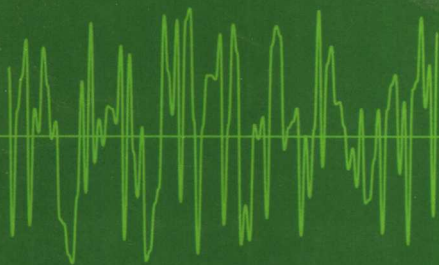


数字信号处理参考教材系列

# 数字滤波器与 信号处理

〔日〕谷萩隆嗣 著



13  
31



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

数字信号处理参考教材系列

# 数字滤波器与 信号处理

〔日〕谷萩隆嗣 著

王友功 译

薛培鼎 校

科学出版社

北京

**图字:01-2003-1053 号**

Digital Filters and Signal Processing

Copyright © 2001 by Takashi Yahagi & Corona Publishing Co., Ltd.

All rights reserved.

Chinese translation rights arranged with Corona Publishing Co., Ltd.

Tokyo, Japan.

デジタル信号処理ライブラリー2

**デジタルフィルタと信号処理**

Digital Filters and 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**

数字滤波器与信号处理/(日)谷萩隆嗣著;王友功译;薛培鼎校.

—北京:科学出版社,2003

(数字信号处理参考教材系列)

ISBN 7-03-011373-X

I. 数… II. ①谷… ②王… ③薛… III. 数字滤波器-信号处理  
IV. TN713

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 031871 号

责任编辑 王 炜 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>

深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

印数:1—4 000 字数:190 000

**定 价: 20.00 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的。

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

数字滤波器在需要进行数字信号处理的许多系统中起着重要作用。实际上,语音处理设备、图像处理设备和数字通信系统等各种系统中都使用数字滤波器。

模拟滤波器是数字滤波器的基础。因此,本书将首先对具有频率选择性的各种模拟滤波器进行详细说明,然后概要介绍数字滤波器的基本内容。接着对有限长单位冲激响应(FIR)滤波器和无限长单位冲激响应(IIR)滤波器进行详细说明,最后介绍几种特殊的数字滤波器。

第1章介绍模拟滤波器概况。首先介绍频率选择性的概念及各种模拟滤波器,作为其代表性实例,对巴特沃思(Butterworth)滤波器、切比雪夫(Chebyshev)滤波器、椭圆滤波器的特点及设计方法进行详细说明。

第2章概要介绍数字滤波器。数字滤波器的频率选择性概念与模拟滤波器是相同的,但数字滤波器能很容易地实现线性相位特性,并且能得到比模拟滤波器更高的精度。另外,本章还对数字滤波器的有关基本内容进行了简要说明。

第3章给出了FIR数字滤波器的几种有代表性的设计方法。首先介绍利用窗函数设计线性相位FIR滤波器的方法,将给出几个窗函数及各窗函数的特点,并对将这些窗函数用于FIR滤波器设计时所得到的滤波器特性进行比较。然后介绍利用均方误差最小准则和最大误差最小化准则设计线性相位FIR滤波器的最优化方法。利用均方误差最小

准则可以得到按通带和阻带平均的优化幅频特性,但其波纹的最大值较大。利用最大误差最小化准则可使最大波纹减至最小并得到等波纹滤波器。但就其截止特性而言,则不如利用均方误差最小准则的效果好。

第4章给出 IIR 滤波器的几种有代表性的设计方法。首先介绍 IIR 滤波器的  $s$ - $z$  变换设计法,然后介绍振幅平方函数近似法和频率变换法。与 FIR 滤波器相比,IIR 滤波器的优点是能以低阶滤波器得到满意的幅频特性。虽然 IIR 滤波器不能实现严格意义上的线性相位,但只要进行合理的设计,就能获得与实用上的线性相位滤波器几乎相同的相位特性。

第5章中,作为特殊的数字滤波器,介绍希尔伯特(Hilbert)变换器和二维数字滤波器的设计方法。这些滤波器既可以用 FIR 滤波器来实现,也可以用 IIR 滤波器实现。希尔伯特变换器可用作数字通信中的调制解调器。二维数字滤波器可进行各种二维图像的处理。

本书以数字滤波器为中心,对其种类、功能、特点和设计方法等进行了详细说明。书中没有讲到的有关基础知识,请参见本系列中的《数字信号处理基础理论》一书。关于数字滤波器在各种领域中的应用,请参看本系列的其他分册。

谷萩隆嗣

## 著者简历

谷 获 隆 嗣

1966 年 东京工业大学工学部电子工学科毕业

1971 年 东京工业大学研究生院理工学研究科  
电子工学专业博士课程修了,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



# 目 录

<b>第 1 章 模拟滤波器概要</b> .....	1
1.1 模拟滤波器的种类 .....	2
1.1.1 模拟滤波器的频率特性 .....	2
1.1.2 无源滤波器与有源滤波器 .....	4
1.2 巴特沃思滤波器 .....	11
1.2.1 巴特沃思滤波器的定义 .....	11
1.2.2 巴特沃思滤波器的传递函数 .....	12
1.2.3 巴特沃思滤波器的幅频特性 .....	15
1.2.4 巴特沃思滤波器的相频特性 .....	19
1.2.5 巴特沃思滤波器的设计指标 .....	20
1.2.6 利用频率变换设计滤波器 .....	22
1.3 切比雪夫滤波器 .....	23
1.3.1 切比雪夫多项式 .....	23
1.3.2 切比雪夫 I 型滤波器 .....	26
1.3.3 切比雪夫 II 型滤波器 .....	37
1.3.4 切比雪夫滤波器的设计指标 .....	50
1.4 椭圆滤波器 .....	54
1.4.1 椭圆函数 .....	54
1.4.2 椭圆滤波器的概念 .....	58
1.4.3 椭圆滤波器的设计 .....	59

<b>第 2 章 数字滤波器概要</b>	73
2.1 用数字滤波器进行信号处理	74
2.1.1 数字滤波器与信号处理过程	74
2.1.2 数字滤波器的种类	76
2.2 数字滤波器的频率特性	78
2.2.1 幅频特性	78
2.2.2 相频特性	80
2.3 数字滤波器的时间响应	85
2.3.1 单位冲激响应	85
2.3.2 单位冲激响应的近似	87
2.3.3 各种数字滤波器的单位冲激响应	90
2.4 数字滤波器的结构	98
2.4.1 有限长单位冲激响应(FIR)滤波器	98
2.4.2 无限长单位冲激响应(IIR)滤波器	104
2.5 格型滤波器	109
2.5.1 格型滤波器的导出	109
2.5.2 格型滤波器的稳定性	111
2.6 数字滤波器与量化	113
2.6.1 系数的量化	113
2.6.2 数值的量化	118
2.6.3 极限环	120
2.6.4 输入的量化	122
<b>第 3 章 有限长单位冲激响应(FIR)数字滤波器</b>	125
3.1 FIR 滤波器的窗函数法设计	126
3.1.1 窗函数的引入	126

3.1.2	窗函数的种类	127
3.1.3	窗函数的比较	132
3.1.4	窗函数的应用	136
3.2	FIR 滤波器的均方误差最小准则设计	147
3.3	FIR 滤波器的最大误差最小化准则设计	155
3.3.1	最大误差最小化问题	155
3.3.2	FIR 滤波器的设计	162
<b>第 4 章</b>	<b>无限长单位冲激响应 (IIR) 数字滤波器</b>	<b>173</b>
4.1	IIR 滤波器的 $s$ - $z$ 变换设计	174
4.1.1	标准 $z$ 变换	174
4.1.2	双线性 $z$ 变换	176
4.2	IIR 滤波器的振幅平方函数近似法设计	187
4.3	IIR 滤波器的频率变换法设计	190
4.4	近似线性相位 IIR 滤波器的设计	196
4.4.1	近似线性相位 IIR 滤波器的时域设计	197
4.4.2	近似线性相位 IIR 滤波器的频域设计	200
4.4.3	相位延迟可变的近似线性相位 IIR 滤波器的设计	205
<b>第 5 章</b>	<b>特殊数字滤波器</b>	<b>211</b>
5.1	希尔伯特变换器	212
5.1.1	理想希尔伯特变换器	212
5.1.2	FIR 希尔伯特变换器的设计	214
5.1.3	IIR 希尔伯特变换器的设计	217
5.2	二维数字滤波器	221

5.2.1	FIR 滤波器与 IIR 滤波器	221
5.2.2	二维数字滤波器的稳定性	225
5.2.3	二维 FIR 滤波器的设计	227
5.2.4	二维 IIR 滤波器的设计	231
参考文献		235
索 引		239

# 第1章

# 模拟滤波器概要



- 1.1 模拟滤波器的种类
- 1.2 巴特沃思滤波器
- 1.3 切比雪夫滤波器
- 1.4 椭圆滤波器

具有频率选择性的典型的模拟滤波器,有已熟知的巴特沃思滤波器(Butterworth filter)、切比雪夫滤波器(Chebyshev filter)以及椭圆滤波器等。如从功能方面对模拟滤波器进行分类,可以分为低通滤波器、带通滤波器、高通滤波器、带阻滤波器和全通滤波器等。其中仅采用无源元件就可以实现的滤波器称为无源滤波器,使用有源器件的滤波器称为有源滤波器。目前,模拟滤波器仍被广泛使用着,并且作为数字滤波器的基础,这也是一类非常重要的滤波器。

## 1.1 模拟滤波器的种类

### 1.1.1 模拟滤波器的频率特性

设模拟滤波器的频率传递函数(frequency transfer function)为  $H(j\omega)$ ,则  $H(j\omega)$ 可表示为

$$H(j\omega) = |H(j\omega)| \angle H(j\omega) = |H(j\omega)| e^{j\phi(\omega)} \quad (1.1)$$

$|H(j\omega)|$ 表示滤波器的幅频特性(magnitude characteristics),  $\angle H(j\omega)$ 和  $\phi(\omega)$ 表示滤波器的相频特性(phase characteristics)。式中  $j = \sqrt{-1}$ 是虚数单位。另外,设  $f$ 为频率(frequency),  $\omega$ 为角频率(angular frequency),则  $\omega = 2\pi f$ 。

如果用频率选择性对模拟滤波器分类,可以分为低通滤波器(low pass filter)、高通滤波器(high pass filter)、带通滤波器(band pass filter)、带阻滤波器(band stop filter, band rejection filter or band elimination filter)。图 1.1 所示为这些滤波器的幅频特性。另外,当滤波器在全频带中满足  $|H(j\omega)| = 1$  时,称为全通滤波器(all pass filter),可用于改善滤波器的相频特性。

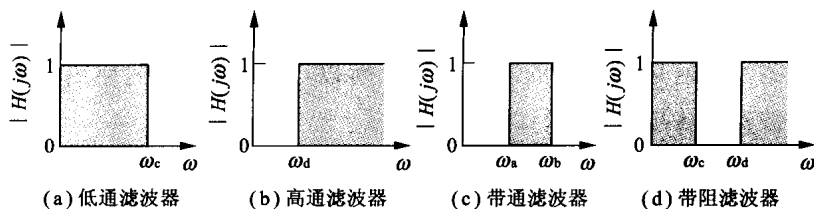


图 1.1 模拟滤波器的幅频特性

设计图 1.1 所示幅频特性的滤波器时,可利用模拟器件来近似得到这些特性。例如,在低通滤波器中,作图 1.2 所示的近似,图中阴影部分表示允许的频带范围。图中  $0 \leq \omega \leq \omega_c$  表示通带(通频带)(pass band),  $\omega \geq \omega_r$  表示阻带(截止带)(stop band)。它们所允许的变化幅度为 1 至  $1/B$  到  $1/A$ ,如果太窄,用低阶滤波器将难以实现。另外,  $\omega_c \leq \omega \leq \omega_r$  的范围表示过渡带(转移带)(transition band)或者迁移带。如果  $\omega_r - \omega_c$  较宽,截止特性就差。

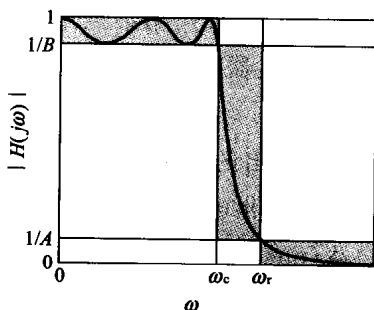


图 1.2 低通滤波器的幅频特性示例

图 1.2 的阴影部分是作为滤波器的设计要求所给出的指标,根据不同的使用目的,指标是不同的。例如,当着眼于图 1.2 通带的波纹(ripple)时,欲使波纹振幅(ripple width)变窄,就必须使  $1/B$  接近于 1。又比如,要改善滤波器的截止特性,使阻带的最大幅度  $1/A$  变小,

就需要使用高阶滤波器才能实现。通常要求滤波器的截止特性陡峭,将使滤波器通带和阻带的波纹增大。所以,应根据不同的使用目的,对滤波器的各项指标进行综合考虑。

**注 1.1** 如式(1.1)所示,滤波器的频率特性可分为幅频特性和相频特性,它们都是表示滤波器特性的重要特性。但在模拟滤波器的设计中,一般只考虑滤波器的幅频特性,而在数字滤波器的设计中,如第2章所述,有可能同时考虑幅频特性和相频特性。

### 1.1.2 无源滤波器与有源滤波器

用电感线圈( $L$ )、电容器( $C$ )、电阻器( $R$ )等无源元件来实现的滤波器称为**无源滤波器**(passive filter),使用**运算放大器**(operational amplifier)<sup>[1~5]</sup>等有源器件才能实现的滤波器称为**有源滤波器**(active filter)。表面看来用什么元器件都可以得到相同特性的滤波器,但实际上无源滤波器中,由于 $L$ 、 $C$ 、 $R$ 等元件存在精度及频率特性等问题,当滤波器连接后,就会产生模拟滤波器中存在的特殊问题。所以使用中必须充分考虑这些问题。如果使用集成电路(IC: Integrated Circuit),则使有源滤波器在滤波器的精度、增益(gain)以及小型化等方面更为有利。

图 1.3 表示双输入单输出的理想运算放大器。理想运算放大器中,由于输入电阻  $R_{in}$  为  $\infty$ ,输出电阻  $R_{out}$  为 0,所以有  $i_1 = 0, i_2 = 0$ 。设运算放大器的开环增益(open-loop gain)为  $G$ ,则  $v_3 = Gv_0 = G(v_1 - v_2)$ 。由于理想运算放大器的  $G = \infty$ ,所以  $v_0 = 0$ 。

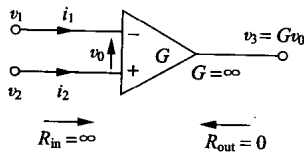


图 1.3 理想运算放大器



实际运算放大器的特性与理想运算放大器是不同的,但在使用场效应晶体管(FET:Field Effect Transistor)的运算放大器中,输入电阻约为  $R_{in} = 10^{12} \Omega$ ,输入电流小于 10 皮安(pA),因而增益  $G$  可以超过  $10^7$ 。输出电阻可以忽略,所以理想运算放大器基本是能够实现的。

下面我们来分析图 1.4 所示的电路,这是一个利用运算放大器的电路,输入端的阻抗为  $Z_1(s)$ ,输出端的阻抗为  $Z_2(s)$ 。

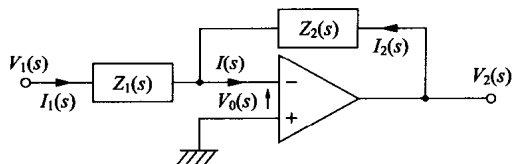


图 1.4 使用运算放大器的线路

现在设输入电压为  $V_1(s)$ ,输出电压为  $V_2(s)$ ,传递函数(transfer function)  $H(s)$  应满足以下各式的关系:

$$V_1(s) = Z_1(s)I_1(s) + V_0(s) \approx Z_1(s)I_1(s) \quad (1.2)$$

$$V_2(s) = Z_2(s)I_2(s) + V_0(s) \approx Z_2(s)I_2(s) \quad (1.3)$$

$$I(s) = I_1(s) + I_2(s) \approx 0 \quad (1.4)$$

所以

$$H(s) = \frac{V_2(s)}{V_1(s)} \approx \frac{Z_2(s)I_2(s)}{Z_1(s)I_1(s)} \approx -\frac{Z_2(s)}{Z_1(s)} \quad (1.5)$$

这样,用很简单的形式即可以表示输出电压与输入电压之比,但应注意  $Z_2(s)/Z_1(s)$  的前面有一个负号。

例如,使用理想运算放大器,设  $Z_1(s) = R_1$ ,  $Z_2(s) = R_2$ ,即可得到

$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (1.6)$$

输出电压为输入电压的常数倍。特别在  $R_1 < R_2$  时,即为反相放大器(inverting amplifier);当  $R_1 > R_2$  时,即为反相衰减器(inverting atten-