

F P G A 应用 技术 丛书



- 程序源代码
- FPGA工程文件

数字滤波器的 MATLAB与FPGA实现

(第2版)

杜勇 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

(第 2 版)

杜 勇 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、解调系统滤波器设计等。

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 / 杜勇编著. —2 版. —北京: 电子工业出版社, 2014.8
(FPGA 应用技术丛书)

ISBN 978-7-121-23812-3

I. ①数… II. ①杜… III. ①数字滤波器—Matlab 软件 ②可编程序逻辑器件—应用—数字滤波器
IV. ①TN713

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 155976 号

责任编辑: 田宏峰 特约编辑: 蒲 玥

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

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: 787×1092 1/16 印张: 22 字数: 560 千字

版 次: 2012 年 3 月第 1 版

2014 年 8 月第 2 版

印 次: 2014 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 68.00 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 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

为什么要写这本书

为什么要写这本书？两年前首次出版这本书时，我在前言中提到写作的原因主要有三条：其一是 FPGA 技术在电子通信领域得到了越来越广泛的应用，并已逐渐成为电子产品实现的首选方案；其二是国内市场上专门讨论如何采用 FPGA 实现数字通信技术的书籍相对欠缺；其三是数字通信技术本身十分复杂，关键技术较多，在一本书中全面介绍数字通信技术的 FPGA 实现难免有所遗漏，且内容难以翔实。因此，根据作者从业经验，将数字通信的关键技术大致分为滤波器技术、同步技术和解调技术三种，并尝试着先写滤波器技术，再逐渐完成其他两种关键技术的写作。在广大读者的支持和鼓励下，先后又出版了《数字通信同步技术的 MATLAB 与 FPGA 实现》和《数字调制解调技术的 MATLAB 与 FPGA 实现》两本书。这样，关于数字通信的 FPGA 实现的系列著作总算完成，三年前的构想总算得以成为现实！

《数字滤波器的 MATLAB 与 FPGA》（第 1 版）一书出版后，陆续收到广大读者的反馈意见。一些读者直接通过邮件告知书中的内容对工作中提供的直接或间接的帮助；一些读者提出了很多中肯的有建设性的意见和建议；更多的读者通过邮件交流书中的相关设计问题；还有一些读者直接指出了书中一些描述不准确的地方以及部分文字上的错误。在即将完成数字调制解调技术一书的初稿时，出版社告知《数字滤波器的 MATLAB 与 FPGA》（第 1 版）一书即将售罄，因此，正好借着改版的机会对全书进行一次修订和完善。

与第一版相比，全书除第 5、6 章没有进行文字上的修订外，其他章节均进行了或多或少的修订，其中改动较大的是第 3、7、9 章。此次改版主要涉及以下几个方面。

（1）更正了书中一些叙述不当的地方，大多是读者反馈回来的问题。

（2）对读者提问较多的地方，叙述得更加详细。

（3）第 2 章修改了实例 2-4 的 VHDL 设计，在实例中更加完整地展示了 MATLAB 与 FPGA 的数据交互过程。

（4）第 3 章增加了“FPGA 中数的运算”小节，更充分地讨论了有效数据字长的影响，以及定点数据运算过程中需要注意的事项。

（5）第 7 章中增加了一节讨论“自适应陷波器”的内容。

（6）第 9 章标题修改为“解调系统滤波器的 FPGA 实现”。由于符号同步及码型变换内容与滤波器关系不大，且原版讨论得也不够充分，因此直接删去了符号同步及码型变换的内容，这样更符合本书主讲数字滤波器这个主题。

（7）配套光盘中的程序文件进行补充及优化。

通常来讲，一名电子通信专业的技术人员，在从业之初都会遇到类似的困惑：如何将从教材中所学的理论与实际中的工程设计结合起来？如何能够将这些教材中的理论转换成实际的电路？绝大多数数字通信类教材对通信的原理讲解十分透彻，但理论与实践之间显

然需要有一些可以顺利通过的桥梁。一个常用的方法是通过采用 MATLAB 等工具进行软件仿真的方法来加深对理论的理解，但更好的方法显然是直接参与工程的设计与实现。

然而，刚毕业的工科院校学生极少有机会参加实际工程设计，工作中往往感到学校所学的理论很难与实际工程产品的实现联系起来。教科书上多是讲些解通信原理性的内容，即使可以很好地解答教材后面的习题，或者说能够熟练地对书中的基本公式进行推导，在实际进行产品设计时，如何将这些理论及公式用具体的电路或硬件平台实现出来，仍然是摆在广大工程师面前的一个巨大难关。尤其对于数字通信专业来讲，由于涉及的理论知识比较复杂，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完全是两个不同的概念。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、仿真的一体化方式可以极好的将理论与工程应用结合起来，从而提高学习兴趣。

FPGA 技术因其快速的并行运算能力，以及独特的组成结构，在电子通信领域已成为必不可少的实现平台之一。本书的目的正是架起一座教科书理论与工程设计实践之间的桥梁，通过具体的设计实例，详细讲解从理论到工程实现的方法、步骤和过程，以便于工程技术人员尽快掌握利用 FPGA 平台实现数字通信技术的方法。

目前，市场上已有很多介绍 ISE、Quartus II 等 FPGA 开发环境，以及 VHDL、Verilog HDL 等硬件编程语言的书籍。如果我们仅仅是使用 FPGA 来实现一些数字逻辑电路，或者理论性不强的控制电路设计，掌握 FPGA 开发工具及 VHDL 语法就可以开始工作了。数字通信技术的理论性要强得多，采用 FPGA 平台实现数字通信技术的前提条件是对理论知识首先要有深刻的理解。在理解理论知识的基础上，关键的问题是根据这些通信理论或公式，利用 FPGA 的特点，找到合适的算法实现结构，理清工程实现的思路，并采用 VHDL 等硬件编程语言对其进行正确的实现。因此，要顺利地读懂本书，掌握用 FPGA 实现数字通信技术的知识和技能，读者还需要对 FPGA 的开发环境和设计语言有一定的了解。

作者在写作本书的过程中，兼顾数字滤波器的理论，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。在讲解理论知识的时候，重点从工程应用的角度进行介绍，主要介绍工程设计时必须掌握和理解的知识，并且结合 FPGA 的特点进行讨论，便于读者尽快地找到理论与工程实现之间的结合点。在讲解实例的 FPGA 实现时，不仅绝大多数实例给出了完整的 VHDL 程序代码，并且从思路和结构上对每段代码均进行了详细的分析和说明。根据作者的理解，针对一些似是而非的概念，结合工程实例的仿真测试加以阐述，希望能够对读者提供更多有用的参考。相信读者按照书中讲解的步骤完成一个个工程实例时，会逐步感觉到理论与工程实现之间完美结合的畅快。随着读者掌握的工程实现技能的提高，对数字滤波器理论知识的理解也必将越来越深刻，重新阅读以前学过的滤波器原理时，头脑里就更容易构建起理论与工程实现之间的桥梁。

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、Synplcity 综合软件以及 MATLAB 软件进行了简要介绍。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。特别需要说明的是,从读者反馈的信息来看,虽然大多数问题是针对其他章节的实例提出的,但问题的本质不少都与数据有效字长效应有关。因此,建议读者详细阅读本章内容,并且深入理解 FPGA 中的数字运算,以及有效字长效应对信号处理所带来的影响。

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、自适应陷波器为具体实例, 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 8 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较为完整的 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。尤其对解调环路中的数字滤波器设计、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。

关于 FPGA 开发环境的说明

众所周知, 目前两大厂商 Xilinx 和 Altera 的产品占据了全球 90% 的 FPGA 市场。可以说, 在一定程度上正是由于两家 FPGA 公司的相互竞争态势, 有力地推动了 FPGA 技术的不断发展。虽然 HDL 的编译及综合环境可以采用第三方公司所开发的产品, 如 Modelsim、

Synplify 等, 但 FPGA 器件的物理实现必须采用各自公司开发的软件平台, 无法通用。Xilinx 公司的主流开发平台是 ISE 系列套件, Altera 公司目前的主流开发平台是 QUARTUS II 系列套件。与 FPGA 开发平台类似, HDL 也存两种难以取舍的选择: VHDL 和 Verilog HDL。

如何选择开发平台以及 HDL 语言呢? 其实, 对于有志于从事 FPGA 技术开发的技术人员来讲, 选择哪种平台及 HDL 语言并不重要, 因为两种平台具有很多相似地方, 精通一种 HDL 语言后, 再学习另一种 HDL 语言也不是一件困难的事。通常来讲, 可以根据周围同事、朋友、同学, 或公司的主要使用情况进行选择, 这样在学习的过程中, 可以很方便地找到能够给你指迷津的专业人士, 从而加快学习进度。

本书采用的是 Xilinx 公司的 FPGA 器件作为开发平台, 采用 VHDL 语言作为实现手段。由于 VHDL 语言并不依赖于某家公司的 FPGA 产品, 因此本书的 VHDL 程序文件可以很方便地移植到 Altera 公司的 FPGA 产品上。如果程序中应用了 IP 核资源, 两家公司的 IP 核通常是不能通用的, 这就需要根据 IP 核的功能参数, 在另外一个平台上重新生成 IP 核, 或编写 HDL 代码来实现。

有人说过这样一句话: “技术只是一个工具, 关键在于思想。” 将这句话套用过来, 对于本书来讲, 具体的开发平台以及 HDL 语言只是实现数字通信技术的工具, 关键在于设计的思路和方法。因此, 读者完全不必要过于在意开发平台的差别, 相信只要掌握了本书所讲述的设计思路和方法后, 加上读者已经具备的 FPGA 开发经验, 采用任何一种 FPGA 平台都可以很快设计出满足用户需求的产品。

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, 随书配套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

有人说，每个人都有他存在的使命，如果迷失他的使命，就失去了他存在的价值。不只是每个人，每件物品也都有其存在的使命。对于一本书来讲，其存在的使命就是被阅读，并给读者带来收获。数字通信的 FPGA 设计系列的书籍，能够对读者在工作及学习中有所帮助，是作者莫大的欣慰。

作者在写作本书的过程中查阅了大量的资料，在此对资料的作者及提供者表示衷心的感谢。由于写作本书的缘故，重新阅读一些经典的数字通信理论书籍时，再次深刻感受到前辈们严谨的治学态度和细致的写作作风。

感谢电子工业出版社的大力支持，这本书能够改版，使得我有机会在采纳广大读者反馈意见的基础上，改正第一版中的一些不足之处，并尽力使这本书变得更加完善。

在此，感谢父母，几年来一直陪伴在我的身边，由于他们的默默支持，使得我能够在家里专心致志的写作；感谢我的妻子刘帝英女士，她不仅是一位尽心尽职的优秀母亲，也是一位严谨细致的科技工作者，同时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；特别值得一提的是我即将上小学四年级的女儿，晚上作业完成之后已经不再自告奋勇地说帮我做作业，更多的时候是早早约好同学到外面玩去了。

FPGA 技术博大精深，数字通信技术种类繁多且实现难度大。本书虽尽量详细讨论了 FPGA 实现数字滤波器技术的相关内容，仍感觉到难以详尽叙述工程实现所有细节。相信读者在实际工程应用中经过不断的实践、思考及总结，一定可以快速掌握数字滤波器技术的工程设计方法，提高应用 FPGA 进行工程设计的能力。由于作者水平有限，不足之处在所难免，敬请读者批评指正。欢迎大家与我就相关技术问题进行交流，交流请发邮件至 duyongcn@sina.cn，也可以访问网址 <http://duyongcn.blog.163.com> 以获得与该书相关的资料及信息。

作者
2014年6月

目 录 Contents

第 1 章 数字滤波器及 FPGA 概述	1
1.1 滤波器概述	2
1.1.1 滤波器简介	2
1.1.2 数字滤波器的分类	3
1.1.3 滤波器的特征参数	5
1.2 FPGA 基本知识	5
1.2.1 FPGA 的基本概念及发展历程	5
1.2.2 FPGA 的结构和工作原理	7
1.2.3 IP 核的概念	13
1.3 FPGA 在数字信号处理中的应用	13
1.4 Xilinx 器件简介	14
1.4.1 Spartan 系列器件	16
1.4.2 Virtex 系列器件	19
1.4.3 PROM 芯片介绍	25
1.5 小结	26
第 2 章 设计语言及环境介绍	27
2.1 VHDL 语言简介	28
2.1.1 HDL 语言	28
2.1.2 VHDL 语言	29
2.2 FPGA 开发工具及设计流程	32
2.2.1 ISE 开发套件	32
2.2.2 ModelSim 仿真软件	36
2.2.3 Synplicity 综合软件	38
2.2.4 FPGA 设计流程	39
2.3 MATLAB 软件	41
2.3.1 MATLAB 软件简介	41
2.3.2 常用的信号处理函数	44
2.3.3 滤波器设计分析工具 FDATAOOL	51
2.4 MATLAB 与 ISE 的联合应用	52
2.4.1 MATLAB 与 ISE 的数据交换	52
2.4.2 混频器设计分析实例	53
2.5 小结	66

第 3 章	FPGA 实现数字信号处理基础	67
3.1	数的表示	68
3.1.1	莱布尼茨与二进制	68
3.1.2	定点数表示	69
3.1.3	浮点数表示	71
3.2	FPGA 中数的运算	74
3.2.1	加/减法运算	74
3.2.2	乘法运算	77
3.2.3	除法运算	78
3.2.4	有效数据位的计算	79
3.3	有限字长效应	82
3.3.1	字长效应的产生因素	82
3.3.2	A/D 变换的字长效应	82
3.3.3	滤波器系数的字长效应	83
3.3.4	滤波器运算中的字长效应	85
3.4	FPGA 的常用运算模块	86
3.4.1	加法器模块	86
3.4.2	乘法器模块	88
3.4.3	除法器模块	93
3.4.4	CORDIC 运算模块	95
3.4.5	浮点运算模块	98
3.5	小结	100
第 4 章	FIR 滤波器的 FPGA 设计与实现	101
4.1	FIR 滤波器的理论基础	102
4.1.1	线性时不变系统	102
4.1.2	FIR 滤波器的原理	104
4.1.3	FIR 滤波器的特性	105
4.1.4	FIR 滤波器的结构形式	109
4.2	FIR 滤波器的设计方法	113
4.2.1	窗函数法	114
4.2.2	频率取样法	115
4.2.3	最优设计方法	116
4.3	FIR 滤波器的 MATLAB 设计	117
4.3.1	采用 fir1 函数设计	117
4.3.2	采用 kaiserord 函数设计	122
4.3.3	采用 fir2 函数设计	123
4.3.4	采用 firpm 函数设计	124
4.3.5	采用 FDATOOL 工具设计	126
4.4	FIR 滤波器的 FPGA 实现	128

4.4.1	量化滤波器系数	128
4.4.2	串行结构的 FPGA 实现	130
4.4.3	并行结构的 FPGA 实现	137
4.4.4	分布式结构的 FPGA 实现	139
4.4.5	不同结构的性能对比分析	144
4.4.6	采用 FIR 核实现	145
4.5	小结	150
第 5 章	IIR 滤波器的 MATLAB 与 FPGA 实现	151
5.1	IIR 滤波器的理论基础	152
5.1.1	IIR 滤波器的原理及特性	152
5.1.2	IIR 滤波器的结构形式	152
5.1.3	IIR 与 FIR 滤波器的比较	154
5.2	IIR 滤波器的设计方法	155
5.2.1	几种典型的模拟滤波器	155
5.2.2	原型转换设计法	158
5.2.3	直接设计法	159
5.3	IIR 滤波器的 MATLAB 设计	159
5.3.1	采用 butter 函数设计	160
5.3.2	采用 cheby1 函数设计	160
5.3.3	采用 cheby2 函数设计	161
5.3.4	采用 ellip 函数设计	161
5.3.5	采用 yulewalk 函数设计	162
5.3.6	几种设计函数的比较	162
5.3.7	采用 FDATool 工具设计	164
5.4	IIR 滤波器的 FPGA 实现	165
5.4.1	量化直接型结构的系数及运算字长	165
5.4.2	直接型结构的 FPGA 实现	169
5.4.3	直接型结构 FPGA 实现后的测试仿真	175
5.4.4	量化级联型结构的系数	179
5.4.5	级联型结构的 FPGA 实现	180
5.4.6	级联型结构 FPGA 实现后的测试仿真	185
5.5	小结	186
第 6 章	多速率滤波器的 FPGA 实现	187
6.1	多速率信号处理基础知识	188
6.1.1	多速率信号处理的概念及作用	188
6.1.2	多速率信号处理的一般步骤	189
6.1.3	软件无线电中的多速率处理	189
6.2	抽取与内插处理	191
6.2.1	整数倍抽取	191

6.2.2	整数倍内插	192
6.2.3	比值为有理数的抽样率转换	195
6.3	CIC 滤波器	195
6.3.1	CIC 滤波器的原理	195
6.3.2	CIC 滤波器的应用条件	198
6.3.3	单级 CIC 滤波器的 FPGA 实现	199
6.3.4	多级 CIC 滤波器的 FPGA 实现	201
6.3.5	CIC 滤波器 IP 核的使用	208
6.4	FIR 半带滤波器	211
6.4.1	半带滤波器的原理	211
6.4.2	半带滤波器的 MATLAB 设计	212
6.4.3	多级半带滤波器的设计	214
6.4.4	多级半带滤波器的 FPGA 实现	216
6.5	多相分解技术	222
6.5.1	多相分解技术的一般概念	222
6.5.2	整数倍抽取器的多相结构	223
6.5.3	多相抽取器的 FPGA 实现	225
6.6	小结	227
第 7 章	自适应滤波器的 FPGA 实现	229
7.1	自适应滤波器简介	230
7.1.1	自适应滤波器的概念	230
7.1.2	自适应滤波器的应用	231
7.1.3	自适应算法的一般原理	233
7.2	LMS 算法	235
7.2.1	LMS 算法的原理	235
7.2.2	LMS 算法的实现结构	235
7.2.3	LMS 算法的字长效应	236
7.2.4	符号 LMS 算法原理	238
7.2.5	LMS 算法的 MATLAB 仿真	238
7.3	自适应线性滤波器的 FPGA 实现	243
7.3.1	自适应线性滤波器原理	243
7.3.2	利用线性滤波器实现通道失配校正	243
7.3.3	校正算法的 MATLAB 仿真	244
7.3.4	校正算法的 VHDL 实现	246
7.3.5	FPGA 实现后的仿真测试	249
7.4	自适应均衡器的 FPGA 实现	251
7.4.1	自适应均衡器原理	251
7.4.2	自适应均衡器的 MATLAB 仿真	252
7.4.3	自适应均衡器的 VHDL 实现	254

7.4.4	FPGA 实现后的仿真测试	259
7.5	智能天线阵的 FPGA 实现	260
7.5.1	智能天线阵的概念及原理	260
7.5.2	自适应天线阵的 MATLAB 仿真	262
7.5.3	自适应天线阵的 VHDL 实现	264
7.5.4	FPGA 实现后的仿真测试	267
7.6	自适应陷波器的 FPGA 实现	267
7.6.1	自适应陷波器原理	267
7.6.2	自适应陷波器的 MATLAB 仿真	269
7.6.3	自适应陷波器的 VHDL 实现	271
7.6.4	FPGA 实现后的仿真测试	274
7.7	小结	275
第 8 章	变换域滤波器的 FPGA 实现	277
8.1	变换域滤波器简介	278
8.2	快速傅里叶变换	278
8.2.1	离散傅里叶变换	278
8.2.2	DFT 存在的问题	280
8.2.3	FFT 算法的基本思想	281
8.2.4	FFT 算法的 MATLAB 仿真	282
8.3	FFT 核的使用	284
8.3.1	FFT 核简介	284
8.3.2	FFT 核的接口及时序	285
8.4	频域滤波器的原理及 MATLAB 仿真	287
8.4.1	抗窄带干扰滤波器的原理	287
8.4.2	检测门限的选取	288
8.4.3	频域滤波器的 MATLAB 仿真	289
8.5	频域滤波器的 FPGA 实现	291
8.5.1	FPGA 实现的总体结构设计	291
8.5.2	速率变换模块的设计与实现	293
8.5.3	FFT 及滤波设计与实现	297
8.5.4	IFFT 及数据输出设计与实现	302
8.5.5	顶层文件设计及实现	306
8.5.6	FPGA 实现后的仿真测试	308
8.6	小结	309
第 9 章	解调系统滤波器的 FPGA 实现	311
9.1	数字接收机的一般原理	312
9.1.1	通用数字接收机处理平台	312
9.1.2	基本调制解调技术	313
9.1.3	改进的数字调制解调技术	315

9.2	DPSK 调制解调原理	316
9.2.1	DPSK 调制原理及信号特征	316
9.2.2	DPSK 信号的 MATLAB 仿真	317
9.2.3	DPSK 解调原理	320
9.3	DPSK 解调参数设计	322
9.3.1	数字下变频器设计	323
9.3.2	低通滤波器设计	324
9.3.3	数字鉴相器设计	325
9.3.4	环路滤波器设计	325
9.3.5	载波同步环设计的一般步骤	328
9.4	Costas 环的 FPGA 实现	329
9.4.1	顶层模块的 VHDL 实现	329
9.4.2	鉴相器及环路滤波器的 VHDL 实现	331
9.4.3	Costas 环实现后的仿真测试	333
9.5	小结	334
	参考文献	335



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

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, 不断地推出了性能优良、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 年美国和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、集成电路和材料工业的发展, 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。