数字信号处理参考教材系列

快速算法与并行信号处理

〔日〕谷荻隆嗣 编著

科学出版社
www.sciencep.com

数字信号处理参考教材系列

快速算法与并行信号处理

〔日〕谷荻隆嗣　编著
薛培鼎　徐国鼐　译

科学出版社
北京

图字:01-2003-1056 号

ディジタル信号処理ライブラリー4
高速アルゴリズムと並列信号処理
Fast Algorithms and Parallel Signal Processing
谷萩隆嗣　株式会社コロナ社
Takashi Yahagi　CORONA PUBLISHING CO., LTD.

图书在版编目(CIP)数据

快速算法与并行信号处理/(日)谷萩隆嗣编著;薛培鼎,徐国鼐译.
—北京:科学出版社,2003
(数字信号处理参考教材系列)
ISBN 7-03-011445-0

Ⅰ.快… Ⅱ.①谷… ②薛… ③徐… Ⅲ.数字信号-信号处理:并行处理-计算方法 Ⅳ.TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 034525 号

责任编辑　崔炳哲　　责任制作　魏　谨
责任印制　刘士平　　封面设计　李　力

科学出版社 出版
北京东黄城根北街 16 号　邮政编码:100717
http://www.sciencep.com
源海印刷有限责任公司 印刷
北京东方科龙图文有限公司 制作
http://www.okbook.com.cn
科学出版社发行　各地新华书店经销

2003 年 9 月第 一 版　开本:A5(890×1240)
2003 年 9 月第一次印刷　印张:8 3/4
印数:1—4 000　字数:202 000
定　价:22.00 元
(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

“数字信号处理参考教材系列”序

近年来，随着数字技术的惊人发展，以前用模拟技术进行处理或者以往根本无法进行数字处理的问题，都可以进行数字处理了。因此，数字技术越来越广泛地应用于诸多领域，而且这些领域对数字技术的要求也变得越来越高。

最近对电气、电子、信息、通信等领域进行的大规模市场调查表明，很多企业以及研究机构都对数字信号处理技术非常重视，他们在调查问卷的表格中，把数字信号处理填在了“必要性”和“重要性”一栏的首位。从这一社会现象也可以看出，数字信号处理是当今社会急需发展的学科领域之一。

鉴于这种状况，我们以供从事数字信号处理或者准备学习数字信号处理的社会各界人士参考阅读为目的，从更广泛的角度对数字信号处理这一学科进行归纳整理，编写了这套系列书。

本系列书包括以下各册：

1. 数字信号处理基础理论
2. 数字滤波器与信号处理
3. 语音与图像的数字信号处理
4. 快速算法与并行信号处理
5. 卡尔曼滤波器与自适应信号处理
6. ARMA 系统与数字信号处理
7. VLSI 与数字信号处理
8. 信息通信与数字信号处理

9. 人工神经网络与模糊信号处理

10. 多媒体与数字信号处理

上述各册中，第1至第3为基础部分，以大学三、四年级本科生为读者对象；第4至第6为比基础部分内容较深的提高部分，以研究生或者具有同等学历的科研人员及技术人员为读者对象；第7至第10为应用部分，以大学或研究机构的研究人员为主要读者对象，亦可供有一定基础知识的社会各界人士参考阅读。

也就是说，读者可根据自己的兴趣和所掌握的知识基础，有选择地阅读本系列书中的内容。比如，从基础知识开始学习数字信号处理的读者，可选择基础部分的内容；如果已具备了一定的基础知识，则可选择提高部分或者应用部分。从基础知识开始学习的，可按基础部分→提高部分→应用部分的顺序，或者按基础部分→应用部分→提高部分的顺序，根据自己的兴趣有选择地阅读。

本系列的执笔者均为目前仍活跃在相关领域第一线的专家、学者，因而编者有理由相信本系列书能够满足不同层次的读者的需求。

另外，考虑到数字信号处理的理论及应用技术的迅速发展，今后我们会根据情况及时补充新内容，使本系列书不断充实和完善。

最后，时值本系列书出版之际，谨向对本系列书的出版提供多方帮助的CORONA社的各位表示衷心的感谢。

"数字信号处理参考教材系列"策划兼主编

谷荻隆嗣

前　　言

在实时信号处理和大规模系统的信号处理中，为了达到预期目的，一般都要采用某些高效措施或技巧，其中最重要的就是提高单个处理运算速度和通过引入并行处理等机制来提高整体处理的效率。

本书首先就提高运算速度问题，详细介绍快速傅里叶变换(FFT)和快速余弦变换等几个具有代表性的正交变换算法；其次，阐明并行处理的概念及并行处理的代表性算法；最后介绍阵列信号处理。

第1章介绍各种正交变换，它们是数字信号处理中各种快速算法的基础。首先讲述正交函数系和傅里叶级数，接着讲述离散傅里叶变换(DFT)和离散余弦变换(DCT)。这两种变换在实用上非常重要。此外还将讲述离散哈特莱变换、沃尔什-哈达玛变换、K-L变换等。

第2章介绍各种快速傅里叶变换算法。首先介绍最有名的Cooley-Tukey算法，并介绍基2 FFT、基4 FFT，以及由二者相结合而构成的混合基FFT算法。接着阐述以实信号为对象的实数FFT算法。在时域中所获得的信号多数情况下是实信号，所以这种能大幅度提高实数运算效率的FFT算法有重要应用意义。最后介绍Bruun算法等。

第3章首先介绍快速余弦变换，也就是离散余弦变换的快速算法；其次介绍快速哈特莱变换，也就是离散哈特莱变换的快速算法。快速余弦变换和快速哈特莱变换都能由实数运算来进行处理，它们对实信号很有效。最后介绍快速沃

尔什-哈达玛变换、快速数论变换、快速多项式变换等。

第 4 章介绍数字信号处理中的并行算法。首先介绍并行计算模型，接着介绍多维 FFT 的并行算法。信号处理中经常出现以特普利茨矩阵为系数矩阵的联立线性方程，本章也将阐明其并行计算算法。

第 5 章介绍遗传算法。众所周知，遗传算法是高效解决大规模组合优化问题的有力工具。本章将介绍遗传算法的概要、基本理论，以及在组合优化问题中的应用方法。在信号处理方面，对于那些能归结为组合优化的优化问题，遗传算法是很有用的。

第 6 章介绍脉动算法。这种算法适用于 VLSI 结构中的大规模并行处理。在脉动算法中，并行处理是利用被称为脉动阵列的一维或二维运算器(PE)配置，通过在各个 PE 之间进行高效通信来实现的。本章将针对信号处理中常用的卷积运算、矩阵积和运算、多项式乘除运算等重要运算来介绍脉动算法。

第 7 章介绍阵列信号处理。在发送或接收电波、声波等信号时，如果按阵列形式来配置发送接收单元，就能够提高其信号处理的效率。本章将详细介绍用阵列信号处理来进行功率谱估计的方法，并给出几个阵列信号处理的应用实例。

本书所介绍的快速算法和并行信号处理思想，在进行高效信号处理时是不可缺少的，对于解决实时信号处理和大规模系统中的信号处理等实际问题非常重要。希望本书能得到读者的有效利用。

谷荻隆嗣

编著者简介

谷荻隆嗣

1966 年　东京工业大学理工学部电子工程专业毕业

1971 年　东京工业大学研究生院理工学研究科

　　　　电子工程专业博士课程毕业，获工学博士学位

1971 年　千叶大学讲师

1974 年　千叶大学副教授

1984 年～至今　千叶大学教授

著　者

谷荻隆嗣（千叶大学　工学博士）　第 1 章，第 2 章，第 3.1～3.3 节

李　　磊（山口大学　工学博士、理学博士）　第 3.3～3.5 节，第 4 章

玉置　久（神户大学　工学博士）　第 5 章

饭国洋二（大阪大学　工学博士）　第 6.1～6.4 节

酒井英昭（京都大学　工学博士）　第 6.5～6.7 节

清水　聪（冲电气工业（株）工学博士）　第 7 章

目　录

第1章

数字信号与正交变换

1.1 正交函数系
1.2 傅里叶级数
1.3 离散傅里叶变换
1.4 离散余弦变换
1.5 离散哈特莱变换
1.6 沃尔什–哈达玛变换
1.7 K–L变换

数字信号处理中应用了许多正交变换。本章首先介绍正交函数系和傅里叶级数，它们是正交变换的基础。接着介绍离散傅里叶变换(DFT)、离散余弦变换(DCT)、离散哈特莱变换(DHT)、沃尔什-哈达玛变换(WHT)及卡尔奈-莱布变换(KLT，即 K-L 变换)，以及一维信号和二维信号的正交变换。

1.1 正交函数系

考虑定义于区间 $x\in(a,b)$ 的平方可积实值函数序列 $\{\Psi_n(x)\}$ $(n=0,1,\cdots)$，$\Psi_m(x)$ 与 $\Psi_n(x)$ 的内积用符号 (Ψ_m,Ψ_n) 来表示，其定义可表示为

$$(\Psi_m,\Psi_n)=\int_a^b \Psi_m(x)\Psi_n(x)\mathrm{d}x \tag{1.1}$$

当 $\{\Psi_n(x)\}(n=0,1,\cdots)$ 为定义于区间 $x\in(a,b)$ 的平方可积复值函数序列时，内积 (Ψ_m,Ψ_n) 的定义可表示为

$$(\Psi_m,\Psi_n)=\int_a^b \Psi_m(x)\Psi_n^*(x)\mathrm{d}x \tag{1.2}$$

式中，$\Psi_n^*(x)$ 表示 $\Psi_n(x)$ 的复共轭。式(1.2)中的 a 和 b 既可以是实数，也可以是复数。今后，如不预先说明，就表明所考虑的是定义域为实数的实值函数，即实函数[1)]。

如果式(1.1)在 $m\neq n$ 时 $(\Psi_m,\Psi_n)=0$ 成立，就称 $\Psi_m(x)$ 与 $\Psi_n(x)$ 在区间 $x\in(a,b)$ 上正交。这时，函数序列 $\{\Psi_n(x)\}$，$(n=0,1,\cdots)$ 称为**正交函数系**(system of orthogonal functions)或**正交系**(orthogonal system)。进而，当 $(\Psi_m,\Psi_n)=1$ 成立时，函数序列 $\{\Psi_n(x)\}(n=0,1,\cdots)$ 就成为**标准正交函数系**(system of orthonormal functions)或**标准**

1) 参看注 1.1。

正交系(orthonormal system)。

对于任意的函数 $f(x)\in L_2(a,b)$,令

$$c_n=(f,\Psi_n)=\int_a^b f(x)\Psi_n(x)\mathrm{d}x,\quad n=0,1,\cdots \tag{1.3}$$

如果式

$$f(x)=\sum_{n=0}^{\infty}c_n\Psi_n(x) \tag{1.4}$$

在平均收敛[1)]的意义下成立,则称标准正交系$\{\Psi_n(x)\}(n=0,1,\cdots)$是**完备的**(complete)**或完全的**。

例如,$\{1,\cos x,\cos 2x,\cos 3x,\cdots\}$,$\{1,\sin x,\sin 2x,\sin 3x,\cdots\}$,$\{1,\cos x,\sin x,\cos 2x,\sin 2x,\cdots\}$是在区间$(-\pi,\pi)$上的正交函数系;$\{1/\sqrt{2\pi},(1/\sqrt{\pi})\sin x,(1/\sqrt{\pi})\sin 2x,\cdots\}$,$\{1/\sqrt{2\pi},(1/\sqrt{\pi})\cos x,(1/\sqrt{\pi})\cos 2x,\cdots\}$是标准正交系;而$\{1/\sqrt{2\pi},(1/\sqrt{\pi})\cos x,(1/\sqrt{\pi})\sin x,(1/\sqrt{\pi})\cos 2x,(1/\sqrt{\pi})\sin 2x,\cdots\}$是完备标准正交系。实际应用的正交函数系全都是完备的。

正交函数系具有使用方便的优点。为了说明这一点,下面分析用式

$$f_k(x)=\sum_{n=0}^{k}c_n\Psi_n(x) \tag{1.5}$$

逼近 $f(x)$的情形。如果 $f_k(x)$已经充分接近 $f(x)$,就可以用式(1.5)的有限项求和公式来代替式(1.4)的无限项求和公式。如果近似的程度尚不充分,就需要把式(1.5)的 k 再加大一些,例如用 $k+m$ 代替 k,并由式

$$f_{k+m}(x)=\sum_{n=0}^{k+m}d_n\Psi_n(x) \tag{1.6}$$

的 $f_{k+m}(x)$来近似 $f(x)$。这时,如果$\{\Psi_n(x)\}(n=0,1,\cdots)$是正交函数系,则必有 $d_n=c_n(n=0,1,\cdots,k)$,需要另行计算的就只有 $d_n(n=$

1) 参看注 1.2。