



21世纪电气信息学科立体化系列教材

数字信号处理

● 主编 张洪涛 万红 杨述斌



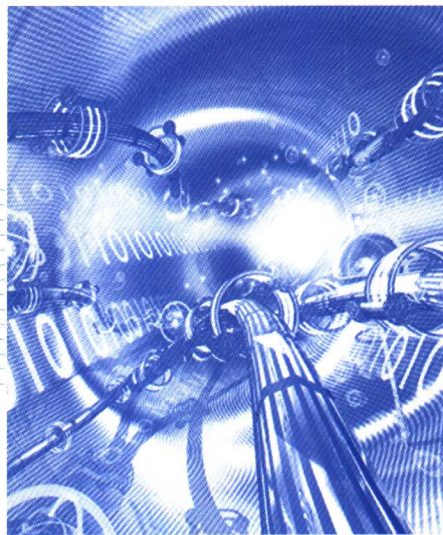
华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>



21世纪电气信息学科立体化系列教材

数字信号处理

主 编 张洪涛 万 红 杨述斌
副主编 李永全 陈华丽 张晓兵 郝国成



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理/张洪涛 万 红 杨述斌 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2007年3月
ISBN 978-7-5609-3957-5

I. 数… II. ①张… ②万… ③杨… III. 数字信号-信号处理-高等学校-教材 IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 020520 号

数字信号处理

张洪涛 万 红 杨述斌 主编

策划编辑:王红梅 孙基寿

责任编辑:张志华

责任校对:陈 骏

封面设计:秦 茹

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉众心设计室

印 刷:湖北新华印务有限公司

开本:787×960 1/16

印张:21 插页:2

字数:405 000

版次:2007年3月第1版

印次:2007年3月第1次印刷

定价:34.80元(含1CD)

ISBN 978-7-5609-3957-5/TN·108

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)



21世纪电气信息学科立体化系列教材

编审委员会

顾问：

潘 垣（中国工程院院士，华中科技大学）

主任：

吴麟章（湖北工业大学）

委员：（按姓氏笔画排列）

王 斌（三峡大学电气信息学院）

余厚全（长江大学电子信息学院）

陈铁军（郑州大学电气工程学院）

吴怀宇（武汉科技大学信息科学与工程学院）

陈少平（中南民族大学电子信息工程学院）

罗忠文（中国地质大学信息工程学院）

周清雷（郑州大学信息工程学院）

谈宏华（武汉工程大学电气信息学院）

钱同惠（江汉大学物理与信息工程学院）

普杰信（河南科技大学电子信息工程学院）

廖家平（湖北工业大学电气与电子工程学院）

内 容 提 要

本书根据教育部制定的高等院校数字信号处理课程的教学基本要求编写而成,系统地介绍了数字信号处理的基本知识及其应用。本书共计 10 章,包括数字信号处理简述;离散时间信号和系统;离散时间信号与系统的频域分析;离散傅里叶变换;快速傅里叶变换;数字滤波网络;数字滤波器的设计;有限字长效应分析;离散时间随机信号;DSP 原理与应用开发基础。

本书篇章结构清晰、叙述逻辑严密、分析深入浅出,尤其是较好地将数字信号处理中的传统习题和 MATLAB 仿真方法结合起来,利于学生更加深刻地掌握相关的知识。

本书适合于通信工程、电子信息工程等相关专业的本科生、工程技术人员和专业教师作为教材或参考书使用。

前 言

由于“数字信号处理”的理论和技术在当今信息世界得到广泛应用并产生了巨大影响,“数字信号处理”不仅成为高等院校电子类专业和通信类专业本科阶段的一门重要专业基础课,也是其他如自动控制类和机械类专业的一门必修基础课。本教材的参考学时是 64 学时。学习本门课程之前,学生应修过“高等数学”、“线性代数”、“信号与系统”、“微机原理”和“复变函数”等课程。学好这一门课程不仅是为顺利参加通信与信息系统、信号和信息处理等专业研究生入学考试打下良好基础,而且是为在电子信息技术领域的研究和开发工作创造条件。从这一课程的设置历史来看,首先在欧美等国家起初设置为研究生课程,后来才逐步在本科阶段开设。“数字信号处理”在我国也经过了大体相同的历程。它所涵盖的知识面较广,而且随着应用的不断发展,“数字信号处理”所包含的内容还在进一步更新,学习这一门课程是有一定难度的。根据笔者教学经验,学生普遍感到这门课难学,相关内容掌握得不是太好,其中本课程理论与实践相结合、数学与物理模型相对应、涉及知识面比较广是重要原因。所以,不断探索,编写针对本科生教学的好教材是必要的。

本教材着眼于数字信号处理的基本概念、基本原理和基本算法,力求系统地、深入浅出地对数字信号处理的这“三基”问题进行阐述,增强学生提出问题、分析问题和解决问题的能力。首先,抓住数字信号处理课程的主要内容,找到关键问题,使在学习过程中,深入浅出地理解和掌握数字信号处理的相关内容。其次,要着力培养学生既看树木又见森林的习惯,力争让学生在学习时能及时解决困惑。本书避免了从考试的角度出发来编写,而是从数字信号处理的理论、技术及应用的角度出发来编写。因此,本书包括了数字信号处理器的相关内容,试图使学生从数字信号处理的理论学习中,掌握结合数字信号处理理论的硬件和系统内容,从而增强理解和应用数字信号处理知识的能力。笔者认为,高等院校通信类和电子信息类专业应该确立学生的培养目标是培养技术工程师,理论与实践相结合,偏重于实践,强调在实践中体会概念和原理、认识和深化理论,从而更好地完成通信或电子系统设计开发工作。此外,考虑到现行通信类和电子信息类专业教学培养计划都不同程度地安排了 MATLAB 教学内容,本书也增加了 MATLAB 方面的内容。MATLAB 对于通信类和电子信息类专业学生来讲,已经变成非常重要的工具。MATLAB 系统中包含的众多函数和算法程序,可以方便快捷地为数字信号处理的各项内容提供正确答案和直观形象的图形显示,这对于数字信号处理

内容求解问题的仿真和模拟具有极其重要的意义。在讲述相关内容时,举例给出部分 MATLAB 程序编写的例题,让学生把这些内容与应用 MATLAB 函数、程序和算法结合起来,帮助学生深入理解数字信号处理相关内容。在光盘版中提供了关键内容习题的详细解答。

本书的结构和内容大致安排如下。离散时间系统的理论和离散信号的变换(包括序列的傅里叶变换和 Z 变换),是数字信号处理的理论基础,作为第一部分。快速傅里叶变换(FFT)算法和数字滤波器设计是数字信号处理的两大基本方法,分别作为第二、三部分。随机离散时间信号和有限字长效应是数字信号处理课程中不可分割的内容,是数字信号处理的深入研究部分,同时在近年的硕士研究生入学考试中出现了随机信号处理的题目,学习这一部分内容是必要的,作为第四、五部分。第六部分介绍了 TMS320C6000 系列 DSP 的结构和性能,主要是考虑到 TI 公司的 TMS320C6000 是目前 DSP 的一个标志产品,在许多方面具有代表性。在本科阶段学习相关内容,对全面掌握 DSP 技术,具有重要意义。

本书的建议学时为 64 学时,标有“*”的章节为选学内容。任课教师可根据具体情况安排选择使用。

本书编写人员及所负责内容为:张洪涛(第 1 章和第 10 章)、李永全(第 2 章)、陈华丽(第 3 章)、杨述斌(第 4、5 章)、万红(第 6、7 章)、张晓兵(第 8 章)和郝国成(第 9 章)。张洪涛对全书进行了统稿。华中科技大学电子信息工程系博士生导师王殊教授仔细审阅了全书,并提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。由于作者水平有限,书中难免存在不少缺点和不足之处,敬请广大读者批评指正。

21 世纪电气信息学科立体化系列教材编委会

《数字信号处理》编写组

2006 年 10 月



1 绪 论

1.1 信号的分类	(1)
1.2 数字信号处理领域的理论基础	(1)
1.3 数字信号处理发展的动力	(2)
1.4 数字信号处理的实现	(3)
1.5 数字信号处理发展的阶段性	(4)

2 离散时间信号与离散时间系统

2.1 离散时间信号	(5)
2.1.1 几种常用序列	(6)
2.1.2 序列的周期性	(10)
2.1.3 用单位取样序列来表示任意序列	(11)
2.1.4 序列的运算	(11)
2.1.5 序列的能量	(15)
2.2 离散时间系统	(15)
2.2.1 线性时不变系统	(15)
2.2.2 单位取样响应与卷积	(17)
2.2.3 系统的因果性和稳定性	(21)
2.2.4 线性常系数差分方程	(23)
2.3 离散时间信号和系统的频域描述	(26)
2.3.1 离散时间信号的傅里叶变换	(26)
2.3.2 离散时间信号的傅里叶变换性质	(29)
2.3.3 序列傅里叶变换的对称性	(31)
2.3.4 离散时间系统的频率响应	(34)
2.4 连续信号的抽样	(36)
2.5 离散时间信号的抽样	(42)
2.6 序列的抽取与插值	(44)
本章小结	(45)
习题	(45)

3 离散时间信号与系统的频域分析

3.1 序列的 Z 变换	(49)
3.1.1 Z 变换的定义	(49)
3.1.2 几种序列的 Z 变换及其收敛域	(51)
3.2 逆 Z 变换	(55)
3.2.1 幂级数展开法(长除法)	(55)
3.2.2 部分分式展开法	(57)
3.2.3 留数法	(58)
3.3 Z 变换的性质和定理	(62)
3.4 序列的 Z 变换与连续信号的拉普拉斯变换、傅里叶变换的关系	(68)
3.4.1 Z 变换与拉普拉斯变换的关系	(68)
3.4.2 Z 变换和傅里叶变换的关系	(70)
3.5 利用 Z 变换分析信号和系统的频域特性	(70)
3.5.1 利用 Z 变换解差分方程	(70)
3.5.2 频率响应与系统函数	(72)
3.5.3 利用系统函数的极点分布分析系统的因果性和稳定性	(72)
3.5.4 利用系统的零-极点分布分析系统的频率特性	(73)
本章小结	(77)
习题	(78)

4 离散傅里叶变换

4.1 傅里叶变换的几种形式	(81)
4.2 周期序列的离散傅里叶级数及其性质	(84)
4.2.1 周期序列的离散傅里叶级数	(84)
4.2.2 离散傅里叶级数的性质	(87)
4.3 离散傅里叶变换及其性质	(90)
4.3.1 离散傅里叶变换的定义	(90)
4.3.2 DFT 与序列傅里叶变换、 Z 变换的关系	(92)
4.3.3 离散傅里叶变换的性质	(93)
4.4 抽样 Z 变换——频域抽样理论	(104)
本章小结	(107)
习题	(109)

5 快速傅里叶变换

5.1 直接计算 DFT 存在的问题及改进途径	(111)
5.1.1 直接计算 DFT 的运算量	(112)
5.1.2 改进途径	(113)

5.2 按时间抽取的基-2 FFT 算法	(113)
5.3 蝶形、同址、变址运算	(118)
5.3.1 蝶形计算	(118)
5.3.2 同址(原位)运算	(119)
5.3.3 变址(倒位序)运算	(119)
5.3.4 蝶形运算两节点的“距离”和 W_N 的确定	(121)
5.3.5 按时间抽取的 FFT 算法的其他形式流图	(122)
5.4 按频率抽取的基-2 FFT 算法	(123)
5.4.1 算法原理	(123)
5.4.2 按频率抽取法的运算特点	(125)
5.5 快速傅里叶反变换	(126)
5.6 快速傅里叶变换的应用	(127)
5.6.1 利用 FFT 对信号进行谱分析	(127)
5.6.2 线性卷积的 FFT 算法	(134)
5.7 线性调频 Z 变换(Chirp-Z 变换)算法	(139)
5.7.1 算法基本原理	(139)
5.7.2 Chirp-Z 变换的实现步骤	(141)
本章小结	(143)
习题	(143)

6 数字滤波网络

6.1 概述	(145)
6.2 IIR 滤波器基本网络结构	(147)
6.2.1 直接型网络结构	(147)
6.2.2 级联型网络结构	(149)
6.2.3 并联型网络结构	(150)
6.3 FIR 滤波器基本网络结构	(153)
6.3.1 直接型网络结构	(153)
6.3.2 级联型网络结构	(154)
6.3.3 线性相位 FIR 数字滤波器的网络结构	(155)
6.3.4 频率抽样型结构	(156)
本章小结	(159)
习题	(159)

7 数字滤波器的设计

7.1 概述	(161)
7.1.1 数字滤波器的分类	(161)

7.1.2 数字滤波器的性能要求	(162)
7.1.3 数字滤波器设计方法概述	(163)
7.2 无限冲激响应数字滤波器的设计	(164)
7.2.1 从模拟滤波器设计 IIR 数字滤波器	(164)
7.2.2 冲激响应不变法	(172)
7.2.3 双线性变换法	(176)
7.2.4 数字高通、带通及带阻滤波器的设计	(180)
7.3 FIR 数字滤波器设计概述	(186)
7.4 窗函数法	(194)
7.4.1 设计思路	(194)
7.4.2 窗函数法性能分析	(194)
7.4.3 常用窗函数	(198)
7.4.4 窗函数法的设计实例	(201)
7.5 频率抽样法	(204)
本章小结	(206)
习题	(207)

8 离散时间随机信号

8.1 离散时间随机过程	(209)
8.2 时间平均	(210)
8.2.1 定义	(210)
8.2.2 时间平均	(213)
8.3 相关序列和协方差序列的性质	(215)
8.4 功率谱	(216)
8.4.1 随机信号的傅里叶变换表示	(216)
8.4.2 利用 Z 变换计算平均功率	(217)
8.5 离散随机信号通过线性非移变系统	(221)
本章小结	(227)
习题	(227)

9 数字信号处理中的有限字长效应

9.1 有限字长效应及量化误差	(230)
9.1.1 有限字长效应	(230)
9.1.2 信号的量化误差	(231)
9.1.3 A/D 转换器中的量化效应	(233)
9.2 数字滤波器系数量化误差分析	(234)

9.2.1	系数量化误差对滤波器稳定性的影响	(234)
9.2.2	系数量化误差对滤波器零、极点位置的影响	(236)
9.3	定点运算 IIR 和 FIR 数字滤波器误差分析	(238)
9.3.1	有限字长定点运算 IIR 滤波器的误差分析	(238)
9.3.2	定点 FIR 滤波器的有限字长效应	(241)
9.4	浮点运算数字滤波器和 FFT 算法中的有限字长效应	(242)
9.4.1	浮点运算 IIR 数字滤波器	(243)
9.4.2	浮点运算 FIR 数字滤波器	(244)
9.4.3	浮点运算 FFT 算法	(246)
	本章小结	(249)
	习题	(249)

10 * DSP 原理与应用开发基础

10.1	典型 DSP 系统的构成	(252)
10.2	DSP 系统的总体方案设计开发概述	(253)
10.2.1	总体方案设计	(253)
10.2.2	软件设计阶段	(253)
10.2.3	硬件设计阶段	(253)
10.3	TMS320C62X 芯片基本结构	(254)
10.3.1	通用寄存器文件	(256)
10.3.2	功能单元	(257)
10.3.3	寄存器文件交叉通道和存储器存取通道	(257)
10.3.4	数据地址通道和控制寄存器文件	(258)
10.4	TMS320C6000 指令	(261)
10.4.1	TMS320C62X、67X 定点指令集	(261)
10.4.2	资源约束	(267)
10.4.3	寻址模式	(269)
10.5	'C62X 流水线	(271)
10.5.1	取指(Fetch)	(271)
10.5.2	译码(Decode)	(272)
10.5.3	执行(Execute)	(273)
10.5.4	流水线操作总结	(274)
10.6	中断	(274)
10.6.1	中断类型及所用信号	(275)
10.6.2	全局使能(enable)或非使能(disable,屏蔽)中断	(279)

10.6.3 单个中断控制·····	(280)
10.6.4 中断探测和处理·····	(283)
10.6.5 中断及软件编程问题·····	(286)
10.7 应用程序开发实例·····	(288)
10.7.1 快速傅里叶变换的 DSP 实现·····	(288)
10.7.2 FIR 滤波器的 DSP 实现·····	(293)
10.7.3 IIR 滤波器的 DSP 实现·····	(296)
本章小结·····	(298)
习题·····	(298)
附录一 本书部分中英文对照·····	(299)
附录二 本书部分符号含义说明·····	(301)
部分习题参考答案·····	(303)
参考文献·····	(322)

绪论

1

随着现代科学技术的发展,特别是大规模集成电路的出现,数字信号处理技术水平获得空前提高。数字信号处理是一门理论和技术发展十分迅速、广泛应用于众多领域的前沿交叉性学科。它研究信号处理的客观规律性,即如何把信号用数字或符号表示成序列,然后通过计算机或通用(专用)信号处理设备,采用数字的数值计算方法处理,以提取有用的信息以便应用。

1.1 信号的分类

信号是信息的载体,可分为模拟信号和数字信号。

模拟信号是以时间为自变量的连续函数,在研究的时间段内的任意时刻信号都呈现一定的幅度值(数值),这一幅度值在对应范围内随时间连续变化。例如,自然界中的各种形式的光电信号、脉冲信号、三角信号、正弦信号和光学图像信号等。自变量在现实空间中可以是二维的,甚至是多维的。

离散信号是只在一组特定的时刻取数值,在其他时间不取值或数值为零的信号,因此又称为离散时间信号。如果离散信号的幅度值离散(量化),即将幅度值量化为二进制代码序列,则称为数字信号。因此,数字信号就是用数字序列表示的信号。例如,图像信号经取样和量化后,就可以得到一个二维的离散空间数字序列。

1.2 数字信号处理领域的理论基础

信息用一定形式的信号来表示,这样才易被检测、传输、存储和显示。数字信号是数据或符号序列,可以对这些序列进行加、减、乘以及逻辑运算等各种数学运算。这与

模拟信号是不同的。由于计算机技术的进步和广泛应用,现在离散时间信号的处理是主要的。大家将看到,在第5章以前,涉及的都是离散时间信号处理,即只涉及信号在时间上离散这一特征。直到第9章中讨论由于量化编码的有限字长效应,才能称之为数字信号处理。但随着计算机性能的逐步提高,以前重要的有限字长效应分析变得次要起来。数字信号处理学科有着宽广而坚实的理论基础,主要是离散线性变换(LSI)系统理论和离散傅里叶变换(DFT)理论。具体地说,主要包括:信号采集(A/D技术、抽样定理、多抽样率、量化噪声分析等);离散信号时域分析、频域分析和各种变换技术;信号处理中的快速傅里叶变换和快速卷积与相关;数字滤波器的设计与实现;信号估值理论、相关函数与功率谱估计;信号处理技术的软、硬件实现及其应用,等等。它的基本数学工具是微积分、概率统计、随机过程、高等代数、数值分析、近代代数和复变函数等。相对于技术的发展,其基本理论较为稳定。

1.3 数字信号处理发展的动力

社会生产力的发展必然导致对科学技术的极大需求,形成源源不断的驱动力。数字信号处理理论和技术发展动力来源于两个方面:一方面是其理论和技术在各领域的广泛应用,另一方面是自身固有的优势。

1. 应用领域

随着数字信号处理理论和技术水平的不断提高,其硬件产品,如TMS320C6000 DSP高性能、易使用 and 低成本的特点使它成为多通道、多功能应用场合的理想选择,如共享modem、无线基站、光传输基站、远程操作服务器(RAS)、DSL系统、cable modem、多通道电话系统、3D图像虚拟实现、语音识别和处理、智能机器人、雷达、大气模型和成像技术、无线多媒体通信和Internet等。

2. 优越性

精度高。在数字系统里,17位字长处理精度可达 10^{-5} ,如果采用配置浮点算法及更高技巧的16位或32位运算,精度甚至可以达到 10^{-7} ,而且随着纳米技术的应用,数字系统的性能会更高,而精度也将会进一步提高。而在模拟系统中,它的精度是由元器件决定的,模拟元器件的精度很难超过 10^{-3} 。

可靠性强。数字系统只有两个信号电平,即0,1两种状态,受噪声及环境条件等影响小。模拟系统各参数都有一定的温度系数,易受环境条件,如温度、振动、电磁感应等影响,从而产生杂散效应甚至振荡等。数字系统采用大规模集成电路,其故障率远远小于采用众多分立元器件构成的模拟系统。

灵活性大。数字系统的性能主要决定于乘法器的各系数,而这些系数存放于系数存储器内,只需改变存储器内所存的系数数据,就可得到不同的数字系统。而模拟系统的改变必须涉及元器件的改变,操作困难。此外,数字系统的灵活性还体现在利用同一

个 DSP 时可以同时处理多路相互独立的信号,即某一路信号的相邻两抽样值之间存在很大的空隙时间,因而在同步器的控制下,在此时间空隙中可送入其他某路的信号,从而使各路信号利用同一 DSP;模拟系统在同步器的控制下,算完一路信号后,再算另一路信号。因此,数字信号处理器运算速度越高,能处理的信道数目也就越多,称之为“时分复用”。

便于大规模集成。数字部件制造具有高度的规范性,易于大规模集成系统。

数字信号处理理论和技术的不断进步,又反过来推动了需求的进一步增强,从而会进一步丰富和发展数字信号处理理论和技术。

但它也有局限性,如受抽样频率要满足奈奎斯特准则定理的限制,数字系统还不能处理实时很高频率的信号。随着纳米电子技术和微处理器系统等技术的发展,数字系统的速度将会向更高方向迈进,数字信号处理将更加显示出其优越性。

1.4 数字信号处理的实现

数字信号处理的实现就是把它常用的三种运算形式(加法、乘法和存储(延迟))以一定的方式实现,它大致可分为如下方法。

1. 硬件方式

采用三种运算器,即加法器、乘法器、延时器及其组合设计适合于各种应用场合的数字电路系统,以完成序列运算。在数字信号处理中,硬件电路的快速处理是一大优点。现在结合嵌入式系统理论设计的数字电路对处理数字序列有很大帮助。

2. 软件方式

一般来说,在通用计算机上或嵌入式系统上,采用高级语言编制各种需要的计算程序,可以达到处理数字信号的目的。但软件方法因为速度慢的原因只适合于对实时性要求较低或不要求实时性的场合。应该注意的是,随着计算机性能的提高,实时性要求也在变化,过去由于条件限制,即使硬件实时性不是很高,也有一定延迟,而今用软件方法同样可以达到较高的实时性处理要求。

3. 数字信号处理器(DSP)方式

现在处理数字信号的主要方法还是各种数字信号处理器(如流行的美国 TI 公司的 TMS320 系列),它结合软件和硬件的方式,利用设计特殊的数字信号处理芯片及存储器构成处理硬件电路系统,其中采用高级语言编制的程序来完成运算。DSP 处理方式灵活方便,随着集成电路的发展,已经能达到很高的速度,可进行数字图像实时处理,已被广泛用于包括通信在内的众多领域。

1.5 数字信号处理发展的阶段性

按照数字信号处理发展历史,可以从数字信号处理算法及其方式的演变大致划分其阶段。

在算法上,20 世纪 60 年代,由于高速数字计算机和微处理器进入应用领域,数字信号处理产生了快速傅里叶变换和数字滤波两种标志性方法。1965 年在美国 Cooley-Turkey 提出快速傅里叶变换(FFT),可视为数字信号处理这一学科的开端。之前可以追溯到 17—18 世纪的牛顿和高斯时代。

在处理方式上,有三种运算:相加、相乘和延迟。这些运算可以通过软件程序来实现,也可以用硬件电路来实现。软件处理是把需要的运算编制成为程序,在计算机上执行。这种方式灵活、方便,但比硬件处理要慢。随着计算机性能的不断提高,软件处理的速度也变得越来越快。硬件电路实现的典型代表是数字信号处理器(DSP)。它是以数字信号处理器芯片以及存储器组成硬件电路,把需要的运算用高级语言编程实现,这是硬件电路系统发展到一定阶段才出现的产物,同时,这也是数字信号处理硬件和软件的完美结合。采用 DSP 既方便、灵活,又能实时处理,所以,DSP 技术发展迅速,被日益广泛地应用于各个领域。

目前我们所讲述的 DSP 利用的是电信号,光 DSP 也在研究之中。如果后者能产生突破,可能对目前的电 DSP 是一个很好的补充。此外,我们现在正处在一个变化多样的时代,从传统的数字信号处理要逐渐过渡到量子信号处理阶段。这将把数字信号处理理论和技术推向更高的发展阶段。