

GPS 时钟同步的分布式地球物理探测系统设计 *

高力为 宋克柱

(中国科学技术大学 核探测与核电子学国家重点实验室 合肥 230026)

摘 要: 提出一种基于全球定位系统(GPS)同步时钟信号的野外无人地球物理探测采集分布式系统,使用 Cyclone V EP5CEBA4F17C 和 ARM Exynos 4412 等为硬件的节点探测仪器设计方案。该节点设备利用现场可编程门阵列(FPGA)作为主控器,FPGA 将接收来自 ADS1282 采集到的数据与本地 GPS 芯片采集到的时间戳进行数据合并,ARM 嵌入式系统对合并后数据进行实时分析与存储,在 PC 端对各节点设备数据进行汇总并根据时间戳对齐,最终得到同步后的分布式地球物理 3D 图像数据。用该设备进行测试,结果表明该测试系统初步实现了远距离、大范围地球物理同步节点的数据采集。

关键词: 地球物理探测;同步采集系统;现场可编程门阵列;ARM

中图分类号: TP274 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Design of geophysical detection node distributed system based on GPS clock synchronization

Gao Liwei Song Kezhu

(State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, USTC, Hefei 230026, China)

Abstract: This paper presents a global positioning system (GPS) unmanned geophysical acquisition distributed systems. Use Cyclone V EP5CEBA4F17C and ARM Exynos 4412 as the hardware node detection equipment design. The device utilizes field gate array (FPGA) as a master. FPGA receives data from the ADS1282 merge data collected with the local GPS chip collected timestamps. ARM embedded system for real-time analysis combined data and storage. On PC terminal, aggregating data for each device and aligned according to the time stamp. Finally get synchronized distributed geophysical data of 3D image. Testing with the device showed that the system initially realized the long-distance, large-scale geophysical data acquisition synchronization.

Keywords: Geophysical detection; Synchronous acquisition system; FPGA; ARM

1 引 言

地球物理设备是地球物理科学研究中至关重要的成分,地球物理科学事业的发展和地球物理探测设备的研究对国民经济发展中有着重要的推动作用,并一定程度上保障人民生命财产和祖国建设以及国防建设事业中做出了不可磨灭的重大贡献,通过科学技术把自然资源造福人类^[1]。

当今地球物理探测的难度与复杂性越来越大,对探测设备的要求也越来越高,探测地表以下及至地壳岩以上的地质构造特征和演变过程需要更多的设备协同工作以完成更大、更广范围的地球物理信息收集。

当前地球物理设备一般为独立的设备或者短距离的节点分布式探测设备。独立设备由于探测范围有限无法对大

区域地形进行勘探,而短距离的节点式设备中各个节点都是通过电缆建立通讯连接,使用电缆连接的探测系统已经拥有成熟的时钟同步系统,但在大区域的探测时就会出现受电缆长度的限制,电缆过长也会对野外探测消耗大量的人力物力,以及电缆长距离之间会出现时钟的同步偏差问题和电源供电损耗问题。近年来,全球定位系统(GPS)时钟同步分布式数据采集技术开始兴起,并迅速的应用到各个领域,对与地形复杂、不宜人类活动的区域进行勘探时,使用 GPS 时钟同步分布式采集网络来收集数据可以满足长期不间断的数据采集以及对多个地点同步数据采集,如对人造地震波的采集,需要持续的观测各个地点地层中地震波的数据,根据每个地点的同步数据分析本区域 3D 地层结构成像,从而有利于研究研究石油、矿藏的分布^[2]。

收稿日期:2016-01

* 基金项目:国家自然科学基金(41274184)资助项目

本设计为解决当前设备出现的问题结合 GPS 时钟同步技术,摆脱电缆的限制为每个节点设备配有单独的电池供电,同时在采集数据后插入 GPS 精准授时的时间戳存储在设备内的存储器中,存储器可以持续的数据采集,实现了无人值守自动运行的目标,提高了探测设备野外工作的便携性^[3]。

2 分布式节点系统简介

系统包括多个节点设备站。所有站硬件结构相同,分布式地球物理探测节点系统的架构如图 1 所示,系统由多个节点设备站组成测试网络,每个结点设备在不同的地点进行采集任务,节点设备在完成一次长时间的采集以后都

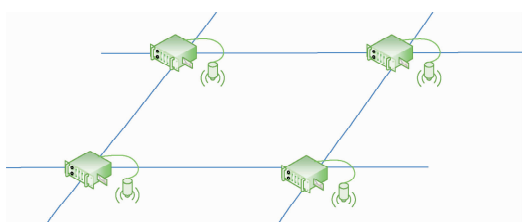


图 1 分布式地球物理探测节点系统架构

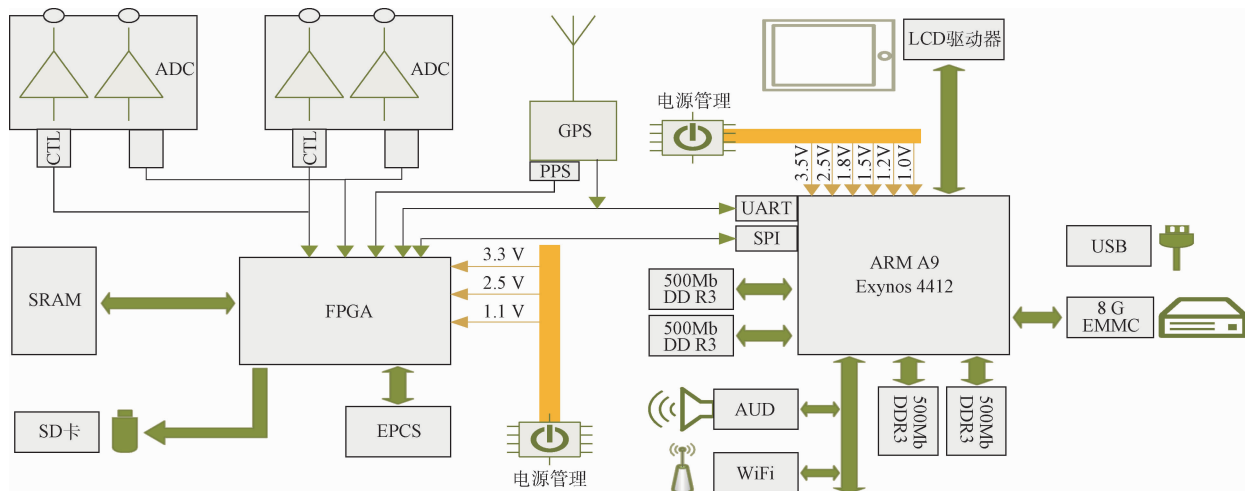


图 2 节点站硬件架构

根据系统低功耗和编解码等功能,使用 FPGA 作为主控芯片。FPGA 打破了顺序执行的模式,每个时钟周期可以内完成更多的处理任务,同时拥有丰富的可编程 IO 管脚,本系统选用 Cyclone V 系列的 FPGA,此系列功耗低,逻辑资源丰富,满足系统对逻辑的资源需求。FPGA 的内部 RAM 添加一片 SRAM 扩展 FPGA 的 RAM 容量用以满足大数据量临时存储,容量为 $512\text{ k} \times 16$ 的 8 MB 异步 SRAM 为 FPGA 提供高性能的外围存储 RAM。搭载操作系统 CPU 芯片为三星电子生产的一款 32 位 RISC 指令集主频为 1.6 GHz 的四核处理器,具有低功耗性能优化 ARM Cortex-A9 架构的移动端处理器,拥有 32 nm

会保存一个原始的数据文件,而每一个数据文件都是独立探测的。在完成采集任务后把每个设备的原始数据文件筛选出有效的波形数据文件,然后通过合并相同 GPS 的时间信息的有效波形文件,组成一个完整的数据矩阵。通过数据矩阵即可分析出所采集地点的相关地球物理探测信息^[4]。

3 分布式节点系统硬件组成

各个节点站的硬件完全相同,节点站硬件主要由 ADC 数据接收模块、电源和逻辑配置模块、数据外传模块、数据打包处理模块以及采集数据的处理与分析模块。

节点站由 12 V 的蓄电池供电,以现场可编程门阵列(FPGA)和 ARM 分别作数据采集及数据打包部分和采集数据的处理与分析保存部分的核心,FPGA 外设添加一片 SARM 作为 FPGA 的扩展 RAM 使用,ARM 外设配合 4 片 DDR3 内存颗粒保证数据的快速的吞吐能力,数据最终存储在一片 eMMC(embedded multi media card)的存储器或者 SD 卡中,保证了节点站可以满足长时间大量数据的存储要求^[5]。节点站的总体框架如图 2 所示。

HKMG(高 K 金属栅极技术)制程,采用了 64 bit/126 bit 内部总线及针对不同任务下强大的硬件加速器,强大的处理性能满足了对大数据的实时处理以及存储功能。

由于系统的采集数据在 GByte 量级,选用四片 256 MByte 的 DDR3 为 ARM 提供充足的缓存空间,DDR3 芯片采用了 8 bit 预取设计,工作电压为 1.5 V,在功耗和散热上比 DDR2 更加优化,工作频率更高,拥有先进的地址命令与控制总线拓扑结构,在传输速率上有更高的数据传输速度。嵌入式 ARM 操作系统需要外部的 FLASH 提供程序和系统文件的存储空间,eMMC 是一种新型的嵌入式存储解决方案,拥有先进的存储管理模块与集成更大

的存储密度,根据数据的采集时间以及数据量的需求选择 8 GB 的存储空间即可满足系统的数据存储。ADC 数据采集部分根据地球物理所采集的信号频率、信号的带宽、信号的信噪比及谐波失真等参数的范围选取 ADS1282 这一款专用地震探测使用的高性能、高精度 delta-sigma 型 ADC 芯片,采样的输入信号电压为±2.5 V,输出信号与控制信号通过 SPI 接口与 FPGA 连接^[6]。

4 分布式节点系统硬件逻辑及软件设计

本系统的逻辑模块主要负责 ADC 的数据采集、GPS

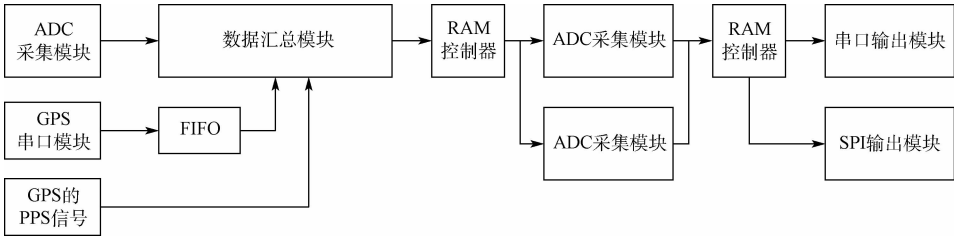


图 3 系统数据传输流程

本系统的 Linux 嵌入式系统的程序设计流程如图 4 所示,ARM 处理器通过上文 FPGA 发送的数据流进行数据帧解析并判断为哪一种数据帧,经过处理之后存储为文本格式保存。在保存之后需要对其进行有效波形信号的筛选,当中筛选出的所有有效波形段重新组成新的文件。

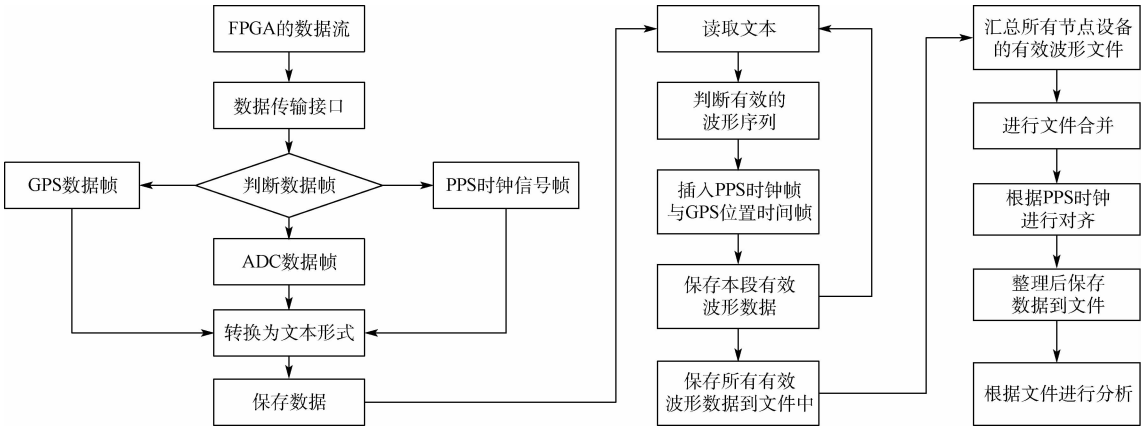


图 4 数据处理程序处理总体流程

4.1 FPGA 逻辑设计

数据汇总及封包模块对 ADC 的数据采集模块与 GPS 的数据采集模块采集的数据进行统一格式的数据帧宽展,对三种不同的数据帧赋予不同的数据帧头并打包成数据包发送后级处理模块^[7]。数据汇总打包模块通过一个状态寄存器查看上一次 ADC 数据采集间隔内 GPS 的数据帧是否发送完毕,如 FIFO 中已经接收一帧完整的 GPS 数据帧或 PPS 脉冲信号,则加装协议帧头并附着在 ADC 数据帧后。为节省 ARM 操作系统的中断处理资

位置时间信息的采集与 GPS 的 PPS 授时信号采集以及相关的数据处理。逻辑流程如下:FPGA 控制 ADC 进行数据采集与传输,同时 FPGA 通过串口模块采集 GPS 的数据帧,数据帧缓存在 FIFO 中,当一帧数据采集完毕之后整体发送给后级处理,GPS 的授时脉冲信号 PPS 每 1 s 产生一个脉冲信号,数据汇总模块对 3 种信号的采集并赋予每一种信号特定的数据帧以标识当中不同的信号类型,最后把 3 种信号加装协议头并合并后乒乓发送给两个 RAM 中,最后保证数据不间断、集中发送给 ARM 接口,逻辑流程如图 3 所示。

在所有的设备采集完成之后,需要对所有设备的有效波形文件进行组合,组合合并时以 PPS 的信号为时间基准点,根据 GPS 的 UTC 时间把每组有效波形数据段进行对齐处理并合并为一个拥有所有节点的同步采集数据文件。

源,设计使用双 RAM 乒乓缓存采集到的数据,乒乓缓冲结构相当于一个双口的 RAM。从上级模块打包后的输入数据不断的进入 RAM1,当 RAM1 写满时,立即切换到 RAM2 并且地址从 0 开始,RAM1 读使能在输出控制器的控制下数据持续输出直到数据读完,RAM1 与 RAM2 交替读写,达到流水线式对数据的持续读写,如图 5 所示。并且对一次性输出一整块的数据给嵌入式操作系统进行处理,节省系统的中断次数,减少了系统的处理资源^[8]。

经多次采集数据,根据上文的合并算法把两个设备的采集数据对齐合并后,在 MATLAB 下进行分析的,图 10 所示为两个设备采集到的模拟信号波形图,每一个设备采集数据中还包含有 GPS 的位置地理信息、GPS 精准授时信息,合并对齐处理时通过寻找各设备数据中相同 GPS 的 UTC 时间,根据 PPS 授时脉冲信号的位置进行一次对齐校准。图 10(b)为合并对齐之后的放大的一段数据,可以看到在根据 PPS(竖线)信号的位置校准后两个设备所采集的同一模拟信号波形已经对齐,图中竖线是 PPS 信号基准线,两个尖峰脉冲表示在各设备在此位置时间收到 GPS 位置信息^[10]。

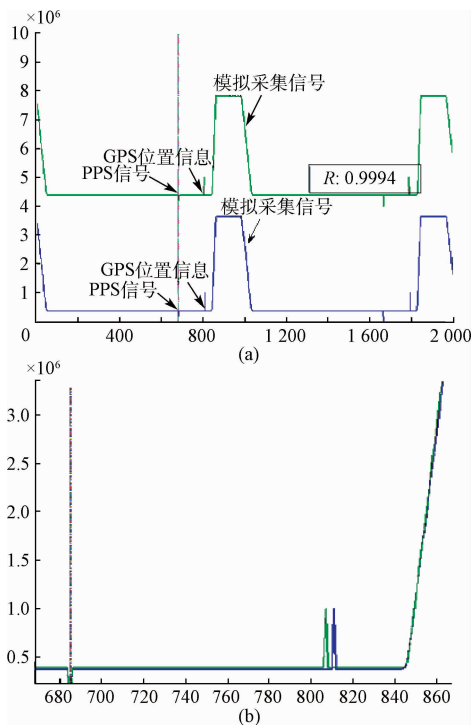


图 10 对齐处理后采集波形对比

在对齐处理后需要测试系统的同步性的性能分析,测试方法采用统计学中的相关系数进行评判,相关系数是用来度量两个变量 X 与 Y 之间线性相关程度的指标,其值在 $-1 \sim 1$, -1 表示完全负相关, 1 表示完全正相关, 0 表示不相关,因此相关系数数值的绝对值越接近 1 表示相关程度越高。两个变量之间的相关系数定义为两个变量之间的协方差和标准差的比值:

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n (X_i Y_i) - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n X_i^2 - (\sum_{i=1}^n X_i)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n Y_i^2 - (\sum_{i=1}^n Y_i)^2}} \quad (1)$$

根据式(1)把截取到的两组波形数据以 X_i 、 Y_i 代入公式,经过计算后得到 $R=0.9994$ 即相关性非常的高,表明在对齐处理后的两组采集数据相似度非常的高,两组的波

形在形状上基本重合,可以说明两者的数据达到了很高的同步性。

6 结 论

在分布式地球物理探测系统的设计中,采用了 GPS 的授时信号来同步各节点的数据采集,利用了 FPGA 内部丰富的逻辑资源及存储资源实现了数据的采集与处理,同时利用 ARM 嵌入式系统对数据的实时处理、对齐合并及保存传输,在大范围的地球物理探测区域探测中,摆脱了传输电缆长度的限制、不能实时处理和保存数据、时钟同步难度大的问题。在对系统的测试中证实了本设计对数据的采集与保存是稳定可靠的,在地球物理探测的各节点间的数据采集也达到了很好的同步性,基本满足在野外环境中进行地球物理探测的数据采集与保存,实现执行长时间无人智能的数据采集,同时本设计在无人地球物理探测领域有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 滕吉文. 中国地球物理仪器和实验设备研究与研制的发展与导向[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(2): 276-281.
- [2] 张嗣锋. 陆上石油地震勘探传感器的研究[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2010.
- [3] 张铭存. 地震检波器测试仪电路设计[D]. 西安: 西安石油大学, 2014.
- [4] 冯胜民, 陈娟花, 曹占山, 等. 基于 FPGA 和 TDC-GP2 的钟差测量系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(1): 63-68.
- [5] 袁雪, 张志文, 司庆丹. 基于 ARM 的智能数据采集系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(11): 66-71.
- [6] 王怀秀, 朱国维, 王栋. ADS1282 及其在单通道地震数据采集单元中的应用[J]. 电子设计工程, 2010: 176-179.
- [7] 张松, 李筠. FPGA 的模块化设计方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(5): 560-565.
- [8] 马灵, 杨俊峰, 宋克柱, 等. 地震数据采集中基于 FPGA 的多 DDR SDRAM 控制器设计[J]. 中国科学技术大学学报, 2010, 40(9): 62-68.
- [9] 江威. 具有高精度 GPS 授时的数据采集系统的设计和实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [10] 魏丰, 朱广伟, 王瑞清, 等. 一种 GPS 校准的数字式高精度守时钟[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(4): 920-926.

作者简介

高力为, 1989 年出生, 硕士研究生, 主要从事信号采集与处理研究。

E-mail: zkdglw@mail.ustc.edu.cn

宋克柱, 1966 年出生, 教授, 主要从事信号采集与处理研究。

E-mail: skz@ustc.edu.cn