

张兴国, 王兰炜, 张宇, 等. 2024. GEF-II 地电场仪的研制及应用. 中国地震, 40(2): 470~483.

GEF-II 地电场仪的研制及应用

张兴国 王兰炜 张宇 胡哲 张世中

中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

摘要 地电场观测是地球物理场观测的一种重要手段。利用 ARM 与 FPGA 技术研制了新型 GEF-II 地电场观测仪, 该仪器包括多通道数据采集、数字信号处理、控制与服务等几部分, 具有输入阻抗大、测量精度高、短路噪声小的特点, 实现了地电场的连续、自动测量, 满足地震监测预测研究的需求。自 2017 年以来, 该系统已广泛应用于我国地震监测台网中, 为地震监测预测和科学研究提供了可靠的观测数据。

关键词: 地电场 数字滤波 现场可编程

[文章编号] 1001-4683(2024)02-0470-14 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地电场是由地球内部和外部的各种非人工电流体系与地球介质相互作用在地球表面所产生的电场, 包括大地电场和自然电场。其中, 大地电场是由电离层中的各种电流体系与地球介质相互作用产生的分布于地球表面的感应电场, 具有区域性的特点; 而自然电场是由地下矿体、地下水等的分布而产生的电场, 具有较强的局部性特点(李金铭, 2005; 钱家栋, 2010; 谭大诚等, 2014; 席继楼等, 2015; 范莹莹等, 2017; 席继楼, 2019; 范晔等, 2020)。在地球物理场观测中, 地电场观测作为一种重要的地震监测手段, 其主要的研究对象为 DC~0.1Hz 频带内地表电场强度随时间和空间的变化规律, 并在此基础上探索地电场变化可能与地震孕育过程的相关性(钱家栋, 2010)。孕震过程中, 由于地壳介质、应力等环境因素的变化导致地壳介质的电性变化, 从而引起地表电场的变化, 因此地电场观测对地震预报, 特别是短临预报具有重要意义(毛桐恩等, 1999)。

20 世纪 80 年代希腊几位科学家提出了地电场观测的 VAN 方法, 即利用连续地电场观测资料中提取的地震电信号 (Seismic Electric Signal, SES) 预报地震 (Varotsos et al, 1986, 1988, 1991) 并取得显著成功, 为了进一步检验和研究 VAN 方法, 日本、法国和前苏联等国家也相继开展了与地震预报相关的地电场观测与研究 (Uyeda et al, 2000; Ifantis et al, 2007; Orihara et al, 2009)。

我国在 20 世纪 60 年代初至 70 年代初曾用检流计式的大地电流仪连续记录过大地电

[收稿日期] 2023-03-27 [修定日期] 2023-09-30

[项目类别] 中国地震局地震预测研究所地震业务科技支撑项目 (CEAIEF20220503) 资助

[作者简介] 张兴国, 男, 1973 年生, 高级工程师, 主要从事地震前兆观测技术与地电仪器研发。

E-mail: 1242437367@qq.com

场的变化,80年代初基于 Z80 单板机研制了 ZD9 大地电场仪,并在甘肃省几个台站进行了试用,90年代后又相继进行了 ZD9A 系列地电场仪的研制与生产工作,并迅速投入使用,为地震预测以及科学研究提供了大量的连续观测数据,获得很多研究成果(赵家骝等,1995;陈有发等,1999;席继楼等,2002、2016;席继楼,2019;马钦忠等,2003、2004、2014;钱复业等,2005;谭大诚等,2010)。随着科技的发展,地电场观测仪器也不断地进行着更新换代,其所用的控制器也从最初单板机,经历单片机、工控机,最后到高性能嵌入式处理器。在数字化的过程中,其关键部件模数变换器(ADC)也经历了从 8 位到 24 位的高精度转变,采集方式也由最初单通道采集到目前的多通道并行采集,满足了地电场观测的需求(席继楼等,2016;席继楼,2019)。

随着 ZD9 系列地电场仪的停产以及仪器更新换代的需要,急需研制一种新型的地电场仪来延续该手段的连续观测。近年来,ARM 微处理器不断更新换代,其处理能力得到了空前的提高,高度集成的网络化与显示等技术使得其应用更加趋于小型化和便携性,本文研制的 GEF-II 型地电场仪正是基于 ARM 微处理器,同时利用 FPGA 的现场可编程能力实现逻辑接口与数字滤波处理,数据采集部分利用多通道并行采集的 32 位高分辨力 ADC,实验室测试噪声在 $5\mu\text{V}_{\text{pp}}$ 以内,集成了 7 英寸的 LCD 触摸显示屏,实现了地电场观测的自动化,仪器性能与 ZD9 系列地电场仪相比,在观测精度、频带控制、输入阻抗以及通道独立性等方面有了显著提高,仪器的各项性能指标等符合地震行业地电场观测的需求,其长期稳定性、环境适应性等满足台站实际观测的需求。目前该仪器在监测台网中得到广泛应用,为地震监测预测和科学研究提供连续、可靠的观测数据。

1 地电场测量原理

电场强度是表示电场强弱和方向的物理量,是一个矢量。地电场作为矢量场,在观测点上采用两组正交的观测装置同时测量两个分量值,再利用矢量合成计算得到该点地电场的幅度和方位(席继楼等,2002、2009),如图 1 所示。

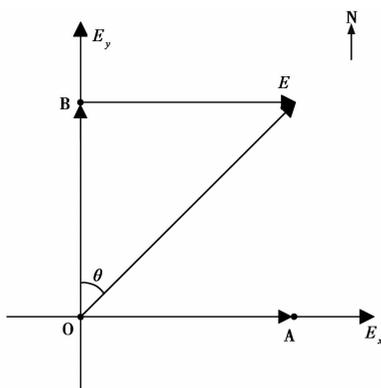


图 1 地电场观测原理

实际测量时,通过在地表相互垂直的方向(NS 向 E_y 与 EW 向 E_x)上一一定的距离 OB、OA 处各埋设两个不极化电极,规定 NS 向电场 E_y 方向北为正,EW 向电场 E_x 方向东为正,假设

各观测方向上的电场均匀分布,那么观测点 O 的电场 E 大小为

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (1)$$

其中,电场 E 的单位为 mV/km 。方位角 θ 大小为

$$\theta = \arctg \frac{E_x}{E_y} \quad (2)$$

E_x 、 E_y 的计算方法如图 2 所示。

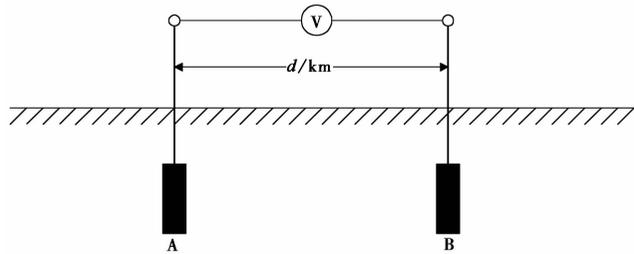


图 2 电场分量计算原理

设电极 A 与电极 B 间的电位差为 V_{BA} ,则有

$$V_{BA} = V_B - V_A \quad (3)$$

其中, V_{BA} 单位为 mV 。电极 A 与电极 B 的间距为 d , 假设电场均匀分布,则有

$$E_n = \frac{V_{BA}}{d} \quad (n = x \text{ 或 } y) \quad (4)$$

其中, E_n 单位为 mV/km 。电场分量 E_x 、 E_y 中均包含了大地电场与自然电场。

为进一步验证观测数据的正确性,规范 DB/T 18.2—2006 以及 DB/T 34—2009 要求在每个方位上按长、短极距方式进行布极,长、短极距的极距比不宜小于 1.5,短极距不小于 200m(杜学彬等,2006;席继楼等,2009),台站所采用的布极方式通常均为三角形布极,如图 3 所示。

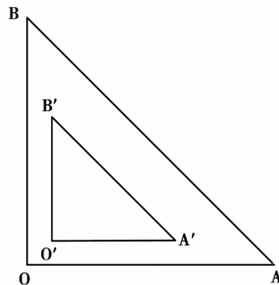


图 3 台站布极方式

可利用长、短极距的观测结果进行相关性检查,从而判断观测数据的质量。

2 地电场仪主要技术指标

地电场仪观测的对象是地电场随时间的变化,根据测量原理可知,仪器的直接测量对象

为两个埋地电极间的电位差,实际是对电压的测量,故而仪器的主要技术指标包括电压的分辨力、电压测量范围以及电压的最大测量误差等,行业标准 DB/T 29.2—2008 对地电场观测仪的进网技术要求进行了相应的规范,本文研制的 GEF-II 地电场仪的主要技术指标与行业标准入网技术要求(钱家栋等,2008)的对比,如表 1 所示。

表 1 GEF-II 地电场仪技术指标与行业标准入网技术要求对比

主要技术指标	DB/T 29.2—2008	GEF-II 地电场仪
电压分辨力	不大于 0.01mV	优于 0.01mV
电压测量范围	不小于 -1000.00~1000.00mV	-1200.00~1200.00mV
电压最大测量误差	不超过±(0.1%读数+0.02%满度)	不超过±(0.1%读数+0.02%满度)
通频带	不小于 DC~0.005Hz	DC~0.1Hz
输入电阻	不小于 10MΩ	40MΩ
工频串模抑制比	不小于 80dB	不小于 80dB
工频共模抑制比	不小于 140dB	不小于 140dB

3 系统设计

3.1 系统总体结构

GEF-II 地电场仪的设计采用了“高精度采集电路+FPGA+ARM”的组合架构,各部分均对应了其系统总体结构中的一个电路单元,图 4 给出了 GEF-II 地电场仪的总体结构。

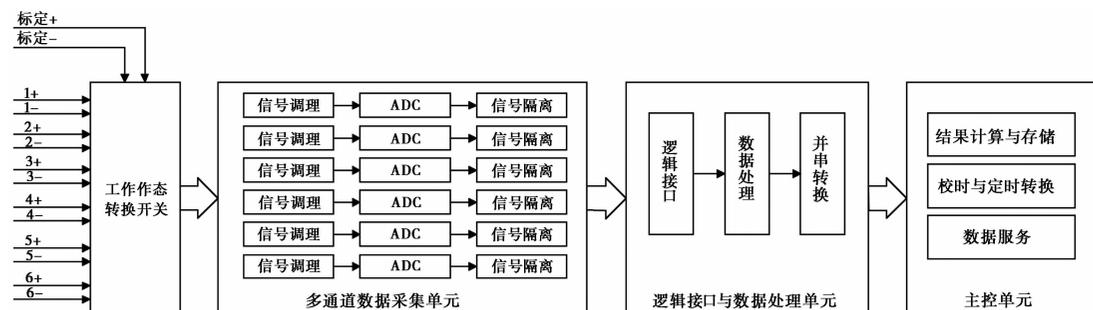


图 4 GEF-II 地电场仪总体结构

如图 4 所示,GEF-II 地电场仪主要由工作状态转换开关、多通道数据采集单元、逻辑接口与数据处理单元以及主控单元组成。其中,工作状态转换开关为一组位于采集板上的继电器开关及其控制电路,高精度采集电路对应了多通道数据采集单元,FPGA 对应逻辑接口与数据处理单元,ARM 对应主控单元。

为确保地电场仪始终工作在准确的测量状态,需要定期对其进行标定。工作状态转换开关负责测量信号与标定信号的切换,当进行仪器标定时,标定信号经多路继电器开关切换后输入至多路数据采集单元。

通常,台站采用长、短极距的三角形布极方式(图 3),每个方位均形成两个电位差,共有 6 组电压需要测量,为进一步得到同步采集的多路信号,同时降低通道间的相互干扰,本文设

计的 GEF-II 地电场仪采用了 6 路在电气上相互隔离的高精度数据采集电路。每通道采集电路均由信号调理电路、ADC 以及信号隔离电路构成。信号调理电路用于实现信号滤波、信号放大与阻抗变换等功能；ADC 电路将模拟信号转变为高精度的数字信号；信号隔离电路实现数据采集单元与数据处理单元间的信号隔离,并将数字信号送入逻辑接口与数据处理单元,同时接收用于 ADC 工作的时钟与控制信号。

逻辑接口与数据处理单元负责与 6 路 ADC 间的逻辑接口与第 1 级数字滤波功能,最后将 6 路滤波降采样后的数字信号经并串转换电路转换成串行数据,再通过串口上传至主控单元。

主控单元负责进制变换、二级数字滤波、结果计算与存储、校时与定时转换以及数据服务等功能。本单元实现由二进制到十进制的转换、计算结果的定时存储,并向地震前兆数据服务系统提供各种网络服务。

3.2 系统硬件设计

3.2.1 数据采集单元设计

多通道数据采集单元电路为 6 路电气上相互隔离的数据采集板,其单通道数据采集电路的功能组成结构如图 5 所示。



图 5 数据采集电路功能组成结构

由于地电场仪测量电极时直接与大地相连,被测对象中包含了工频游散电流以及其他地铁/轻轨干扰、直流输电干扰和其他已知人工源等非工频干扰,其以串模或共模干扰的方式进入采集单元(席继楼等,2015;席继楼,2019)。数据采集单元首先需要对输入信号进行预处理,通过 RC 低通滤波的方式进行初步的信号带宽限制。本设计方案对工频干扰的抑制方式采用过采样与数字滤波相结合的方式,即采用 250Hz 对输入信号进行采集,可以完整地采集到工频 50Hz,再利用数字低通滤波器滤除 50Hz 的工频干扰信号,采用二阶 RC 低通滤波的方法即可实现在 125Hz 频点时信号衰减达到 80dB,不会产生频率混叠(图 6、图 7)。

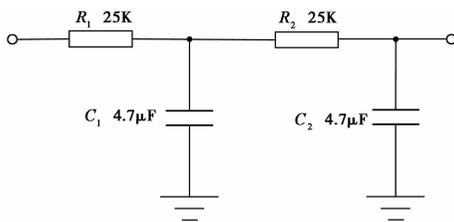


图 6 二阶 RC 低通滤波器电路结构

信号放大与阻抗匹配电路用于实现对微弱信号的放大以及与 ADC 器件输入阻抗的匹配。ADC 器件的输入阻抗通常较小,而测量单元输入端阻抗又较高,该电路可实现前后端的阻抗匹配。同时,由于每个 ADC 器件均有一定的输入信号幅度要求,限幅电路用于保护 ADC 器件不会因输入信号过大而损坏。信号放大与阻抗匹配电路以 TI 公司的 TLC2652 为

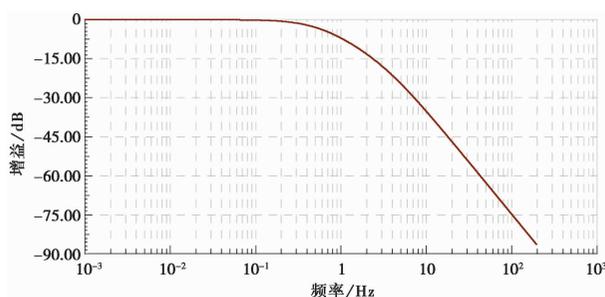


图7 二阶 RC 低通滤波器幅度响应曲线

核心器件, TLC2652 为高精度斩波稳零运算放大器, 失调电压、失调电流与电压漂移均很小, 经常用于微弱信号的放大电路部分。

A/D 转换电路核心器件采用 TI 公司的 32 位模数转换器 ADS1281, 可实现高精度的模数变换, 相比常用的 24bits 模数转换器, 其在转换精度上有了很大的提高。

信号隔离电路用于实现采集单元的模拟部分与数据处理单元的数字电路之间的信号隔离, 防止干扰信号的相互窜入, 同时也实现了前后级间的电源隔离。

3.2.2 数据处理单元设计

数据处理单元用于实现将采样率为 250Hz 的数字信号经数字滤波与重抽样后生成 10Hz 的数据信号, 并上传至主控单元。通常, FIR 滤波器设计范围为 DC ~ 1Hz, 截止频率 2Hz, 带内波动 0.1dB, 带外衰减 140dB, 滤波器阶数 1288, 其幅度响应曲线如图 8 所示。

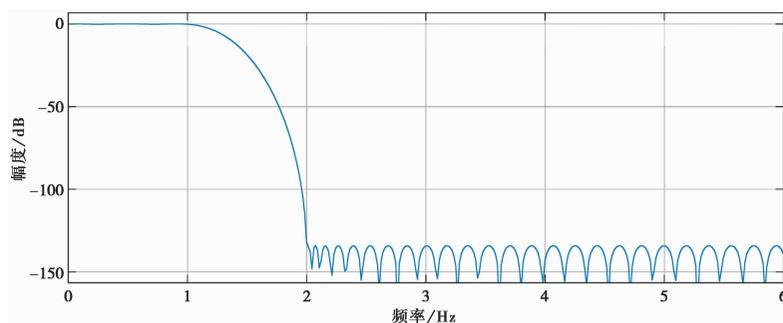


图8 FIR 滤波器幅度响应曲线

经 FIR 数字滤波后, 工频干扰信号被抑制掉, 数据处理单元的数据吐出频率设为 10Hz, 故需要对滤波输出的 250Hz 信号进行重抽样, 经 25 分频后可得到 10Hz 的数据输出。

逻辑接口与数据处理单元采用 Altera 公司的 Cyclone III 系列芯片 EP3C40F484。EP3C40F484 具备 39600 个逻辑单元, 1134K bits RAM, 内嵌乘法器 126 个, 锁相环 4 个, IO 接口 300 余个。FPGA EP3C40F484 主要实现两个功能, 一是逻辑接口, 包括前端与 6 路 ADC 芯片的逻辑接口以及后端与 ARM 控制器的接口; 二是数据处理, 即多通道数字信号滤波功能需要 6 路数字滤波器进行滤波, 图 9 给出了单通道数字滤波器的组成结构。

每个单通道的数字滤波器均由双口 RAM、FIR 滤波器、降采样以及串并转换几部分功能模块组成, 输入信号以 32 位字长首先送入双口 RAM 进行缓存, 再进行 FIR 滤波, 滤波后的

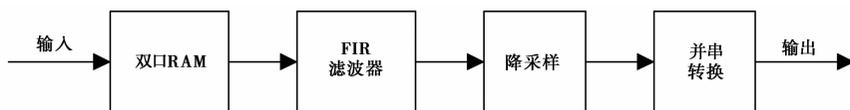


图 9 单通道数字滤波器组成结构

数据经重抽样后得到降采样的数据,再经并串转移后送入串口,最终上传至 ARM 主控单元。前端双口 RAM、6 通道 FIR 数字滤波器、降采样、并串转换以及输入端 SPI 接口和后端 UART 接口经逻辑综合后,所占用的 FPGA 资源包括:逻辑单元 6413 个,内存 651264bits,乘法器 72 个,锁相环 2 个,IO 接口 95 个。

3.2.3 主控单元设计

主控单元作为 GEF-II 电场仪的控制中枢,实现对数据处理单元与数据采集单元的控制,同时接收数据处理单元上传的 10Hz 数据,并对其进行变换与二次滤波等其他处理工作。其核心控制器件 CPU 采用 ARM 微处理器实现,可充分利用 ARM 的低功耗与高性能特点。本方案采用飞思卡尔基于 Cortex A9 系列 i.MX6 芯片的核心板,具备双核处理器,主频 1.0GHz,内存 1GB,带有 4GB 的 EMMC (Embedded Multi Media Card) 存储器,具备 SATA 接口可扩展外部数据存储,另外,具备常用的网络、USB、串行接口与显示接口等,可充分实现主控单元的数据转换、定时处理以及响应地震前兆数据服务系统的服务等功能。

主控单元可通过 RS232 接口实现控制,通过 RS232 接口与逻辑接口与数据处理单元相连,通过 SATA 接口连接数据存储,通过 LVDS 接口与 LCD 相连(图 10)。

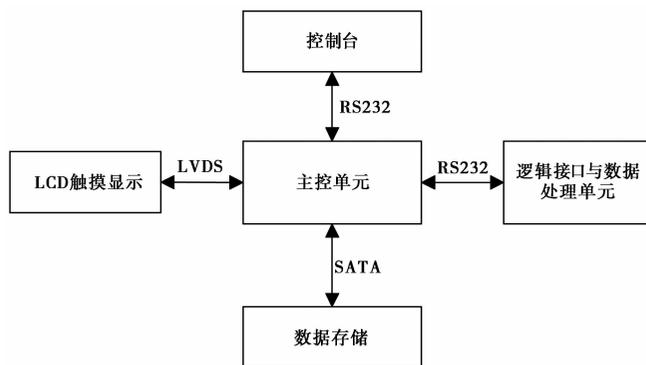


图 10 主控单元外部接口

3.3 系统软件设计

GEF-II 地电场仪的软件主要用于实现采集数据的进制转换、二次滤波、秒数据生成、秒转分处理、数据存储与数据服务等功能,软件开发基于 linux 操作系统,开发语言为 QT C++, 主要包括应用程序与系统服务两部分,共分 6 个工作进程,即采集进程 datacollector、定时进程 timer、数据服务进程 dbserver、Web 服务进程 boa、Ftp 服务 vsftpd 与 Telnet 服务 telnetd,如图 11 所示。其中,采集进程、定时进程、数据服务进程属于应用程序,Web 服务、Ftp 服务与 Telnet 服务属于系统程序。

采集进程 datacollector 负责数据的采集、进制转换、二次滤波以及实时秒数据的生成与

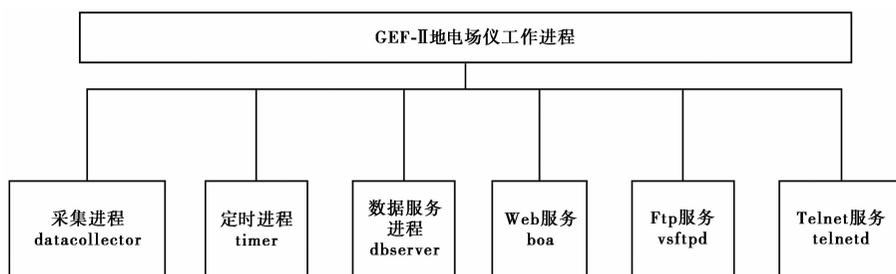


图 11 GEF-II 地电场仪工作进程

存储、实时分数据的绘图等功能。在图 8 中,数据处理单元经一次滤波后实现了由 250Hz 降采样生成 10Hz 数据的过程,而主控单元的采集进程经二次滤波实现由 10Hz 生成 1Hz 数据,即秒数据,进而生成分数据的过程。二次滤波器设计参数为:通带范围 DC~0.05Hz,截止频率 0.3Hz,带内衰减 0.1dB,带外衰减 140dB,滤波器阶数 206,-3dB 带宽在 0.1Hz,二次滤波器幅度响应曲线如图 12 所示。

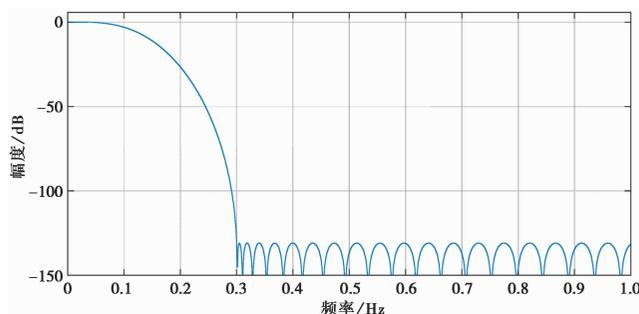


图 12 二次滤波器幅度响应曲线

二次滤波后的 10Hz 数据经秒计时器累加平均后生成秒采样(1Hz)数据,秒采样数据再经分计时器累加平均最终得到分采样数据。同时,该采集进程还负责生成最近 5min 数据与当天数据,并进行当天数据绘图等。

定时进程 timer 负责获取 ntp 服务器地址信息并定时进行网络校时、定时利用秒数据生成《地震前兆台网专用设备通信》规程要求的格式数据,包括每隔 3min 生成一次当天的格式数据,第二天凌晨生成前一天的格式数据。

数据服务进程 dbserver 用于通过 socket 服务响应地震前兆数据服务系统的各项请求。

Web 服务进程 boa 用于响应用户的网页操作,包括仪器参数查看与修改、仪器实时时钟查看、仪器重启与手动校时等控制功能。

Ftp 服务进程用于响应用户通过 Ftp 客户端进行数据下载的服务。

Telnet 服务用于响应用户通过 telnet 端口远程登录、操作与控制仪器。

GEF-II 地电场仪的数据采集工作流程如图 13 所示。

4 台站应用

图 14 展示了 GEF-II 地电场仪的外观。图 15 为 150min 长度的 GEF-II 地电场仪短路噪

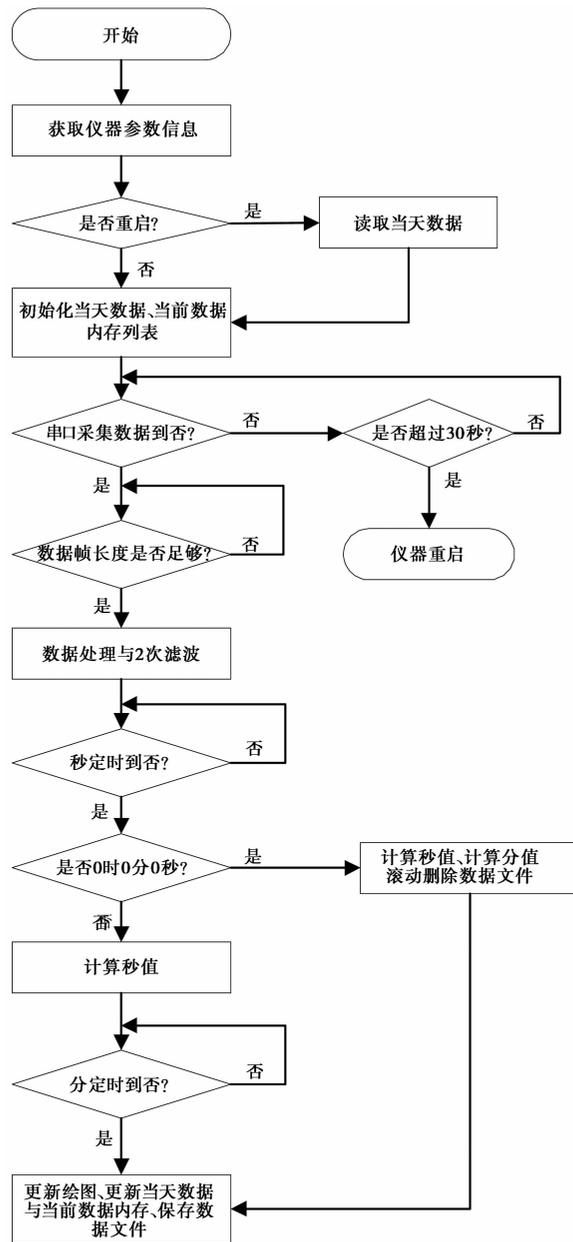


图 13 GEF-II 地电场仪数据采集工作流程

声测试结果,由图可以看出仪器 6 个通道的短路噪声基本均控制在 $4\mu V_{pp}$ 以内。在北京长城计量院 304 所进行仪器校准时,该仪器可分辨出 $1\mu V$ 的信号变化。

表 2 给出了 GEF-II 地电场仪测量范围、输入阻抗、共模抑制比、串模抑制比与道间串扰的实验室测试结果。由表 2 可看出,GEF-II 地电场仪在测量范围、输入阻抗与道间串扰方面较 ZD9 系列地电场仪均有了一定程度的提高。

表 3 给出了 GEF-II 地电场仪进行最大允许误差标定时得到的一组记录值。



图 14 GEF-II 地电场仪外观

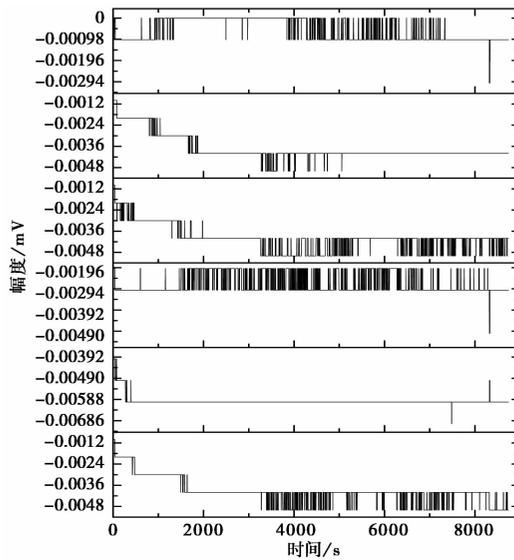


图 15 GEF-II 地电场仪短路噪声

表 2

GEF-II 地电场仪实验室测试结果

通道	测试指标				
	测量范围/mV	输入阻抗/MΩ	共模抑制比/dB	串模抑制比/dB	道间串扰/dB
CH1	±1200	38.949	163.84	104.68	109.54
CH2	±1200	39.889	160.32	103.52	108.97
CH3	±1200	39.318	163.84	106.02	109.54
CH4	±1200	38.097	160.32	104.68	108.84
CH5	±1200	39.970	160.32	104.68	109.01
CH6	±1200	39.817	160.32	104.68	108.89

GEF-II 地电场仪采用了 32 位的 ADC 芯片实现模数转换,转换精度得到了较大提高,且 6 路采集通道相互独立,通道间隔离度也很大,仪器的整体性能得到了较大程度的提高。自 2017 年应用以来,该仪器得到了部分省地震局地电台站的应用和支持,截至目前,系统内共有 57 个测点的数据入库(表 4),积累了大量的观测数据。

图 16 与表 5 分别给出了上海新海界河地电场观测点 2023 年 3 月 20 日的日观测数据曲线及其长、短极距的相关系数,可以看出仪器长、短极距的观测数据相关性较好,场地环境除地铁干扰外(观测数据 5—24 时前受地铁干扰的影响有高频噪声出现),没有其他外部干扰

表 3 GEF- II 地电场仪最大允许误差标定记录(单位:mV)

标准值	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	最大误差	最大允许误差
1200.0	1200.036	1200.034	1200.033	1200.038	1200.038	1200.043	0.043	1.4400
600.0	600.038	600.037	600.037	600.041	600.039	600.044	0.044	1.2400
100.0	100.001	100.001	100.001	100.002	100.001	100.002	0.002	0.3400
60.0	60.000	60.000	60.001	60.001	60.000	60.001	0.001	0.3000
20.0	20.000	20.000	20.001	20.001	20.000	20.000	0.001	0.2600
10.0	10.000	10.000	10.000	10.001	10.000	10.000	0.001	0.2500
1.0	1.000	1.000	1.000	1.001	1.000	1.000	0.001	0.2410
0.6	0.600	0.600	0.601	0.601	0.600	0.600	0.001	0.2406
0.1	0.100	0.100	0.101	0.101	0.100	0.100	0.001	0.2401
0	0	0	0	0.001	0	-0.001	0.001	0.2400

表 4 GEF- II 地电场仪应用测点分布

序号	测点	序号	测点	序号	测点
1	延庆(F)	20	陵阳(2)	39	凤阳(2)
2	通州(F)	21	无棣(3)	40	山丹(3)
3	兴济(1)	22	邹城(1)	41	平凉(1)
4	夏县(G)	23	乳山(1)	42	汉王(2)
5	太原(1)	24	周口(1)	43	天水(3)
6	乌加河(K)	25	成都(3)	44	武胜驿(2)
7	满洲里(2)	26	甘孜(6)	45	武威(2)
8	宝昌(3)	27	盐源(6)	46	高台(1)
9	新城子(1)	28	泸沽湖(2)	47	瓜州(1)
10	义县(1)	29	洱源(3)	48	松山(3)
11	阜新(7)	30	弥度(1)	49	玛曲(2)
12	三岗(A)	31	松明(2)	50	大武(c)
13	榆树(b)	32	曲江(2)	51	门源(8)
14	长江农场(1)	33	罗茨(1)	52	金银滩(2)
15	青浦(1)	34	拉萨(D)	53	固原(3)
16	泉州(3)	35	乾陵(6)	54	乌鲁木齐(0)
17	南昌(1)	36	宝鸡(1)	55	和田(1)
18	安丘(2)	37	周至(2)	56	乌什(8)
19	菏泽(1)	38	合阳(2)	57	温泉(2)

注: 括号内的字母和数字代表测点编号,下同。

存在。

表 6 给出了 3 个测点 GEF- II 地电场仪 2022 年度的月相关系数与年相关系数统计结果,可以进一步看出该地电场仪在台站的运行稳定可靠,实现了对观测场地电场信号的连续、自动测量,可满足地震监测预测研究的需求。

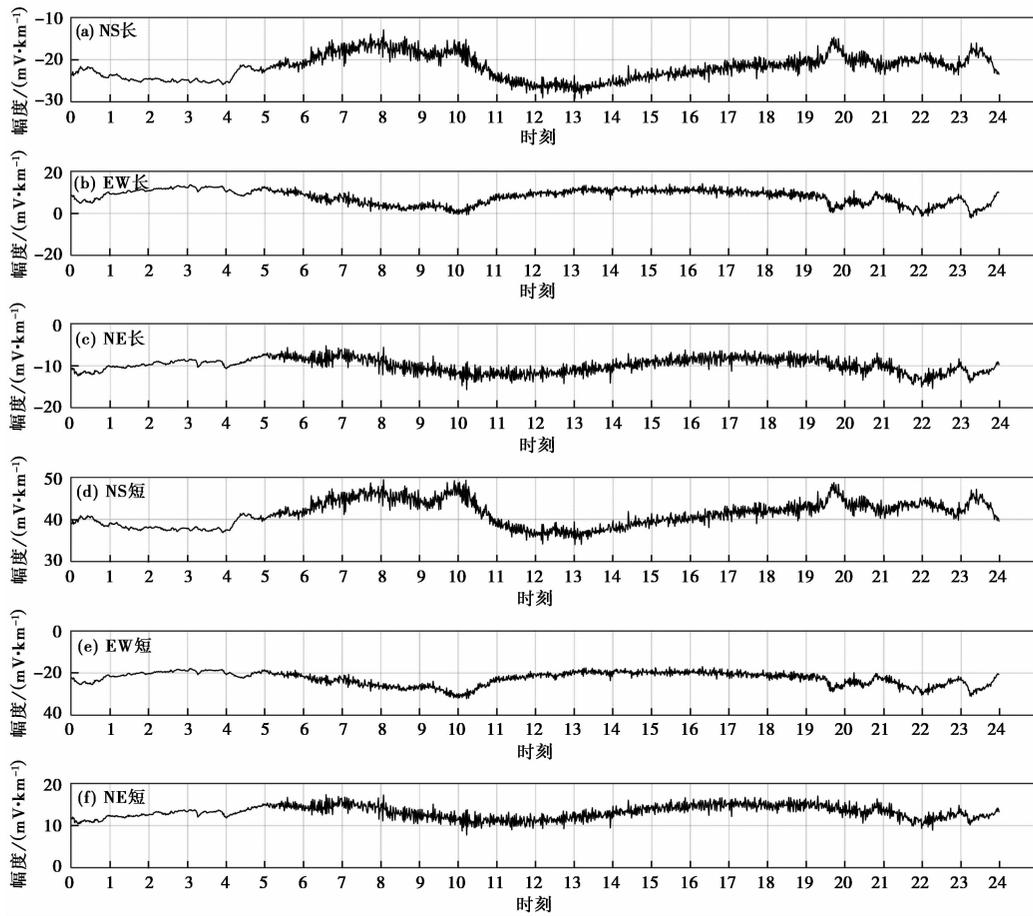


图 16 上海新海界河地电场观测点日观测曲线

表 5 上海新海界河地电场观测点长、短极距相关系数

相关系数计算项	相关系数
SN 向长极距与短极距	0.9883
EW 向长极距与短极距	0.9909
NE 向长极距与短极距	0.9587

表 6 GEF-II 地电场仪台站运行相关系数

测点	年相关系数 (2022 年)	月相关系数											
		1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
菏泽(1)	0.986	0.987	0.974	0.989	0.993	0.993	0.964	0.974	0.991	0.996	0.992	0.988	0.987
安丘(2)	0.983	0.988	0.986	0.979	0.982	0.987	0.956	0.985	0.99	0.989	0.984	0.983	0.989
武威(2)	0.990	0.998	0.998	0.992	0.993	0.99	0.984	0.977	0.986	0.994	0.998	0.974	0.995

5 结语

地电场观测作为地球物理场观测的一种重要观测手段,在地震预报分析中起着重要的作用,作为获取观测数据的设备,不仅需要满足一定的技术指标要求,更重要的是观测仪器的稳定性,同时采用新技术、提高用户体验度也是观测仪器的发展方向。GEF-II地电场仪采用了“多通道并行采集板+FPGA+ARM”的组织架构,既利用了当前的最新技术,也使该仪器具备了一定的灵活性,数据处理算法的升级与更新可通过ARM与FPGA得到实现,从而延长了仪器的使用周期。通过在多个台站连续几年的观测应用,进一步证明了GEF-II地电场仪可满足地电场台站的观测需求。随着仪器的更新换代,该GEF-II地电场仪也会逐渐成为地电场观测的主力设备。

致谢:衷心感谢地电台站GEF-II仪器应用人员提供的宝贵意见以及在仪器研发过程中提供帮助的同事,感谢审稿专家及编辑部的意见和建议。

参考文献

- 陈有发,马钦忠,张杰. 1999. 震前自然电场的前兆及其可能机理. 华南地震, **19**(3):26~34.
- 杜学彬,席继楼,谭大诚,等. 2006. DB/T 18.2-2006 地震台站建设规范地电台站第2部分:地电场台站. 北京:地震出版社.
- 范晔,崔腾发,杜学彬,等. 2020. 中国大陆地电场日变化特征及影响因素. 中国地震, **36**(2):234~243.
- 范莹莹,解滔,安张辉,等. 2017. 东部沿海地区地电场半日波变化特征研究. 中国地震, **33**(3):442~452.
- 胡广书. 1999. 数字信号处理-理论、算法与实现. 北京:清华大学出版社.
- 李金铭. 2005. 地电场与电法勘探. 北京:地质出版社.
- 马钦忠,冯志生,宋治平,等. 2004. 崇明与南京台震前地电场变化异常分析. 地震学报, **26**(3):304~312.
- 马钦忠,李伟,张继红,等. 2014. 与大电流信号有关的华北东部地区地电场空间变化特征的研究. 地球物理学报, **57**(2):518~530.
- 马钦忠,钱家栋. 2003. 地下电性非均匀结构对地电场信号的影响. 地震, **23**(1):1~7.
- 毛桐恩,席继楼,王燕琼,等. 1999. 地震过程中的大地电场变化特征. 地球物理学报, **42**(4):520~528.
- 钱复业,赵玉林. 2005. 地电场短临预报方法研究. 地震, **25**(2):33~40.
- 钱家栋. 2010. 地震电磁学理论基础与观测技术. 北京:地震出版社.
- 钱家栋,席继楼,赵家骝,等. 2008. DB/T 29.2-2008 地震观测仪器进网技术要求地电观测仪第2部分:地电场仪. 北京:中国标准出版社.
- 谭大诚,赵家骝,刘小凤,等. 2014. 自然电场的区域性变化特征. 地球物理学报, **57**(5):1587~1598.
- 谭大诚,赵家骝,席继楼,等. 2010. 潮汐地电场特征及机理研究. 地球物理学报, **53**(3):544~555.
- 席继楼,蔡晋安,赵家骝,等. 2009. DB/T 34-2009 地震地电观测方法地电场观测. 北京:中国标准出版社.
- 席继楼,赵家骝,关歆莹,等. 2015. 地电场观测中的工频干扰抑制方法研究. 地震, **35**(4):53~63.
- 席继楼,赵家骝,刘超,等. 2016. 新型网络化地电场观测技术研究与应用. 地球物理学进展, **31**(6):2690~2699.
- 席继楼,赵家骝,王燕琼,等. 2002. 地电场观测技术研究. 地震, **22**(2):67~73.
- 席继楼. 2019. 地电场观测方法与观测技术研究. 地震地磁观测与研究, **40**(2):1~20.
- 赵家骝,苏明达,王燕琼,等. 1995. ZD9 大地电场仪. 西北地震学报, **17**(1):69~74.
- Ifantis A, Giannakopoulos K. 2007. New experimental data reveal possible relation of chaotic behavior of the long-term geoelectric potential difference to seismic activity in Western Greece. Chaos Soliton Fract, **34**(3):717~726.
- Orihara Y, Kamogawa M, Nagao T, et al. 2009. Independent component analysis of geoelectric field data in the northern Nagano, Japan. Proc Jpn Acad Ser B Phys Biol Sci, **85**(9):435~442.

- Uyeda S, Nagao T, Orihara Y, et al. 2000. Geoelectric potential changes: Possible precursors to earthquakes in Japan. *Proc Nat Acad Sci USA*, **97**(9):4561~4566.
- Varotsos P, Alexopoulos K, Nomicos K, et al. 1986. Earthquake prediction and electric signals. *Nature*, **322**(6075):120.
- Varotsos P, Alexopoulos K, Nomicos K, et al. 1988. Official earthquake prediction procedure in Greece. *Tectonophysics*, **152**(3~4):193~196.
- Varotsos P, Lazaridou M. 1991. Latest aspects of earthquake prediction in Greece based on seismic electric signals. *Tectonophysics*, **188**(3~4):321~347.

Development and Application of GEF-II Geoelectric Field Instrument

Zhang Xingguo, Wang Lanwei, Zhang Yu, Hu Zhe, Zhang Shizhong

Institute of Earthquake Forecasting, CEA, Beijing 100036, China

Abstract Geoelectric field observation serves as a crucial method in geophysical field observation. Utilizing ARM and FPGA technology, a novel geoelectric field observation instrument has been developed. This instrument incorporates multi-channel data acquisition, digital signal processing, control, and service functionalities, boasting features such as large input impedance, high measurement accuracy, and low short-circuit noise. It enables continuous and automated measurement of geoelectric field signals, catering to the requirements of earthquake monitoring and prediction research. Since 2017, the system has been extensively utilized within earthquake monitoring network of China, providing dependable observation data for earthquake prediction and scientific research.

Keywords: Geoelectric field; Digital filtering; Field programmable