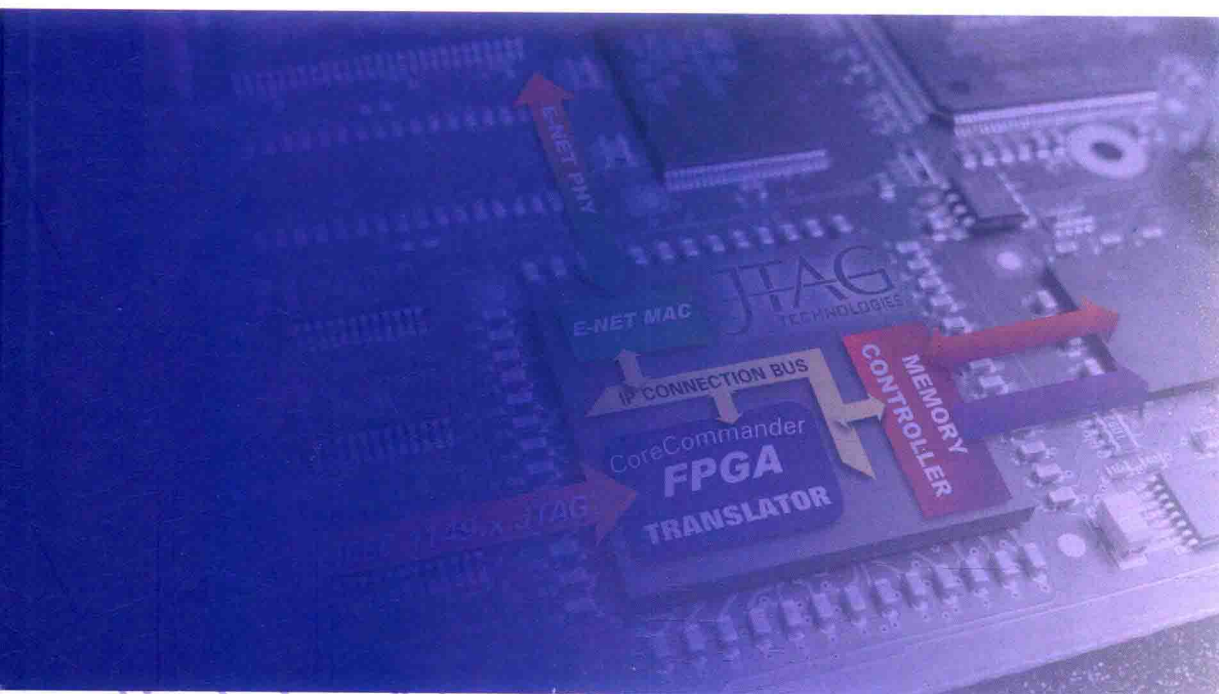


# 数字信号处理算法优化分析及 FPGA 实现技术

Optimization Analysis and FPGA Implementation Technology  
of Digital Signal Processing Algorithms

◎ 高金定 著

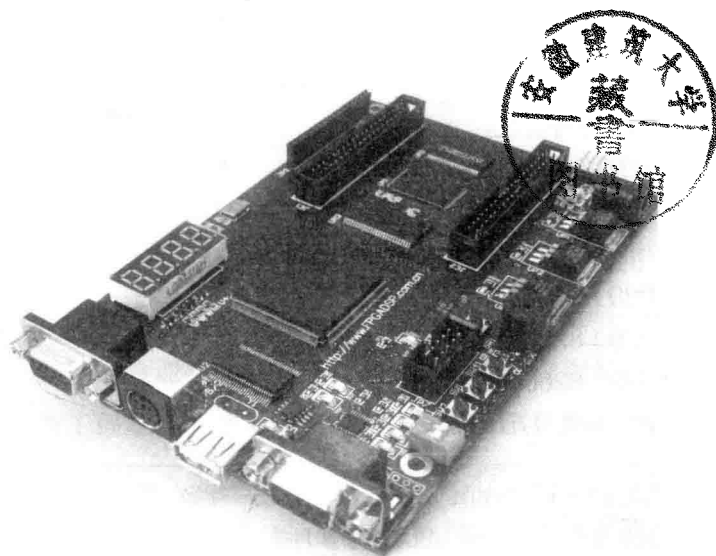


西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

# 数字信号处理算法优化分析 及 FPGA 实现技术

Optimization Analysis and FPGA Implementation Technology  
of Digital Signal Processing Algorithms

◇ 高金定 著



 西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

---

图书在版编目 ( CIP ) 数据

数字信号处理算法优化分析及 FPGA 实现技术 / 高金定著. —西安: 西安交通大学出版社, 2018. 6

ISBN 978-7-5693-0703-0

I. ①数… II. ①高… III. ①数字信号处理—最优化算法 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 139890 号

---

书 名 数字信号处理算法优化分析及 FPGA 实现技术  
著 者 高金定  
责任编辑 魏 杰 贺彦峰

---

出版发行 西安交通大学出版社  
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)  
网 址 <http://www.xjtupress.com>  
电 话 (029) 82668357 82667874 (发行中心)  
(029) 82668315 (总编办)  
传 真 (029) 82668280  
印 刷 湖南省众鑫印务有限公司

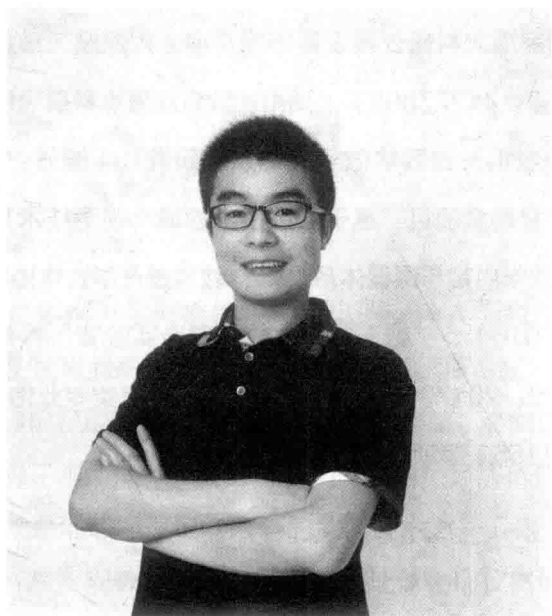
---

开 本 710mm×1000mm 1/16 印张 15 字数 220 千字  
版次印次 2018 年 6 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 978-7-5693-0703-0  
定 价 98.00 元

---

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题, 请与本社发行中心联系、调换。

版权所有, 侵权必究



**高金定** 男，1981 年生，湖南桃江人，工学博士，博士后，副教授，湖南省普通高等学校青年骨干教师，湖南省物联网学会理事，中文核心期刊《电测与仪表》、《兵器装备工程学报》杂志审稿专家。主要从事数字信号处理 FPGA 实现技术等方面的教学与研究，主持包括教育部产学研合作协同育人项目、湖南省科技计划项目等在内的省级及以上教学科研项目 7 项，在国内外期刊发表论文 30 余篇，其中 EI 收录 9 篇、CSCD 收录 15 篇。荣获湖南省普通高等教育省级优秀教学成果三等奖 1 项。

本书由：国家重大科研仪器设备研制专项“大深度三维矢量广域电磁法仪器研制”（编号：41227803）、湖南省教育厅重点科研项目“基于FPGA的广域电磁法接收机关键数字信号处理技术研究”（编号：15A106）、中南大学博士后研究基金项目“基于扩频技术的地电观测技术及实验装置”、“《EDA技术》教学内容与课程体系改革”教育部产学研合作协同育人项目（编号：201701067016）、“嵌入式技术校企联合实验室”教育部产学研合作协同育人项目（编号：201701067076）和“电子信息类专业化众创空间”（编号：201702071155）等项目资助出版。



## 前 言

广域电磁法是中南大学何继善院士提出的一种人工源频率域电磁测深方法,广域电磁法及其观测系统具有勘探深度大、观测范围广、工作效率高、适用性强等优势,目前已经在油气藏探测、页岩气勘探、金属矿探测、煤田采空区探测等方面取得了丰硕成果,已探明矿产资源潜在经济价值超过1100亿元。数字信号处理技术是地球物理仪器研制的关键技术之一,采用FPGA(现场可编程门阵列)芯片来实现数字信号处理对提高地球物理仪器的运行速度、缩小仪器体积、降低功耗具有重要的现实意义。

本专著在国家重大科研仪器设备研制专项“大深度三维矢量广域电磁法仪器研制”(编号:41227803)、湖南省教育厅重点科研项目“基于FPGA的广域电磁法接收机关键数字信号处理技术研究”(编号:15A106)、中南大学博士后研究基金项目“基于扩频技术的地电观测技术及实验装置”“《EDA技术》教学内容与课程体系改革”|教育部产学研合作协同育人项目(编号:201701067016)和教育部产学研合作协同育人项目“嵌入式技术校企联合实验室”(编号:201701067076)等项目的资助下,在第1代以DSP(数字信号处理器)为核心的广域电磁法接收机的基础上,采用DSP Builder系统建模的方法和割集重定时技术,对第2代以FPGA为核心的广域电磁法接收机中的关键数字信号处理技术FPGA实现方法进行了一系列的研究,为实现新一代广域电磁法接

收机复杂数字信号高速实时处理提供理论与技术支撑。

本专著介绍了频率域电磁法接收机中的数字信号处理技术,综述了地球物理仪器及其数字信号处理技术硬件实现的方法,介绍了基于 DSP Builder 系统建模 FPGA 高速实现的方法。在此基础上对数字信号处理算法的图形表示方法、关键路径、环路边界、迭代边界、流水线技术和割集重定时技术进行了深入的介绍。

首先,研究了常系数数字滤波器设计及优化方法。采用 DSP Builder 建模工具,完成了 FIR(有限冲击响应)低通数字滤波器和 IIR(无限冲激响应)工频数字滤波器的建模与仿真分析,并以广域电磁法接收机采集到的实际电场信号进行了测试。根据 FIR 滤波器线性相位的特性,对 FIR 滤波器结构进行了优化设计,在此基础上,利用前馈割集技术,提出了一种改进结构的高速 FIR 滤波器。测试结果表明:改进结构的 FIR 滤波器响应频率从原来的 66.81 MHz 提高到了 81.57 MHz,而资源消耗减少了约 50%,能够满足广域电磁法接收机高速实时数字滤波需求。

然后,研究了串行 LMS(最小均方误差)自适应滤波器 FPGA 高速实现方法。通过对串行 LMS 自适应滤波器系数更新部分加法器进行割集重定时,缩短了关键路径的长度,提出了一种改进结构的串行 LMS 自适应滤波器,构建了自适应噪声对消滤波模型并进行了仿真。仿真结果表明:在加法器等算术运算模块未引入流水线的情况下,串行 LMS 自适应滤波器最高响应频率从原来的 19.92 MHz 提高到了 22.81 MHz,提高了 14.5%。

在此基础上,针对普通串行 LMS 自适应滤波器运行速度受到计算滤波输出和系数更新时间限制的不足,对于平稳或缓慢变化环境,通过对自适应滤波器系数更新方程进行前瞻和松弛近似,对串行 LMS 自适应算法进行了优化分析,提出了一种松弛流水线结构 LMS 自适应滤波器并进行了仿真分析。仿真结果表明:优化后的 LMS 自适应滤波器最高响应频率均达到了 26 MHz 左右,比优化前提高了 30% 以上。

研究了 LMS 脉动阵列结构,根据割集重定时规则,对 M. D. Meyer 和 D. P.

Agrawal 提出的延迟型 LMS 自适应滤波器脉动阵列进行了优化设计, 得到了一种改进结构的脉动阵列结构。利用 DSP Builder 工具构建了改进前后 2 种结构脉动阵列模型并进行了一系列仿真, 仿真结果表明: 割集重定时优化后响应速度有明显的提升, 响应速度从原来的 46.39 MHz 提高到 83.03 MHz, 但多耗费了 63 个逻辑单元和 28 bit 存储器。

结合广域电磁法接收机实际电场信号的特点, 利用插值和抽取相结合的 I/D 有理数抽样率转换技术, 提出了满足广域电磁法接收机数字信号处理要求的等长度 FFT (快速傅里叶变换) 变换技术, 将各频组 FFT 变换点数统一变换到 1 024 点, 并从理论仿真和广域电磁法接收机实际电场信号测试这 2 个层面进行了论证。结果表明: 在对广域电磁法接收机实际信号进行 FIR 低通滤波后, 能够通过插值和抽取相结合的方法, 将各个频组 FFT 变换的长度统一变换成 1 024 点, 这彻底解决了广域电磁法接收机信号各个频组 FFT 变换长度不统一、不适合 FPGA 实现的技术难题。利用 Altera 公司的 FFT IP 核, 实现了 1 024 点 FFT 变换并进行了测试。本书提出的等长度 FFT 变换技术完全能够满足广域电磁法接收机 FFT 变换实时实现的技术需求。

最后, 提出了以 FPGA 为核心的广域电磁法接收机数字信号处理平台的 2 种设计方案, 设计了以 EP3C80 型 FPGA 为核心、基于 Nios II 嵌入式软核处理器的广域电磁法接收机数字信号处理平台。研究了 ADS1282 高精度串行模数转换芯片连续读数模式和指令读数模式采样控制和数据采集系统的设计, 并进行了时序仿真及其分析。

本专著是在本人博士生导师中南大学何继善院士的悉心指导下完成的。何老师渊博的学识、正直高尚的品格和豁达的人生态度, 给我留下了深刻的印象。正是他的精心指导和耐心教诲, 我才得以顺利完成写作; 同时, 导师严谨的治学精神、敏锐的思维、一丝不苟的工作态度时刻激励着我, 给我启迪, 让我终身受益。在此谨向何老师致以衷心的感谢!

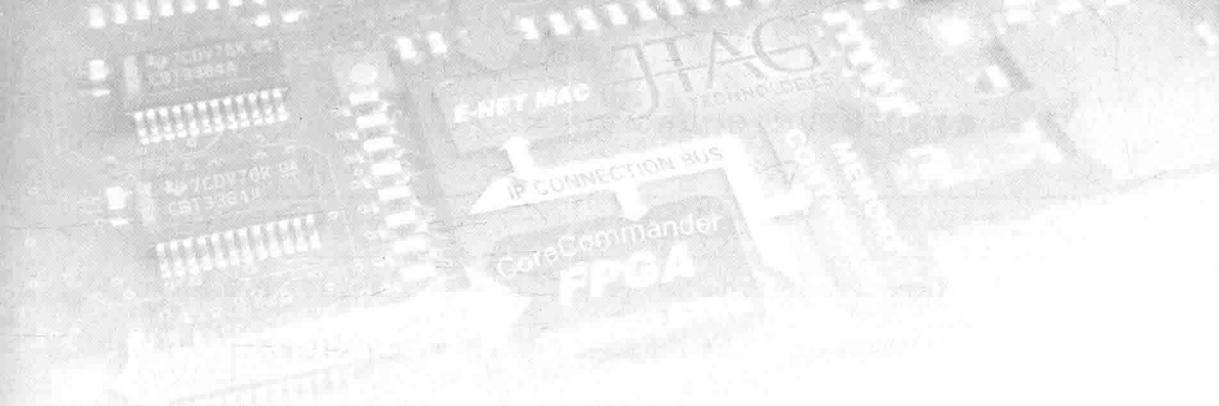
中南大学地球科学与信息物理学院蒋奇云博士给我提供了广域电磁法接收机野外实测数据, 在本专著修改与完善方面提出了非常多的宝贵意见和很多



很好的想法，在此表示感谢！中南大学地球科学与信息物理学院汤井田教授、温佩琳教授、席振铎教授、戴世坤教授、李帝铨教授等老师在百忙之中对我的专著提出了许多宝贵的修改意见，在此深表感谢！此外，非常感谢湖南涉外经济学院信息科学与工程学院邬书跃教授、许慧燕副教授、董莉博士、廖亦凡副教授、侯玉宝老师、冯劼老师等同事们，与你们一起共事，很愉快！

感谢我的家人，是他们的鼓励与支持，是他们的辛勤，是他们的期望时刻激励着我，给我力量，让我一往无前！最后，我要感谢我的爱人周亚和宝贝女儿高子轩，她们是我心灵的港湾，因为有她们，我的生活充满阳光！

由于本人水平有限，书中的不妥和错误在所难免，恳请各位专家、读者不吝指正。



## 符号说明

| 缩写字母      | 英文全称                                                  | 中文译名      |
|-----------|-------------------------------------------------------|-----------|
| 3G        | Third Generation                                      | 第三代移动通信   |
| ASIC      | Application-Specific Integrated Circuits              | 专用集成电路    |
| ASSP      | Application-Specific Standard Products                | 专用标准电路模块  |
| CSAMT     | Controlled Source Audio-frequency<br>Magnetotellurics | 可控音频大地电磁法 |
| CDMA      | Code Division Multiple Access                         | 码分多址      |
| CDMA 2000 | Code Division Multiple Access 2000                    | 码分多址 2000 |
| DSP       | Digital Signal Processing                             | 数字信号处理    |
| EDA       | Electronic Design Automation                          | 电子设计自动化   |
| FIFO      | First IN First Out                                    | 先进先出      |
| FIR       | Finite Impulse Response                               | 有限冲击响应    |
| FFT       | Fast Fourier Transformation                           | 快速傅里叶变换   |
| FPGA      | Field Programmable Logic Device                       | 现场可编程门阵列  |
| FSK       | Frequency-Shift Keying                                | 频移键控      |
| FSM       | Finite State Machine                                  | 有限状态机     |
| GSM       | Global system for Mobile communications               | 全球移动通讯系统  |

| 缩写字母     | 英文全称                                     | 中文译名          |
|----------|------------------------------------------|---------------|
| GPRS     | General Packet Radio Service             | 通用分组无线业务      |
| HDL      | Hardware Description Language            | 硬件描述语言        |
| IC       | Integrated Circuits                      | 集成电路          |
| IIR      | Infinite Impulse Response                | 无限冲击响应        |
| IMT 2000 | International Mobile Telecom-munication  | 国际移动通信系统 2000 |
| IP       | Intellectual Property                    | 知识产权          |
| ISV      | Instanta Square Value                    | 瞬时平方值         |
| LMS      | Least Mean Square                        | 最小均方误差        |
| MAC      | Multiply Accumulate                      | 乘法器           |
| MSE      | Mean Square Error                        | 均方误差          |
| RLS      | Recursive Least-Square                   | 最小二乘          |
| RTL      | Register Transfer Level                  | 寄存器传输级        |
| SDRAM    | Synchronous Dynamic Random Access Memory | 同步控制动态存储器     |
| SoC      | System-on-Chip                           | 片上系统          |
| SRAM     | Static Random Access Memory Chip         | 静态随机存取存储器     |
| TDMA     | Time Division Multiple Access            | 时分多址          |
| TD-SCDMA | Time Division-synchronous CDMA           | 时分同步码分多址      |
| VHDL     | VHSIC Hardware Description Language      | 超高速集成电路硬件描述语言 |
| WLS      | Weighting Least-Square                   | 加权最小二乘        |
| WCDMA    | Wideband Code Division Multiple Access   | 宽带码分多址        |



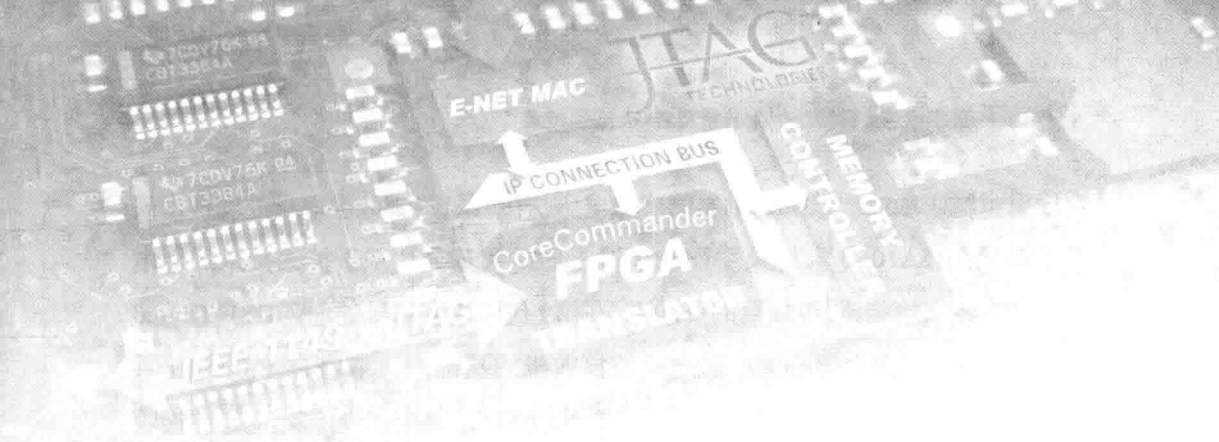
# 目 录

|                                              |    |
|----------------------------------------------|----|
| 第 1 章 概 述 .....                              | 1  |
| 1.1 研究背景 .....                               | 1  |
| 1.2 典型频率域电磁法接收机中的数字信号处理技术 .....              | 2  |
| 1.2.1 双频激电法和伪随机电法接收机 .....                   | 2  |
| 1.2.2 广域电磁法接收机 .....                         | 4  |
| 1.3 电磁法接收机数字信号处理技术硬件实现方法综述 .....             | 6  |
| 1.4 基于 DSP Builder 的数字信号处理 FPGA 高速实现方法 ..... | 9  |
| 1.5 专著的主要内容及基本构架 .....                       | 11 |
| 第 2 章 割集重定时技术 .....                          | 15 |
| 2.1 引 言 .....                                | 15 |
| 2.2 数字信号处理算法图形表示方法 .....                     | 15 |
| 2.2.1 框图 .....                               | 16 |
| 2.2.2 信号流图 .....                             | 16 |
| 2.2.3 数据流图 .....                             | 18 |
| 2.2.4 依赖图 .....                              | 18 |
| 2.3 迭代边界 .....                               | 19 |
| 2.3.1 关键路径 .....                             | 20 |
| 2.3.2 环路边界与迭代边界 .....                        | 20 |
| 2.4 重定时技术 .....                              | 22 |

|                                              |    |
|----------------------------------------------|----|
| 2.4.1 重定时技术的定义 .....                         | 22 |
| 2.4.2 割集重定时与流水线 .....                        | 24 |
| 2.5 本章小结 .....                               | 27 |
| 第 3 章 基于 DSP Builder 的常系数数字滤波器设计及仿真分析 .....  | 29 |
| 3.1 常系数数字滤波器结构 .....                         | 29 |
| 3.1.1 FIR 滤波器结构 .....                        | 29 |
| 3.1.2 IIR 滤波器结构 .....                        | 30 |
| 3.2 基于 DSP Builder 的数字滤波器设计流程 .....          | 33 |
| 3.3 基于 DSP Builder 的 FIR 滤波器优化设计及其仿真分析 ..... | 34 |
| 3.3.1 FIR 滤波器设计指标及参数计算 .....                 | 34 |
| 3.3.2 普通结构 FIR 滤波器建模仿真与结果分析 .....            | 35 |
| 3.3.3 FIR 滤波器优化设计及其仿真分析 .....                | 39 |
| 3.3.4 广域电磁法接收机野外实际信号测试 .....                 | 49 |
| 3.4 基于 DSP Builder 的 IIR 工频滤波器设计及其仿真分析 ..... | 53 |
| 3.4.1 IIR 工频滤波器设计指标及参数计算 .....               | 53 |
| 3.4.2 直接 II 型 IIR 工频滤波器建模及仿真分析 .....         | 55 |
| 3.4.3 级联型 IIR 工频滤波器建模及仿真分析 .....             | 57 |
| 3.4.4 广域电磁法接收机野外实际信号测试 .....                 | 61 |
| 3.5 本章小结 .....                               | 66 |
| 第 4 章 串行 LMS 自适应滤波器结构研究及 FPGA 实现 .....       | 67 |
| 4.1 自适应滤波器概述 .....                           | 68 |
| 4.2 LMS 自适应算法及其滤波器结构 .....                   | 74 |
| 4.3 LMS 算法自适应噪声对消原理 .....                    | 76 |
| 4.4 LMS 算法仿真分析 .....                         | 78 |
| 4.4.1 2FSK 信号的产生 .....                       | 79 |
| 4.4.2 LMS 自适应滤波器仿真与分析 .....                  | 79 |

|                                               |            |
|-----------------------------------------------|------------|
| 4.5 LMS 自适应滤波器结构优化设计 .....                    | 82         |
| 4.6 建模仿真与结果分析 .....                           | 88         |
| 4.7 本章小结 .....                                | 102        |
| <b>第 5 章 平稳环境下 LMS 算法优化分析及其 FPGA 实现 .....</b> | <b>105</b> |
| 5.1 弛豫超前变换技术 .....                            | 106        |
| 5.1.1 超前变换与流水线 .....                          | 106        |
| 5.1.2 乘积松弛技术 .....                            | 107        |
| 5.1.3 求和松弛技术 .....                            | 109        |
| 5.1.4 延迟松弛技术 .....                            | 110        |
| 5.2 平稳环境下 LMS 算法优化分析 .....                    | 110        |
| 5.3 仿真与结果分析 .....                             | 114        |
| 5.4 本章小结 .....                                | 122        |
| <b>第 6 章 LMS 算法脉动阵列结构研究及其 FPGA 实现 .....</b>   | <b>123</b> |
| 6.1 引言 .....                                  | 123        |
| 6.2 脉动阵列设计方法 .....                            | 124        |
| 6.3 LMS 算法脉动阵列结构及其优化设计 .....                  | 127        |
| 6.4 仿真与结果分析 .....                             | 129        |
| 6.5 本章小结 .....                                | 136        |
| <b>第 7 章 广域电磁法接收机数字信号等长度 FFT 变换实现技术 .....</b> | <b>137</b> |
| 7.1 FFT 快速傅里叶变换与频谱分析 .....                    | 137        |
| 7.1.1 DFT 离散傅里叶变换及其快速算法 .....                 | 137        |
| 7.1.2 按时间抽取的 FFT 快速傅里叶变换算法 .....              | 138        |
| 7.1.3 FFT 快速傅里叶变换与频谱分析 .....                  | 140        |
| 7.2 广域电磁法接收机 FFT 变换 FPGA 实时实现技术 .....         | 141        |
| 7.2.1 广域电磁法接收机信号特点 .....                      | 141        |
| 7.2.2 广域电磁法接收机数字信号等长度 FFT 变换实现技术方案 .....      | 142        |

|                                                |            |
|------------------------------------------------|------------|
| 7.2.3 实际信号直接抽取存在的问题及解决方案 .....                 | 146        |
| 7.2.4 广域电磁法接收机数字信号等长度 FFT 变换技术实测 .....         | 148        |
| 7.2.5 基于 IP 核的 1024 点 FFT 实时实现技术 .....         | 151        |
| 7.3 基于 DSP Builder 的 FFT 变换实现技术 .....          | 157        |
| 7.4 本章小结 .....                                 | 166        |
| <b>第 8 章 基于 FPGA 的广域电磁法接收机数字信号处理平台设计 .....</b> | <b>167</b> |
| 8.1 平台设计方案 .....                               | 167        |
| 8.1.1 基于嵌入式硬核处理器的设计方案 .....                    | 167        |
| 8.1.2 基于 Nios II 嵌入式软核处理器的设计方案 .....           | 169        |
| 8.2 基于 FPGA 的广域电磁法接收机数字信号处理平台电路设计 ..           | 170        |
| 8.2.1 整体框图 .....                               | 170        |
| 8.2.2 单元电路设计 .....                             | 172        |
| 8.3 基于 FPGA 的广域电磁法观测系统 PCB 设计 .....            | 187        |
| 8.3.1 PCB 设计参数 .....                           | 187        |
| 8.3.2 元器件清单 .....                              | 188        |
| 8.3.3 PCB 设计图 .....                            | 190        |
| 8.4 基于 ADS1282 的高精度数据采集系统设计 .....              | 192        |
| 8.4.1 连续读数模式数据采集系统的设计 .....                    | 192        |
| 8.4.2 指令读数模式数据采集系统的设计 .....                    | 200        |
| 8.5 本章小结 .....                                 | 211        |
| <b>第 9 章 结 论 .....</b>                         | <b>213</b> |
| 9.1 本专著主要研究成果 .....                            | 213        |
| 9.2 存在的问题及下一步研究工作 .....                        | 215        |
| <b>参考文献 .....</b>                              | <b>217</b> |



# 第1章 概述

## 1.1 研究背景

自从 1835 年 R. W. Fox 首次在 Cornwall 铜矿上作自然电位法观测以来，电法勘探得到了迅速的发展<sup>[1-2]</sup>。从自然电场法到直流电阻率法，从 H. O. Seigel 和 B. A. Komapob 为代表提出的时间域激电到 J.Wait 首创的变频激电法，从美国的 K. Zonge 提出的奇次谐波法到中南大学何继善院士发明的双频激电及  $a_k^p$  序列伪随机信号电法，从苏联的 A.ТИХОНОВ 和法国 Carniard 分别提出的 MT (Magnetotelluric) 大地电磁法到多伦多大学 Myron Goldtein 提出的 CSAMT 可控源音频大地电磁法，再到中南大学何继善院士发明的广域电磁法，电法勘探新方法、新技术不断涌现，为全世界资源勘探立下了汗马功劳<sup>[3-6]</sup>。

随着电子信息技术的发展，电法仪器接收机正朝着数字化、多功能、网络化、智能化等方向发展。数字信号处理技术是电法仪器接收机中的关键技术之一，现场可编程门阵列 FPGA (Field Programmable Gate Array) 芯片采用基于查找表 LUT (Look-Up Table) 的硬件结构，具有全硬件并行执行、可重配置等特性，在高速实时海量数字信号处理中具有独特的优势。因此，用 FPGA 芯片来实现电法仪器接收机数字信号处理对提升仪器的可靠性、缩小仪器体积、降低功耗具有重要的实际意义。

本专著在国家重大科研仪器设备研制专项 (编号: 41227803)、湖南省教



育厅重点科研项目“基于 FPGA 的广域电磁法接收机关键数字信号处理技术研究(编号: 15A106)”以及中南大学博士后研究基金“基于扩频技术的地电观测技术及实验装置”等项目的资助下,在第 1 代以数字信号处理器 DSP(Digital Signal Processor)为核心的广域电磁法接收机的基础上,采用 DSP Builder 系统建模的方法和割集重定时技术,对第 2 代以 FPGA 为核心的广域电磁法接收机中的关键数字信号处理技术 FPGA 实现方法进行了一系列的研究,为实现新一代广域电磁法接收机复杂数字信号高速实时处理提供理论与技术支撑。

## 1.2 典型频率域电磁法接收机中的数字信号处理技术

### 1.2.1 双频激电法和伪随机电磁法接收机

双频激电法是中南大学何继善院士发明的一种地球物理勘探方法<sup>[7]</sup>,图 1-1 是双频激电法接收机框图<sup>[6-7]</sup>。由图 1-1 可知,双频激电法接收机主要由模拟信号处理模块和数字信号处理模块这 2 个部分组成。被测双频信号经阻抗均衡及阻抗变换后,送入 50 Hz 的双 T 型工频滤波器,滤除工频干扰,然后再经过前置程控放大后送入高通和低通滤波器进行选频放大,之后再送入主放大器进行放大。经主控放大器放大之后的双频信号分别送入低频通道和高频通道的带通滤波器选出高频及低频正弦波信号,再经过精密检波和积分电路分别输出低频和高频电位差。该电位差再经过模数转换 A/D(Analog to Digital)转换电路转换成数字信号送入微处理器进行数字信号处理,然后计算并显示出高低频电位差  $\Delta V_H$  和  $\Delta V_L$  以及视幅频率  $F_s$  和视电阻率  $\rho_s$  等观测参数。

20 世纪 90 年代初,中南大学何继善院士在双频激电法观测方案的基础上,提出了伪随机电磁法方案,并研制了具有自主知识产权的仪器,并取得了较好的应用效果<sup>[8-12]</sup>。图 1-2 是中南大学何继善院士和陈儒军博士等人设计的多频伪随机激电仪器接收机信号处理框图。<sup>[13]</sup>