存储器的操作转换由自制的多道能谱分析模块控制^[6]。CPU 实时的将读取的 1024 道伽玛射线能谱数据通过 UART 转 USB 外设芯片 CP2102 传输到外部计算机显示界面中,并能够从串口接收到外部操作指令,改变多道分析器的工作状态。

1.4 1024 道全谱数据显示界面设计

1024 道航空伽玛能谱仪器设计采用:16 位/道数据记录,1024 道能谱数据(0~1023 道),宇宙射线记录到 1023 道,采用二进制数据传输格式和 USB 转串口传输方式:波特率设为 115 200。

能谱显示界面,采用 C++ 编译系统,设计编写 1024 道 γ 能谱数据实时监测显示图形软件,设计上采用多窗体结构,每个窗体进入采用动态分配方式,进入时自动分配内存空间,退出时及时释放所占用的内存资源,以减少内存的占用。显示界面包括 1024 道全谱图形实时显示窗口,放射性能谱总道、钾道、铀道、钍道各图形实时显示窗口,以及数字实时显示窗口^[8-10]。点击数据采集运行命令,自动建立以当前时间命名的测量数据文件夹,并以当前时间建立数据记录文件,接收的 1024 道放射性全谱数据实时地以二进制记录格式记录到数据文件中,同时把接收时间也自动记录到数据文件中。显示界面软件结构如图 4 所示。

2 系统测试

2.1 峰位调整

在 NaI(Tl) 晶体附近,通过放置放射性元素 Cs 源、Th 源,观察所接收的 1024 道伽玛射线全谱图形数据,检查各元素能谱特征峰所在的显示位置,调整放大器静态工作点和放大器放大倍数,使放射性元素铯产生的伽玛射线能谱峰位(0.662 MeV)对应的显示记录到 220 道数据存储位置上,放射性元素钍产生的伽玛射线能谱峰位(2.61 MeV)显示在 872 道数据记录位置上^[2,11]。

