

FPGA 应用技术丛书



CD-ROM

- 程序源代码
- FPGA工程文件

# 数字滤波器的 MATLAB与FPGA实现

杜勇 路建功 李元洲 编著



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

FPGA 应用技术丛书

# 数字滤波器的 MATLAB 与 FPGA 实现

杜 勇 路建功 李元洲 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

## 内 容 简 介

本书以Xilinx公司的FPGA器件为开发平台,采用MATLAB及VHDL语言开发工具,详细阐述了数字滤波器的实现原理、结构、方法及仿真测试过程,并通过大量工程实例分析其在FPGA实现过程中的具体技术细节。其主要内容包括FIR滤波器、IIR滤波器、多速率滤波器、自适应滤波器、变换域滤波器、DPSK解调系统设计等。

本书思路清晰、语言流畅、分析透彻,在简明阐述设计原理的基础上,追求对工程实践的指导性,力求使读者在较短的时间内掌握数字滤波器的FPGA设计知识和技能。

本书适合于从事无线通信和数字信号处理领域的设计工程师、科研人员,以及相关专业的研究生、高年级本科生使用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

数字滤波器的 MATLAB 与 FPGA 实现 / 杜勇等编著. —北京: 电子工业出版社, 2012.3  
(FPGA 应用技术丛书)

ISBN 978-7-121-15869-8

I. ①数… II. ①杜… III. ①数字滤波器—Matlab 软件 ②现场可编程门阵列—应用—数字滤波器  
IV. ①TN713

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 021869 号

责任编辑: 田宏峰 特约编辑: 牛雪峰

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司  
装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 22.5 字数: 570 千字

印 次: 2012 年 3 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 59.00 元 (含光盘 1 张)

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zlt@phei.com.cn](mailto:zlt@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010) 88258888。

# 前 言

## 为什么要写这本书

进入 21 世纪以来,无线通信技术大踏步地朝着数字化、综合化、宽带化、智能化和个人化的方向发展。1992 年由 Jeo Mitola 提出的软件无线电技术早已不再只停留在理论研究的层面上,越来越多的基于软件无线电思想的无线通信产品走进我们的生活。毫无疑问,无线通信技术的最终实现必须以微电子技术为支撑,必须具备达到相应性能的硬件实现平台。ASIC (Application Specific Integrated Circuit, 专用集成电路)、DSP (Digital Signal Processing, 数字信号处理)、以 ARM (Advanced RISC Microprocessor, 高级精简微处理器) 技术为代表的 CPU (Central Processing Unit, 中央处理单元) 以及本书所采用的 FPGA (Field Programmable Gate Array, 现场可编程门阵列) 技术, 已成为当今电子信息技术设计的四大基石。其中, FPGA 以其功能强大、开发周期短、投资少、可重复修改, 以及高度灵活的使用特性和无与伦比的并行运算能力, 在电子通信领域得到了越来越广泛的应用, 并已逐渐成为产品实现的首选方案。

近年来, 随着 FPGA 技术的广泛应用, 介绍 FPGA 相关知识的书籍可谓汗牛充栋, 介绍如何采用 FPGA 来实现无线通信技术的书籍却寥若晨星。作者在进行无线通信相关产品的研发时, 深感具有参考意义的专著资料的匮乏。FPGA 是一种应用相对普遍的技术手段和途径, 而无线通信技术本身是一门相当专业的知识领域, 要将两者有机地结合起来, 并熟练应用到产品的设计中, 工程师不仅需要熟练掌握 FPGA 技术, 还需要具有较扎实的通信专业理论知识。

目前市场上有少量几本介绍 FPGA 实现无线通信技术的书籍, 但无线通信技术本身十分复杂, 且种类繁多, 在一本书中全面介绍无线通信技术的 FPGA 实现难免有所遗漏, 且内容难以做到翔实。作者最初的写作计划也是涉及 FPGA 实现整个无线通信技术的内容, 但在拟定写作提纲的时候, 确实感到内容过于浩大, 因而迟迟没有动笔。因为写出的书对工程技术人员具有实际可操作的参考价值是写作的本意, 如果内容涉及过于广泛, 就难以做到对每个技术实现细节的详细论述了。

既然全面论述无线通信实现技术的难度太大, 自然想到缩小范围, 正所谓“攻其一点, 不及其余”。无线通信技术的关键技术大致可分为滤波器技术、同步技术、解调技术, 而其中的数字滤波器是无线通信以及数字信号处理技术中的核心技术, 是无线通信系统不可或缺的重要组成部分, 且使用范围极其广泛, 其性能的优劣在很大程度上直接决定了系统的性能。虽然论述 FPGA 实现数字滤波器的学术论文很多, 但国内目前还没有专门讲解 FPGA 实现数字滤波器的教材, 只有少量对无线通信技术的 FPGA 实现进行全面阐述的著作, 针对数字滤波器的 FPGA 实现这一主题探讨还不够充分。鉴于数字滤波器在无线通信及数字信号处理领域的重要作用及应用的广泛性, 十分有必要从工程实践角度出发, 对数字滤波器的 FPGA 实现进行专门著述讨论。

从作者的个人从业经验来看，刚毕业的工科院校学生极少有机会参加实际工程设计，在工作中往往感到学校所学的理论知识很难与实际工程产品的实现联系起来。尤其对于无线通信专业来讲，到真正进行工程设计时才发现根本无从下手。采用 MATLAB、System View 等软件对通信理论进行仿真，虽然可以直观地验证算法的正确性，并查看仿真结果，但这类软件的仿真毕竟只停留在算法或模型的仿真上，与真正的工程设计及实现是两个完全不同的概念。FPGA 技术很好地解决了这一问题。FPGA 技术本来就是基于工程应用的技术，其仿真技术可以很好地仿真产品实际的工作情况，尤其是时序仿真技术，在计算机上通过了时序仿真的程序设计，几乎不再需要修改就可以直接应用到工程中。这种设计、验证、仿真方式可以极好地将理论与工程设计结合起来，从而提高学习兴趣。因此，完全有必要从工程应用的角度，讲解采用 FPGA 进行数字滤波器设计的原理、方法、手段、仿真、测试及实现过程。

## 本书的内容安排

第 1 章首先介绍了滤波器的基本概念、FPGA 的基本知识，以及 Xilinx 公司的主要器件。本章在介绍了 FPGA 的发展历程、结构及工作原理等基本知识后，对 FPGA 设计中经常使用到的各种 IP 核进行了简要说明。目前的 FPGA 厂家主要有 Xilinx 公司及 Altera 公司。两家公司几乎都有性能相近的产品，但所使用的开发工具无法通用。Xilinx 公司作为 FPGA 的发明者及 FPGA 行业的领导者，通过不断应用尖端技术来长久保持它的行业领袖地位。由于不同器件的结构不同，因此各有其合理的应用领域，为了提高设计性能并节约产品成本，了解器件基本特性，合理选择最终的目标器件显得尤为重要。因此，本章最后对 Xilinx 公司的主要芯片进行了介绍，在后续章节中也将利用 Xilinx 公司的 Spartan 及 Virtex 系列 FPGA 器件作为目标实现平台进行讲解。

第 2 章首先介绍了硬件描述语言的基本概念及优势，并对 VHDL 语言进行了简要介绍。对本书使用到的软件开发仿真环境——ISE 开发套件、Modelsim 仿真软件、Synplicity 综合软件以及 MATLAB 软件也进行了简要介绍。最后以一个简单的混频器设计实例较为详细地阐述了 FPGA 与 MATLAB 软件进行联合开发的过程，这也是本书后续章节在讲述各种滤波器设计时所采用的基本方法和流程。数字滤波器的 FPGA 设计与实现是一项将理论与实践紧密结合的技术，要求设计者不仅要十分清楚数字滤波器以及数字信号处理的基本原理，同时还需要掌握 MATLAB 软件的使用方法、VHDL 编程以及 FPGA 实现技术。

数字信号在 FPGA 等硬件系统中实现时，由于受寄存器长度的限制，不可避免地会产生有效字长效应。设计工程师必须了解字长效应对数字系统可能带来的影响，并在实际设计中通过仿真来确定最终的量化位数、寄存器长度等内容。第 3 章在详细分析了字长效应在 FPGA 设计中的影响后，对几种常用的运算模块 IP 核进行介绍，详细阐述了各 IP 核控制参数的设置方法，并给出了几个简单的模块应用实例。IP 核在 FPGA 设计中的应用十分普遍，尤其在数字滤波器等信号处理领域，采用设计工具提供的 IP 核进行设计，不仅可以提高设计效率，而且可以保证设计的性能。

读者如果已经具备一定的 FPGA 设计知识、MATLAB 软件使用常识，可以跳过本书前 3 章，直接阅读本书的后续内容。

从第 4 章开始，本书正式讨论各种数字滤波器的 FPGA 实现。FIR 滤波器是数字滤波器中最常见、使用最广泛的一种滤波器。为便于读者深入了解 FIR 滤波器的设计原理及方法，

本章简要讲述了与数字滤波器设计相关的基础理论知识。接着对常用的 MATLAB 函数设计方法进行了介绍。采用 MATLAB 设计出符合要求的滤波器系数后,还应采用 VHDL 等硬件编程语言进行设计实现。根据 FPGA 的结构特点,具体实现 FIR 滤波器时有几种不同的设计方法,本章详细阐述了几种常用结构的设计方法,最后介绍了 ISE11.3 提供的功能强大的 FIR 核。在实际工程设计中,如果目标器件提供了相应的 FIR 核,则建议读者尽量采用 IP 核的方法进行设计实现。

第 5 章讨论了 IIR 滤波器的 FPGA 实现。IIR 滤波器因其较高的滤波效率,十分利于在不需要严格相位特性的系统中使用。本章在介绍 IIR 滤波器基本原理时,重点对 IIR 与 FIR 滤波器的异同点进行了比较。接下来对常用的 5 种 IIR 滤波器设计函数进行了介绍,并比较了几种设计函数的滤波性能。IIR 滤波器的 FPGA 实现相对于 FIR 滤波器来讲要复杂一些,主要原因在于其反馈结构,并且目前的 FPGA 设计软件并没有提供通用的 IP 核使用。本章详细阐述了 IIR 滤波器的 FPGA 实现过程,以及实现过程中需要注意的系数量化方法、计算输出数据位宽、MATLAB 仿真及 FPGA 实现后仿真等关键问题。

第 6 章首先介绍了多速率信号处理的一些基本概念,以及多速率信号处理的一般步骤。抽取与内插是多速率信号处理的基础,读者需要从原理上了解抽取与内插的具体过程,以及对信号在时域及频域的影响。抽取与内插操作本身十分简单,多速率信号处理的关键问题是如何有效设计滤波器。CIC 滤波器的结构简单,没有乘法器,只有加法器、积分器和寄存器,适合于在高采样率条件下工作。半带滤波器可以使 2 倍抽取的每秒乘法次数比一般线性相位的 FIR 滤波器减少近 1/2,因此特别适合应用于转换率为 2 的整数次幂变换的系统。需要注意的是,CIC 滤波器及半带滤波器虽然十分节约资源,但均有其特定的使用条件。本章最后介绍了另一种在多速率信号处理中使用十分广泛的多相分解技术,并通过具体实例展示了多相结构滤波器的性能优势。

第 7 章首先对自适应滤波器的概念、应用及一般原理进行了简单介绍,而后针对应用广泛的 LMS 算法原理、实现结构进行了阐述,并采用 MATLAB 对 LMS 算法进行了仿真验证。以 LMS 算法为基础,本章分别以通道失配校正系统、自适应均衡器、智能天线阵为具体实例,详细阐述了 FPGA 实现自适应滤波器算法的步骤、方法及过程。为给读者提供更多的设计参考,在讨论上述不同自适应滤波器的 FPGA 实现过程中,分别以常规 LMS 算法、符号 LMS 算法进行讨论。自适应滤波器相对于常规滤波器来讲,在 FPGA 实现过程中,关键在于清楚掌握算法实现过程中各数据变量的变化范围,并以此确定各中间变量的数据字长及小数点位置,同时还需根据各运算步骤所需的运算量,合理分配各时钟周期内的运算量,以提高系统的整体运算速度。

相对于时域滤波器而言,变换域滤波器给出了一个全新的滤波器设计思路。一些在时域无法滤除的干扰信号,在变换域可十分容易地滤除。具体选择哪种滤波器,要根据输入信号的统计特征、滤波器实现的复杂度、运算速度等因素综合考虑。第 9 章首先对变换域滤波器的基本概念、快速傅里叶变换(FFT)、ISE 提供的 FFT 核等内容进行了简单介绍,这些知识都是进行变换域滤波器设计的基础。本章重点对变换域滤波器实现抗窄带干扰的 FPGA 设计与实现进行了详细讨论。采用变换域滤波技术实现窄带干扰滤除的原理并不复杂,在 FPGA 设计与实现过程中,难点在于准确把握各模块之间、各运算步骤之间,以及各信号接口之间的时序关系,并在设计中严格按照这些时序关系进行程序的编写。从这个实例中读者可以进一步体会到时序在 FPGA 设计中的重要性。

为了使读者对通信系统的 FPGA 实现有更完整的认识, 本书最后一章以一个完整的 DPSK 解调系统为实例, 在简单介绍数字接收机、DPSK 调制解调原理的基础上, 详细讨论了整个工程设计的全过程。尤其对载波环路的参数设计、FPGA 实现细节进行了详尽的分析, 并给出了具有指导意义的几个设计原则。在整个工程设计过程中, 可以看到, 滤波器仍然是解调系统的重要组成部分, 其性能的优劣直接影响到整个系统的性能。通过详细分析讨论, 并动手设计整个 DPSK 解调系统, 相信读者会对无线通信技术的 FPGA 实现方法、手段、过程有较为深刻的理解。

## 本书的目标

随着 FPGA 技术的发展, FPGA 技术在电子通信领域的应用已经十分普遍, 并且已逐渐成为现代电子工程师所必须掌握的技能之一。数字滤波器技术本身具有较强的专业性, 但在无线通信、数字信号处理领域几乎是必备的功能单元, 其设计的优劣直接影响到系统性能。在采用 FPGA 进行数字滤波器、无线通信相关工程设计时, 设计者需要同时掌握 FPGA 设计方法以及数字信号处理相关理论知识。同时在两个领域查阅资料, 需要耗费设计者大量的精力。

作者在写作本书的过程中, 兼顾数字滤波器理论, 以及工程设计过程的完整性, 重点突出 FPGA 设计方法、结构、实现细节以及仿真测试方法; 本书追求对工程实践的指导性, 力求使读者在较短的时间内掌握数字滤波器的 FPGA 设计知识和技能, 为相关从业人员提供快速解决问题的方法和途径。书中的理论介绍力求精练, 且围绕着工程设计所要掌握的知识展开。在讲述具体 FPGA 实现时, 则尽量做到详尽、细致, 从参数设计、量化字长到测试仿真、实现性能评估都给出明确的结论, 最大限度地为工程技术人员提供有益的参考。相信读者在阅读完本书之后按照书中的实例进行逐一验证, 不仅可以掌握数字滤波器技术的设计、实现方法, 同时也会从理论上对无线通信技术、数字信号处理技术有更深入的理解, 从而进一步将通信及数字信号处理理论与工程实践结合起来。

## 如何使用本书

本书讨论的是数字滤波器的 MATLAB 与 FPGA 实现。相信大部分工科院校的学生对 MATLAB 软件应该都会有一个基本的了解。由于其易用性及强大的功能, MATLAB 已经成为数学分析、信号仿真、数字处理必不可少的工具; 而且, MATLAB 具有专门针对数字信号处理的常用函数, 如滤波器函数、傅里叶分析函数等, 在进行数字滤波器设计时, 借用 MATLAB 常常会起到事半功倍的效果。因此, 在具体讲解某个实例时, 通常会采用 MATLAB 作为仿真验证工具。

第 2 章的混频器设计实例给出了完整的 FPGA 设计过程, 也给出了全书实例讲解的基本步骤和方法。先采用 MATLAB 对需要设计的工程进行仿真, 一方面仿真算法过程及结果, 另一方面生成 FPGA 测试仿真所需的测试输入数据; 而后在 ISE 平台上编写 VHDL 程序对实例进行设计实现; 编写 Testbench 测试激励文件, 采用 Modelsim 软件对 VHDL 程序进行行为和时序仿真; 查看 Modelsim 仿真波形结果, 并将仿真数据写入外部文本文件中; 最后编写 MATLAB 程序, 对 Modelsim 仿真结果数据进行分析处理, 验证 FPGA 设计的正确性。

限于篇幅，实例的部分 MATLAB 程序代码或 VHDL 代码没有在书中列出，随书附带的光盘上收录了本书所有实例的源程序及工程设计资源。程序代码及工程文件按章节序号置于光盘根目录下，读者可以将其直接复制到本地硬盘中运行。需要说明的是，在大部分工程实例中，均需要由 MATLAB 产生 FPGA 测试所需的文本数据文件，或者由 MATLAB 读取外部文件进行数据分析，同时 FPGA 仿真的 Testbench 文件常常也需要从指定的路径下读取外部文件数据，或将仿真结果输出到指定的路径下。文本文件的路径均在程序中指定为绝对路径，如 `fid=fopen('D:\DuYong\Filter_VHDL\MultHalfBand\E6_11_Int_Sin.txt', 'w')`。因此，读者将 FPGA 工程文件或 MATLAB 程序复制到本地硬盘后，请将程序文件中指定文件的绝对路径的代码进行修改，以确保仿真测试程序在正确的路径下读取文件。

## 致谢

经过整整 18 个月的时间，终于完成了全书的写作。本书得以顺利完成并出版，首先要感谢电子工业出版社的大力支持。一直以来，都觉得电子工业出版社出版的电子类图书显得更为专业，能与这样一家出版社合作，对于从事电子通信行业的技术人员来讲，本身就是一件十分荣幸和高兴的事。尤其出版社田宏峰编辑的热情及极高的工作效率更让作者备受鼓舞。

本书第 2、3 章由路建功和李元洲共同完成，其余各章由杜勇完成，全书由杜勇统稿。作者在写作本书的过程中查阅了大量的资料，在此对资料的原作者及提供者表示衷心的感谢。最后还要感谢第一作者的妻子刘帝英女士，她也是本书的第一位读者，在工作之余对本书进行了详尽而细致的校对；特别值得一提的是刚上小学的小女儿，晚上在家写作本书时，她常常会过来要求陪她玩，或者自告奋勇地说帮忙写字，使得漫长的写作过程中始终充满着一种平和、充实的快乐。

FPGA 技术博大精深，数字滤波器技术种类繁多且实现难度大。本书虽主要涉及与 FPGA 的数字滤波器实现相关的内容，仍感觉到难以详尽叙述工程实现的方方面面。由于作者水平有限，不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。交流请发邮件至 [duyongcn@yahoo.com.cn](mailto:duyongcn@yahoo.com.cn)。

作者  
2012 年 3 月



# 目 录 Contents

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| <b>第 1 章 数字滤波器及 FPGA 概述</b> | 1  |
| 1.1 滤波器概述                   | 3  |
| 1.1.1 滤波器简介                 | 3  |
| 1.1.2 数字滤波器的分类              | 4  |
| 1.1.3 滤波器的特征参数              | 6  |
| 1.2 FPGA 基本知识               | 6  |
| 1.2.1 FPGA 的基本概念及发展历程       | 6  |
| 1.2.2 FPGA 的结构和工作原理         | 8  |
| 1.2.3 IP 核的概念               | 13 |
| 1.3 FPGA 在数字信号处理中的应用        | 14 |
| 1.4 Xilinx 器件简介             | 15 |
| 1.4.1 Spartan 系列器件          | 17 |
| 1.4.2 Virtex 系列器件           | 20 |
| 1.4.3 PROM 芯片介绍             | 26 |
| 1.5 小结                      | 27 |
| <b>第 2 章 设计语言及环境介绍</b>      | 29 |
| 2.1 VHDL 语言简介               | 31 |
| 2.1.1 HDL 语言                | 31 |
| 2.1.2 VHDL 语言               | 32 |
| 2.2 FPGA 开发工具及设计流程          | 35 |
| 2.2.1 ISE 开发套件              | 35 |
| 2.2.2 Modelsim 仿真软件         | 39 |
| 2.2.3 Synplicity 综合软件       | 41 |
| 2.2.4 FPGA 设计流程             | 42 |
| 2.3 MATLAB 软件               | 44 |
| 2.3.1 MATLAB 软件简介           | 44 |
| 2.3.2 常用的信号处理函数             | 47 |
| 2.3.3 滤波器设计分析工具 FDATAOOL    | 54 |
| 2.4 MATLAB 与 ISE 的联合应用      | 55 |
| 2.4.1 MATLAB 与 ISE 的数据交换    | 55 |
| 2.4.2 混频器设计分析实例             | 56 |

|            |                            |            |
|------------|----------------------------|------------|
| 2.5        | 小结                         | 69         |
| <b>第3章</b> | <b>FPGA 实现数字信号处理基础</b>     | <b>71</b>  |
| 3.1        | 数的表示                       | 73         |
| 3.1.1      | 莱布尼茨与二进制                   | 73         |
| 3.1.2      | 定点数表示                      | 74         |
| 3.1.3      | 浮点数表示                      | 78         |
| 3.2        | 有限字长效应                     | 81         |
| 3.2.1      | 字长效应的产生因素                  | 81         |
| 3.2.2      | A/D 变换的字长效应                | 82         |
| 3.2.3      | 滤波器系数的字长效应                 | 83         |
| 3.2.4      | 滤波器运算中的字长效应                | 84         |
| 3.3        | FPGA 的常用运算模块               | 85         |
| 3.3.1      | 加法器模块                      | 85         |
| 3.3.2      | 乘法器模块                      | 88         |
| 3.3.3      | 除法器模块                      | 94         |
| 3.3.4      | CORDIC 运算模块                | 97         |
| 3.3.5      | 浮点运算模块                     | 99         |
| 3.4        | 小结                         | 101        |
| <b>第4章</b> | <b>FIR 滤波器的 FPGA 设计与实现</b> | <b>103</b> |
| 4.1        | FIR 滤波器的理论基础               | 105        |
| 4.1.1      | 线性时不变系统                    | 105        |
| 4.1.2      | FIR 滤波器的原理                 | 107        |
| 4.1.3      | FIR 滤波器的特性                 | 108        |
| 4.1.4      | FIR 滤波器的结构形式               | 112        |
| 4.2        | FIR 滤波器的设计方法               | 116        |
| 4.2.1      | 窗函数法                       | 117        |
| 4.2.2      | 频率取样法                      | 118        |
| 4.2.3      | 最优设计方法                     | 119        |
| 4.3        | FIR 滤波器的 MATLAB 设计         | 120        |
| 4.3.1      | 采用 fir1 函数设计               | 120        |
| 4.3.2      | 采用 kaiserord 函数设计          | 125        |
| 4.3.3      | 采用 fir2 函数设计               | 126        |
| 4.3.4      | 采用 firpm 函数设计              | 127        |
| 4.3.5      | 采用 FDATool 工具设计            | 129        |
| 4.4        | FIR 滤波器的 FPGA 实现           | 131        |
| 4.4.1      | 量化滤波器系数                    | 131        |
| 4.4.2      | 串行结构的 FPGA 实现              | 133        |
| 4.4.3      | 并行结构的 FPGA 实现              | 140        |
| 4.4.4      | 分布式结构的 FPGA 实现             | 143        |
| 4.4.5      | 不同结构的性能对比分析                | 148        |

|              |                                  |            |
|--------------|----------------------------------|------------|
| 4.4.6        | 采用 FIR 核实现                       | 148        |
| 4.5          | 小结                               | 153        |
| <b>第 5 章</b> | <b>IIR 滤波器的 MATLAB 与 FPGA 实现</b> | <b>155</b> |
| 5.1          | IIR 滤波器的理论基础                     | 157        |
| 5.1.1        | IIR 滤波器的原理及特性                    | 157        |
| 5.1.2        | IIR 滤波器的结构形式                     | 157        |
| 5.1.3        | IIR 与 FIR 滤波器的比较                 | 159        |
| 5.2          | IIR 滤波器的设计方法                     | 160        |
| 5.2.1        | 几种典型的模拟滤波器                       | 160        |
| 5.2.2        | 原型转换设计法                          | 163        |
| 5.2.3        | 直接设计法                            | 164        |
| 5.3          | IIR 滤波器的 MATLAB 设计               | 164        |
| 5.3.1        | 采用 butter 函数设计                   | 165        |
| 5.3.2        | 采用 cheby1 函数设计                   | 165        |
| 5.3.3        | 采用 cheby2 函数设计                   | 166        |
| 5.3.4        | 采用 ellip 函数设计                    | 166        |
| 5.3.5        | 采用 yulewalk 函数设计                 | 167        |
| 5.3.6        | 几种设计函数的比较                        | 167        |
| 5.3.7        | 采用 FDATool 工具设计                  | 169        |
| 5.4          | IIR 滤波器的 FPGA 实现                 | 170        |
| 5.4.1        | 量化直接型结构的系数及运算字长                  | 170        |
| 5.4.2        | 直接型结构的 FPGA 实现                   | 174        |
| 5.4.3        | 直接型结构 FPGA 实现后的测试仿真              | 180        |
| 5.4.4        | 量化级联型结构的系数                       | 184        |
| 5.4.5        | 级联型结构的 FPGA 实现                   | 185        |
| 5.4.6        | 级联型结构 FPGA 实现后的测试仿真              | 190        |
| 5.5          | 小结                               | 191        |
| <b>第 6 章</b> | <b>多速率滤波器的 FPGA 实现</b>           | <b>193</b> |
| 6.1          | 多速率信号处理基础知识                      | 195        |
| 6.1.1        | 多速率信号处理的概念及作用                    | 195        |
| 6.1.2        | 多速率信号处理的一般步骤                     | 196        |
| 6.1.3        | 软件无线电中的多速率处理                     | 196        |
| 6.2          | 抽取与内插处理                          | 198        |
| 6.2.1        | 整数倍抽取                            | 198        |
| 6.2.2        | 整数倍内插                            | 199        |
| 6.2.3        | 比值为有理数的抽样率转换                     | 202        |
| 6.3          | CIC 滤波器                          | 202        |
| 6.3.1        | CIC 滤波器的原理                       | 202        |
| 6.3.2        | CIC 滤波器的应用条件                     | 204        |
| 6.3.3        | 单级 CIC 滤波器的 FPGA 实现              | 206        |

|              |                        |            |
|--------------|------------------------|------------|
| 6.3.4        | 多级 CIC 滤波器的 FPGA 实现    | 208        |
| 6.3.5        | CIC 滤波器 IP 核的使用        | 215        |
| 6.4          | FIR 半带滤波器              | 218        |
| 6.4.1        | 半带滤波器的原理               | 218        |
| 6.4.2        | 半带滤波器的 MATLAB 设计       | 219        |
| 6.4.3        | 多级半带滤波器的设计             | 221        |
| 6.4.4        | 多级半带滤波器的 FPGA 实现       | 223        |
| 6.5          | 多相分解技术                 | 229        |
| 6.5.1        | 多相分解技术的一般概念            | 229        |
| 6.5.2        | 整数倍抽取器的多相结构            | 230        |
| 6.5.3        | 多相抽取器的 FPGA 实现         | 232        |
| 6.6          | 小结                     | 234        |
| <b>第 7 章</b> | <b>自适应滤波器的 FPGA 实现</b> | <b>235</b> |
| 7.1          | 自适应滤波器简介               | 237        |
| 7.1.1        | 自适应滤波器的概念              | 237        |
| 7.1.2        | 自适应滤波器的应用              | 238        |
| 7.1.3        | 自适应算法的一般原理             | 240        |
| 7.2          | LMS 算法                 | 242        |
| 7.2.1        | LMS 算法的原理              | 242        |
| 7.2.2        | LMS 算法的实现结构            | 242        |
| 7.2.3        | LMS 算法的字长效应            | 243        |
| 7.2.4        | 符号 LMS 算法原理            | 245        |
| 7.2.5        | LMS 算法的 MATLAB 仿真      | 245        |
| 7.3          | 自适应线性滤波器的 FPGA 实现      | 250        |
| 7.3.1        | 自适应线性滤波器原理             | 250        |
| 7.3.2        | 利用线性滤波器实现通道失配校正        | 250        |
| 7.3.3        | 校正算法的 MATLAB 仿真        | 251        |
| 7.3.4        | 校正算法的 VHDL 实现          | 253        |
| 7.3.5        | FPGA 实现后的仿真测试          | 257        |
| 7.4          | 自适应均衡器的 FPGA 实现        | 258        |
| 7.4.1        | 自适应均衡器原理               | 258        |
| 7.4.2        | 自适应均衡器的 MATLAB 仿真      | 259        |
| 7.4.3        | 自适应均衡器的 VHDL 实现        | 262        |
| 7.4.4        | FPGA 实现后的仿真测试          | 266        |
| 7.5          | 智能天线阵的 FPGA 实现         | 267        |
| 7.5.1        | 智能天线阵的概念及原理            | 267        |
| 7.5.2        | 自适应直线阵的 MATLAB 仿真      | 270        |
| 7.5.3        | 自适应天线阵的 VHDL 实现        | 272        |
| 7.5.4        | FPGA 实现后的仿真测试          | 274        |
| 7.6          | 小结                     | 275        |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| <b>第 8 章 变换域滤波器的 FPGA 实现</b> .....    | 277 |
| 8.1 变换域滤波器简介.....                     | 279 |
| 8.2 快速傅里叶变换.....                      | 279 |
| 8.2.1 离散傅里叶变换.....                    | 279 |
| 8.2.2 DFT 存在的问题.....                  | 281 |
| 8.2.3 FFT 算法的基本思想.....                | 282 |
| 8.2.4 FFT 算法的 MATLAB 仿真.....          | 283 |
| 8.3 FFT 核的使用.....                     | 285 |
| 8.3.1 FFT 核简介.....                    | 285 |
| 8.3.2 FFT 核的接口及时序.....                | 286 |
| 8.4 频域滤波器的原理及 MATLAB 仿真.....          | 288 |
| 8.4.1 抗窄带干扰滤波器的原理.....                | 288 |
| 8.4.2 检测门限的选取.....                    | 289 |
| 8.4.3 频域滤波器的 MATLAB 仿真.....           | 290 |
| 8.5 频域滤波器的 FPGA 实现.....               | 292 |
| 8.5.1 FPGA 实现的总体结构设计.....             | 292 |
| 8.5.2 速率变换模块的设计与实现.....               | 294 |
| 8.5.3 FFT 及滤波设计与实现.....               | 298 |
| 8.5.4 IFFT 及数据输出设计与实现.....            | 303 |
| 8.5.5 顶层文件设计及实现.....                  | 307 |
| 8.5.6 FPGA 实现后的仿真测试.....              | 309 |
| 8.6 小结.....                           | 310 |
| <b>第 9 章 DPSK 解调系统的 FPGA 实现</b> ..... | 311 |
| 9.1 数字接收机的一般原理.....                   | 313 |
| 9.1.1 通用数字接收机处理平台.....                | 313 |
| 9.1.2 基本调制解调技术.....                   | 314 |
| 9.1.3 改进的数字调制解调技术.....                | 316 |
| 9.2 DPSK 调制解调原理.....                  | 317 |
| 9.2.1 DPSK 调制原理及信号特征.....             | 317 |
| 9.2.2 DPSK 信号的 MATLAB 仿真.....         | 318 |
| 9.2.3 DPSK 解调原理.....                  | 321 |
| 9.3 DPSK 解调参数设计.....                  | 323 |
| 9.3.1 数字下变频器设计.....                   | 324 |
| 9.3.2 低通滤波器设计.....                    | 325 |
| 9.3.3 数字鉴相器设计.....                    | 326 |
| 9.3.4 环路滤波器设计.....                    | 326 |
| 9.3.5 载波同步环设计的一般步骤.....               | 329 |
| 9.4 Costas 环的 FPGA 实现.....            | 330 |
| 9.4.1 顶层模块的 VHDL 实现.....              | 330 |
| 9.4.2 鉴相器及环路滤波器的 VHDL 实现.....         | 332 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 9.4.3 Costas 环实现后的仿真测试 .....   | 334 |
| 9.5 符号同步环的 FPGA 实现 .....       | 335 |
| 9.5.1 符号同步环的实现结构 .....         | 335 |
| 9.5.2 符号同步环的 VHDL 实现 .....     | 336 |
| 9.6 DPSK 全系统的 FPGA 实现及测试 ..... | 338 |
| 9.6.1 码型变换的 VHDL 实现 .....      | 338 |
| 9.6.2 DPSK 解调全系统 VHDL 实现 ..... | 339 |
| 9.6.3 系统的仿真测试 .....            | 340 |
| 9.7 小结 .....                   | 341 |
| 参考文献 .....                     | 343 |



## 第 1 章

# 数字滤波器及FPGA概述

- 滤波器概述
- FPGA基本知识
- FPGA在数字信号处理中的应用
- Xilinx器件简介
- 小结





数字滤波器 (Digital Filter, DF) 一词出现在 20 世纪 60 年代中期, 通常定义为通过对数字信号的运算处理, 改变信号频谱, 完成滤波作用的算法或装置。由于电子计算机技术和大规模集成电路的发展, 数字滤波器既可用计算机软件实现, 也可用大规模集成数字硬件实时实现。数字滤波器在语音信号处理、图像信号处理、医学生物信号处理以及其他应用领域都得到了广泛的应用。

现场可编程门阵列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 因其良好的并行运算能力, 以及无与伦比的可重配置性、可扩展性能, 已经成为现代电子通信产品中不可或缺的组成部分, 尤其在数字滤波器设计等数字信号处理领域中得到了十分广泛的应用。Xilinx 公司作为 FPGA 器件的发明者和行业领导者, 通过对 FPGA 技术的不断创新, 不断推出了性能优良、价格低廉的 FPGA 产品及配套开发工具, 从而推动了 FPGA 行业的不断发展。

## → 1.1 滤波器概述

### 1.1.1 滤波器简介

滤波器是一种用来减少或消除干扰的电气部件, 其功能是将输入信号进行过滤处理得到所需的信号。滤波器最常见的用法是对特定频率的频点或该频点以外的频率信号进行有效滤除, 从而实现消除干扰、获取某特定频率信号的功能。一种更广泛的定义是将凡是有能力进行信号处理的装置都称为滤波器。在现代电子设备和各类控制系统中, 滤波器的应用极为广泛, 其性能优劣在很大程度上直接决定了产品的优劣。

滤波器的分类方法有很多种, 从处理的信号形式来讲可分为模拟滤波器和数字滤波器两大类。模拟滤波器由电阻、电容、电感、运放等电气元件组成, 对模拟信号进行滤波处理。数字滤波器则通过软件或数字信号处理器件对离散化的数字信号进行滤波处理。两者各有优缺点及适用范围, 且均经历了由简到繁以及性能逐步提高的发展历程。

1917 年美国 and 德国科学家分别发明了 LC 滤波器, 次年导致了美国第一个多路复用系统的出现。20 世纪 50 年代, 无源滤波器日趋成熟。自 60 年代起, 由于计算机技术、集成工艺和材料工业的发展, 滤波器发展上了一个新台阶, 并且朝着低功耗、高精度、小体积、多功能、稳定可靠和价格低廉方向发展, 其中小体积、多功能、高精度、稳定可靠成为 70 年代以后的主流方向, 并导致 RC 有源滤波器、开关电容滤波器、电荷转移器和数字滤波器等各种滤波器的飞速发展。70 年代后期, 上述几种滤波器的单片集成芯片已被研制出来并得到应用。在 80 年代, 人们致力于各类新型滤波器的研究, 努力提高性能并逐渐扩大应用范围。90 年代至今, 各国主要致力于把各类滤波器应用于各类产品的开发和研制中, 当然, 对滤波技术本身的研究也在不断继续。

随着数字信号处理理论的成熟、实现方法的不断改进, 以及数字信号处理器件性能的不提高, 数字滤波器技术的应用也越来越广泛, 并竞相成为广大技术人员研究的热点。综合起来, 与模拟滤波器相比, 数字滤波器主要有以下特点。

#### 1) 数字滤波器是一个离散时间系统

应用数字滤波器处理模拟信号时, 首先须对输入模拟信号进行限带、抽样和模/数转换。