超长周期大地电磁数据采集系统的设计与实现 *

屈栓柱[2], 邓 明[1,2], 陈 凯[2], 金 胜[1,2], 闫晋锋[2]
(1.教育部地下信息探测技术与仪器重点实验室, 北京 100083;
2.中国地质大学 地球物理与信息技术学院, 北京 100083)

摘要: 超长周期大地电磁探测是研究大陆岩石圈导电性结构的有效方法之一。针对超长周期宽频带大地电磁数据的特点和采集技术要求, 首次使用 CIRRUS LOGIC 公司生产的 CS5372 和 CS5376A 模数转换及数字滤波套片, 建立了低功耗、低采样率、多通道的长周期智能化数据采集系统。并面向系统开发过程, 提出该套片与 FPGA 芯片 EP1K30QC208-3 组合使用中的软硬件设计。

关键词: 大陆岩石圈; 导电性; 超长周期大地电磁; 智能化; FPGA
中图分类号: TP274+.2 **文献标识码**: B **文章编号**: 1001-1390(2007)05-0041-03

The A/D transform technology of super long period Magnetotelluric data acquisition system

QU Shuan-zhu[2], DENG Ming[1,2], CHEN Kai[2], JIN Sheng[1,2], YAN Jin-feng[2]
(1.Geo-detection Laboratory Ministry of Education, Beijing 100083, China;
2.School of Geophysics and Information Technology China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Super long period magnetotelluric detection is an effective method of studying electric conductivity of continental lithosphere. According to the characteristics and acquisition technical requirement of super long period wide band Magnetotelluric data, CS5372 and CS5376A were used in low power consumption low sample rate and multi-channel long Period Intelligence Magnetotelluric data acquisition system. Hardware and software design using AD and FPGA (EP1K30QC208-3) chip together is put forward.

Key words: continental lithosphere; electric conductivity; super long period magnetotelluric; intelligence; FPGA

0 引 言

大地电磁场携带着地球内部的结构、构造、温度、压力以及物质成分的物理状态等信息, 为人们研究板块运动的规律、追溯地球的演化历史提供了科学依据。超长周期大地电磁探测[1]是研究大陆岩石圈[2]导电性结构的有效方法之一。

上世纪九十年代中期, 加拿大凤凰公司(Phenix)与美国华盛顿大学和加拿大国家地质调查局合作, 推出了长周期智能化大地电磁系统(Long Period Intelligent Magnetotelluric System, LIMS)。该系统的核心技术之一是超低频三分量磁场探头, 其测量灵敏度为 0.1mV/nT, 稳定度为 1nT/月, 测量频带宽度为 10^{-1}~3×10^{-5}Hz, 可探测百余公里深部的地电信息。该技术的应用使人们从电性角度认识地球内部的构造形态, 达到了解地下不同深度地质情况的目的。从 1995 年至今, 中国地质大学和美、加科学家一起, 使用 LIMS 系统与中高频的 MT 观测系统(V-5、MT-24)相配合, 对青藏高原缝合带及壳幔结构进行了大量的探测研究, 其成果已数次发表在《cience》杂志上[3-6], 引起了世界范围的瞩目。

该技术应用前景广泛, 包括: 可用于地下更深层找矿、找水、找油、海底找矿、监测海底潜艇等, 对国民经济和国防都有重要的推动作用。目前, 国内还没有

* 国家自然科学基金资助项目(40434010)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

超宽频带的大地电磁仪器,其原因有四方面:一是若把通常的宽频和超低频的采集电路同制于一个箱体内,线路元件繁多,体积庞大,价格昂贵,实用性不佳;二是绝大部分地区大地电磁测量的工作频率用不到超低频;三是超低频测量时间是宽频测量时间的几十倍。两种性能的仪器共处一体,从经济角度及工作效率上讲都是不合适的。而 CS5372 和 CS5376A 的出现使超长周期和宽频数据采集电路的融合成为可能。

1 A/D 转换芯片

CS5372 是 CIRRUS LOGIC 公司 2001 年推出的双通道高性能模数转换器,可在工作频率为 2.048MHz 时对模拟数据进行过采样并输出 512kHz 的数字信号;CS5376A 是 CIRRUS LOGIC 公司于 2005 年推出的一款集减采样、数字滤波和最高可达四阶弱信号处理的差分整流器。内置的 FIR 和 IIR 滤波器可以用来采集频段在 1.6~2.5kHz 的弱信号,也可以通过 E^2PROM 或微控制器芯片编程配置选择使用部分滤波器以采集用户需求的宽低频段数据。

1.1 低功耗、多通道

天然大地电磁场频带很宽约为 10^{-5}~10^{3}Hz[7],这就导致了中高频数据可望在一个小时左右采完,而低频段数据需要几周甚至数月的时间采集完毕。由此可知此类仪器必须采用低功耗器件,以适应野外长时间工作对电能的需求。此外,由于要采集 2 分量电场和 3 分量磁场信号,且各通道数据存在一定的相关性,故需要多通道同步采集。

CS5376 最多允许四通道同步采集,单个通道在 500Hz 的采样率下功耗只有 9mW,等待采集模式的情况下仅有 40μW。

1.2 低采样率、高精度

由于天然电磁场信号微弱,只有 μV 级,所以 A/D 芯片的测量精度是一个重要的指标。同时长时间的数据采集必然导致数据量庞大,举例来说:现有 A/D 芯片的采样率为 100Hz,采样精度为 24 位,设采样时间为 30 天,则采集到的数据量至少有 (30×24×3600×100×3)b,即 741.6Mb,一条测线要几十个测点,就要有几十个 Gb,不但占据了庞大的磁盘空间,同时过多次数的写盘还产生很大的噪声,浪费了电能。因此较宽范围较低数值的采样率也是 A/D 芯片选型的必要指标。CS5376 转换套片中的 ADC 具有 24 位精度,同时还有 8 位状态信息,采样率为 1~4000sps,同样情况下一个测点仅需要 10Mb 空间。

1.3 数字滤波功能

一个高效率的滤波器设计要做到乘法运算最小化,量化噪声最小化,还要有很好的衰减特性和稳定特性,通常用一个滤波器很难达到上述要求。CS5376 具有多种滤波器级联结构包括 SINC 滤波器、FIR 滤波器和 IIR 滤波器,如图 1[8],多性能的滤波器结构有助于实现高效率的数字滤波功能。

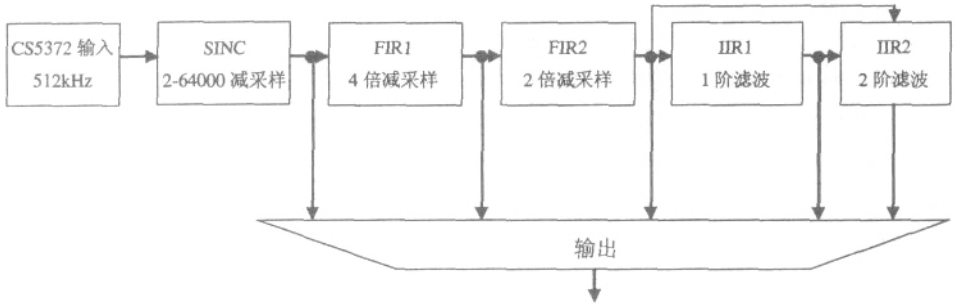

图 1 数字滤波器的级联结构

2 FPGA 控制下的 CS5376

本设计采用 Altera 公司生产的 EP1K30QC208-3 为微控制器芯片,用于把各频段不同的配置信息分时下载到 CS5376 中,并通过 CS5376 控制 CS5372 对大地电磁信号进行同步采集。系统整体结构如图 2 示。

2.1 硬件原理

五通道大地电磁数据首先进入前置放大器及阻抗匹配电路进行数据初步放大,同时消除共模噪声增加信噪比,然后通过模拟滤波器和工频陷波器进入 AD 芯片 CS5372,实现选频后数据的模数转换。其中 CS5372 对数据进行过采样,输出 512kHz 数字信号,然后进入 CS5376 进行数字滤波并按照配置进行减采样,最终数据通过 FPGA 缓存入 FIFO 并转存至 CF 卡中。

2.2 软件流程

当 CS5376 芯片上电或者 RESET 管脚有效时,CS5376 判断引脚 BOOT 的状态,若为低电平,一系列配置信息就会从 FPGA 下载到 CS5376 对应的寄存器下,否则从 E^2PROM 中直接配置。配置信息下载完成后,CS5376 发出时钟信号和同步信号给 CS5372,同步采集过程开始。由于天然电磁场频带较宽,本设计把采集过程分为三个频段:0.1ms~0.1s,0.1~10s,10~

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

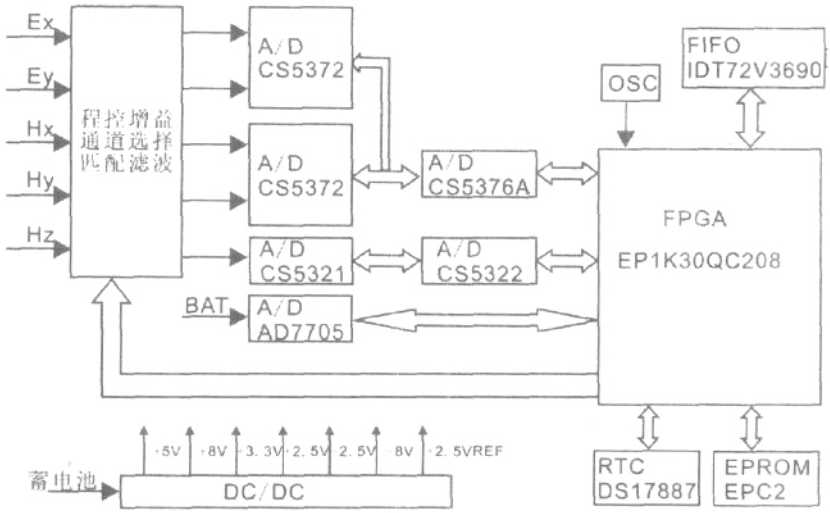

图 2 系统整体结构图

20000s。由于第一个频段采集时间较短为一分钟，可以先把数据调出，通过对比各通道数据的相关性检查数据是否正确；也可进行初步处理，画出视电阻率曲线，待确认无误后继续数据采集过程。各频段数据对应 CS5376 中不同的滤波器设置和采样率设置，所以采集前要重新配置滤波器信息。流程如图 3。

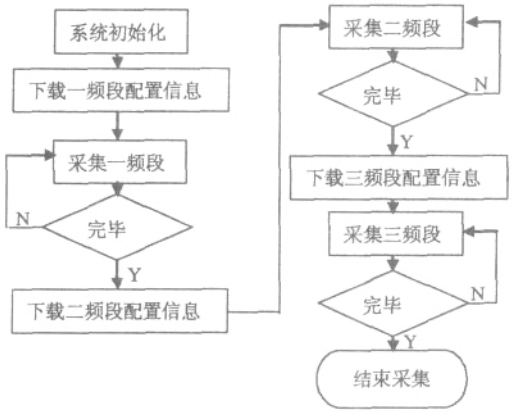

图 3 软件流程

写入 CS5376 的部分内容如下：

02 03 00 00 05 00 22 00 //通过 SPI1 进行操作，写 ROM 系数，配置 IIR 滤波器为 3Hz 高通，采样率为 500Hz，FIR 为线性相位系统。

延时 1ms //确认配置信息已接收完毕

00 03 00 00 07 //写 ROM TBS 数据。

延时 1ms

02 03 00 00 01 00 00 00 07 04 31 //通过 SPI1 进行操作，写 CONFIG 寄存器系数，配置数字滤波频率为 16.384MHz，MCLK 频率为 2.048MHz，2 分频输出有效，接收 512KHz 的数据流，并生成同步信号。

延时 1ms

02 03 00 00 01 00 00 20 00 02 40 //通过 SPI1 进行操作，写 FILTCFG 寄存器系数，配置输出为 FIR2，输出采样率为 500Hz，使用 4 通道。

延时 1ms

02 03 00 00 01 00 00 2A 07 40 40 //通过 SPI1 进行操作，写 TBSCFG 寄存器系数。

延时 1ms

02 03 00 00 01 00 00 2B 04 B0 00 //通过 SPI1 进行操作，写 TBSGAIN 寄存器系数。

延时 1ms

02 03 00 00 08 //启动滤波器。

3 结 语

CS5376 的使用大大优化了长周期大地电磁信号采集的系统软硬件设计，提高了超低频信号采集的准确性，降低了数据的存储空间。避免了以前无法实现硬件低采样率而采用软件级联分样产生地信号混叠现象。采用 FPGA 对 CS5376 进行配置有效地利用了 FPGA 功耗低、I/O 口线多、可操作性强、软件容易编写灵活性强等特点。根据此芯片设计的系统具有采集万秒级周期信号的能力，对地学领域超低频数据采集起到了推动作用[9,10]。

参 考 文 献

[1] 邓 明,谭捍东,胡建德,等.超宽频带大地电磁信号的采集方法和技术[J].现代地质,1997,11(3).

[2] TAO Shi long,WAN Tian feng,CHENG Jie.Introduction of Earth Science [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999.

[3] Nelson K D , Zhao WJ ,Brown L D , et al . Partially molten middle crust beneath southern Tibet :Synthesis of Project INDEPTH Results[J]. Science , 1996 , 274.

[4] Kosarev G, Kind S , Sobolev V , et al . Seismic evidence for detached Indian lithosphere mantle beneath Tibet[J] . Science , 1999 , 283.

[5] Wei W, Unsworth M, Alan Jones ,et al . Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies[J]. Science [J], 2001 , 292.

[6] Chen L ,Booker J R ,Jones A G ,et al . Electrically conductive crust in Southern Tibet from INDEPTH magnetotelluric surveying [J]. Science, 1996:274.

(下转第 26 页)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

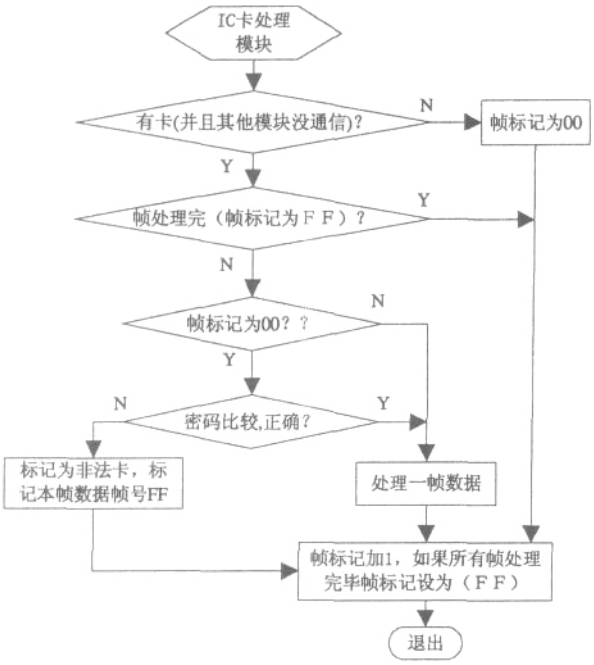

图 5 IC 卡处理流程图

另外,中断处理模块与主程序中的模块所共用的交换信息变量在程序设计中也考虑了其数据操作的完整性。譬如:主程序中的一个 16 位 int 型变量,若在中断程序中要改变它,因微处理器 S3F84BB 是一款 8 位单片机，当主程序判断完变量的高 8 位后被中断,此时低 8 位数据尚未判断就被中断程序改写,若返回时程序再判断低 8 位,这样所得出的结果肯定是不对的，因为它使用的是中断前的高 8 位和中断后的低 8 位。这些问题在软件设计过程中都采取了一些适当的技巧来避免,例如先把 16 位变量放入缓冲存储器中,判断时把两者进行比较正确后再判断处理。

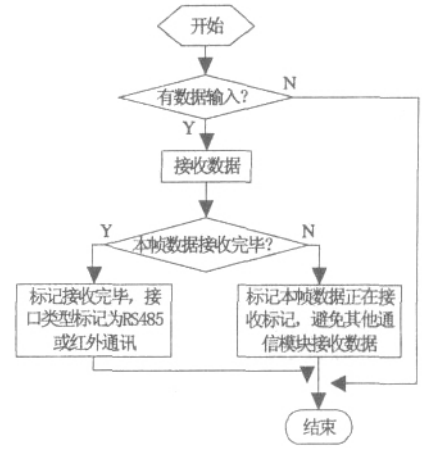

图 6 RS485 和红外通讯处理流程图

3 结束语

本文所介绍的多费率电能表的 IC 卡、RS485 和红外通信接口并存处理方法,针对不同接口数据的传输和处理采用统一帧数据格式,可以方便多种接口的添加,改善了电能表的程序结构,软件模块化的设计可简单地把程序移植到其它需有多种接口的单相或三相多功能电能表中,为开发多种型号电能表,缩短开发周期、提高企业效率和竞争力具有很现实的意义。

参 考 文 献

[1] DL/T645-1997,多功能电能表通讯规约[S].
[2] GB/T18460-2001,IC 卡预付费售电系统 第 3 部分: 预付费电度表[S].

作者简介:
詹学文(1966-),男,汉族,湖南平江人,学士学位,主要从事智能电能表产品开发。
刘定良(1965-),男,汉族,湖南湘乡人,学士学位,主要研究工业电气自动化仪器仪表。

收稿日期:2007-02-23
(杨长江 编发)

(上接第 43 页)

[7] Beyer J.Magnetotellurics and its application to petroleum exploration [J].Antennas and Propagation Society International Symposium,1983,21(5).
[8] CS5376 Low-power Multi-channel Decimation Filter[EB/OL].CIRRUS LOGIC.Inc,2005.
[9] 魏文博. 我国大地电磁测深新进展及瞻望 [J]. 地球物理学进展,2002,17(2).
[10] 王道宪.CPLD/FPGA 可编程逻辑器件应用与开发[M].北京:国防工业出版社,2004.

作者简介:
屈栓柱(1982-),男,中国地质大学(北京)硕士研究生,主要研究方向为地球物理仪器。
邓 明(1956-),男,中国地质大学(北京)教授,主要从事地球物理仪器研制。
金 胜(1970-),男,中国地质大学(北京)副教授,主要从事地球物理电法理论研究。
陈 凯(1984-),男,中国地质大学(北京)研究生,主要从事地球物理仪器的研究和学习。
闫晋峰(1980-),女,中国地质大学(北京)助教,主要从事数字信号处理方面的教学。

收稿日期:2007-03-14
(丘 源 编发)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net