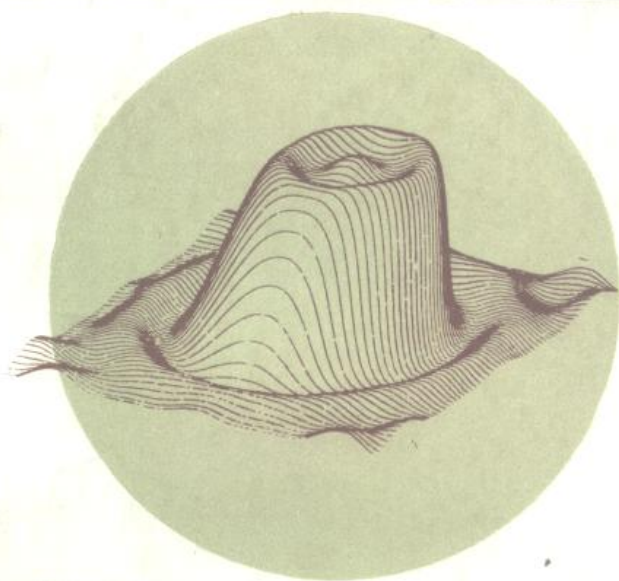


〔美〕 黄 煦 涛 主 编



二维数字 信号处理 I

线性滤波器

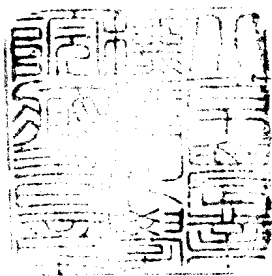
科学出版社

二维数字信号处理 I

线性滤波器

〔美〕黄煦涛 主编

徐元培 译



科学出版社

1985

2560/13

内 容 简 介

本书为联邦德国施普林格出版社出版的《应用物理丛书》第四十二卷,专门讨论线性二维数字滤波问题。全书共分五章:介绍1975年以来的在非递归数字滤波和递归数字滤波方面的新成果,并且介绍把卡尔曼滤波推广到二维情况及应用到图象复原上的效果。本书由美国著名教授黄煦涛主编,各章分别由有关方面有成就的教授和专家撰写。

本书可供遥感技术、生物医学、天文、通信、气象、工业自动控制 and 国防等部门从事信息科学或与计算机有关的广大科技人员以及大专院校有关专业的师生参考,也可作为高年级大学或研究生有关课程的教材或教学参考书。

T. S. Huang (Ed.)

TWO-DIMENSIONAL DIGITAL SIGNAL PROCESSING I

Linear Filters

Springer-Verlag, 1981

二维数字信号处理 I

线性滤波器

〔美〕黄煦涛 主编

徐元培 译

责任编辑 刘兴民

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1985年3月第 一 版	开本: 787×1092 1/32
1985年3月第一次印刷	印张: 9
印数: 0001—5,600	字数: 201,000

统一书号: 15031·633

本社书号: 3391·15-7

定价: 2.10 元

译者的话

如今是信息爆炸的时代，一切社会活动均离不开对各种信号的传送、加工、显示等种种处理。而图象信息则是各类信息中最重要的一类。单张图象是空间坐标的二变量函数，因此是最常见的二维信号。

因为任何信号都有它的频谱，改变信号的频谱，就可改变信号的特征。很多图象处理的要求就是要改变原始图象的频谱或者说对原始图象的频谱进行补偿以达到种种不同的效果，如增强、复原、匹配、去噪声等处理即是。数字滤波器就是专门用来改变图象信号频率特性的一种有效的处理方法。因而可不夸张地说，二维数字滤波是图象处理中常用的方法之一。而一维数字滤波是信号处理中最基本的处理方法。由著名学者执笔的大多数数字信号处理的书都花了很大的篇幅来讨论数字滤波问题。可见数字滤波在信号和图象处理中的重要性。

这本书专门介绍 1975 年以后在二维非递归滤波器和二维递归滤波器方面的最新成果，及把卡尔曼滤波推广至二维情况并应用于图象复原的问题。实际上可以认为这是 1975 年出版的那本《图片处理和数字滤波》一书（中译本于 1980 年由科学出版社出版）的继续。第一章由主编黄煦涛教授简单讨论图象处理几个方面的发展情况和要求，并概括介绍在 1975 年以来滤波方面的新的进展。第二章深入讨论了设计非递归滤波器的变换法和多点替换算法。前者特别适合于设计圆对称低通和带通滤波器，后者则可获得真正切比雪夫意

义上最优的滤波器。第三章主要讨论单象限平面及非对称半平面二维递归滤波器的设计,后者是前者的一种推广。设计出的滤波器的稳定性是有保证的。其中最突出之处为该章作者所发展的二变量网络的概念并用它解决了二维QP滤波器设计的一般稳定性问题。第四章专门讨论各种检验二维递归滤波器稳定性的方法。其中朱里列表法值得重视。第五章是很多人感兴趣的二维卡尔曼滤波。因为卡尔曼滤波是一种迭代算法,所花计算时间很长,因而发展了条带滤波器及简化更新的滤波器,都是为了减少计算次数。而其应用于图象复原的结果也是很吸引人的,因为可达到既去掉噪声及象质变坏因素而又保留图象边缘的目的,在主观感觉上的效果也极为良好。

这本书把读者带到了目前在线性滤波方面研究工作的最前线,这些都是最新成果,反映了线性数字滤波方面的最新水平,是从事这方面工作的科技人员和大学教师的很好的参考书,也可作为研究生的参考教材。

本书译完之后,曾请中国科学院学部委员、清华大学自动化系常遇教授作了仔细的审阅,特此致谢。

在翻译过程中,对原书中明显的印刷错误作了改正。但由于译者水平有限,译文定有不少不妥之处,请读者批评指正。

译者

1983年5月

前 言

过去十年里数字图象处理的研究工作一直在飞速地发展。当认识到图象处理在广义上说就是多维信号的处理、并且在实际世界中大多数的信号也是多维信号之后，大家对这样飞速的发展也就不足为奇了。事实上，我们所处理的一维信号常常是退化了的的多维信号。例如，常常把言语看作是一维信号，即单变量（时间）函数。但言语实际是存在于空间之中的，所以它是四个变量的函数（三个空间变量，一个时间变量）。

不仅可用数字技术来作图象处理，也可用模拟技术（光学方法，电光学方法）来进行图象处理。由于数字技术所固有的优点（灵活性大、精度高），且由于计算机及有关工艺技术如大规模集成电路和超大规模集成电路的快速发展，我们可以公平地说，除了某些特殊问题之外，通常还是优先采用数字技术。

本卷以及讨论各种变换及中值滤波器的另一卷的目的是为解决图象处理问题而深入讨论三种最重要的数字技术：线性滤波器、变换、及中值滤波。这两本书是互相有关的，但也可以独立地使用。

在早些时出版的那套丛书中的《图片处理和数字滤波》一书*（1975年第一版）中，已选择了二维数字信号处理中的一些课题作了深入的讨论，这些课题包括变换、滤波器设

* 该书的中译本已于1980年底由科学出版社出版。——译者注

计及图象复原等。从那时以后，这几个方面都取得非常大的进展。在1978年，当我们计划出版那本书的第二版（已于1979年出版）时，决定不对第一版作重大的改动，而只新加上一章来对当时的最新成果作一简单的综述。我们打算在未来的施普林格物理学出版计划内对重要的最新成果再作深入的讨论。

这次把二维数字信号处理分成三部分。第一部分讨论线性滤波器，放在本卷内，介绍了二维非递归和递归滤波器设计的一些主要的近期成果，还有稳定性检验及卡尔曼滤波（及其在图象增强和复原中的应用）问题。其中关键之处为讨论半平面递归滤波器的设计和稳定性检验，这是一个广为感兴趣的课题。

第二和第三部分包括在第二卷内。第二部分是关于变换问题的，讨论了两个问题：大矩阵转置的算法、变换及卷积中的数论技术，并仔细推导了威诺格雷德（Winograd）-傅里叶变换法。

在第一部分和第二部分中，主要内容为线性处理。第三部分为中值滤波，研究的是一种特殊的非线性处理技术。中值滤波在图象处理和言语处理中已经用得相当普遍，不过发表的结果还很少。在第三部分的两章里包括了一些新结果，其中大部分还是首次发表的。

这些章节实质上是教学性的，但它也把读者引至目前正在第一线研究的问题上。这两本书的写法可作为从事这方面工作的科学家和工程师的参考书，也可作为数字信号处理、图象处理及数字滤波等正规课程或短训班的补充教科书。

黄煦涛

1980年9月于美国伊利诺斯，厄巴纳

目 录

译者的话

前 言

第一章 引言 黄煦涛(1)

1.1 图象处理 1

1.1.1 有效编码 1

1.1.2 复原和增强 2

1.1.3 模式识别 4

1.1.4 概要 5

1.2 线性滤波器 5

1.2.1 非递归滤波器设计 6

1.2.2 递归滤波器——稳定性 7

1.2.3 递归滤波器——设计技术 8

1.2.4 卡尔曼滤波 9

参考文献 10

第二章 二维非递归滤波器设计 R. M. 默塞雷(13)

2.1 二维非递归数字滤波器 13

2.1.1 滤波器的规范 13

2.1.2 非递归滤波器的实现 16

2.2 用窗口法设计非递归滤波器 18

2.2.1 设计步骤 19

2.2.2 窗口的规范 19

2.3 用变换法设计非递归滤波器 22

2.3.1 变换方法 23

2.3.2 变换函数的设计 27

2.3.3 变换法滤波器的实现	32
2.3.4 变换法实现同其它实现方法的比较	34
2.4 二维等波纹非递归滤波器的设计	36
2.4.1 等波纹设计问题	37
2.4.2 上升算法	40
2.4.3 修改上升算法用以改进收敛速度	45
2.4.4 计算上的问题	47
2.4.5 变换法设计的最佳条件	48
2.5 总述	49
参考文献	50

第三章 二维递归滤波器设计

.....P. A. 拉马穆尔塞 L. T. 布鲁顿(51)

3.1 预备知识和定义	51
3.1.1 单象限平面因果性递归滤波器	52
几种特殊类别的单象限平面(QP)滤波器	54
3.1.2 非对称半平面(NSHP)递归滤波器	56
3.1.3 递归滤波器的稳定性	57
因果递归滤波器的稳定性	58
非对称半平面(NSHP)递归滤波器的稳定性	59
3.1.4 双线性变换在稳定性中的用途	59
3.2 单象限平面递归滤波器设计	61
3.2.1 直接最优化技术	63
评注	64
例1 一阶二维高通滤波器设计	65
3.2.2 利用变换变量进行设计	66
评注	68
3.3 高阶递归滤波器的设计	69
评注	73
例2 圆对称低通滤波器设计	77
例3 全通滤波器设计	79

3.3.1	冲激响应有限的单象限平面滤波器的设计	82
3.4	半平面递归滤波器的设计	85
3.4.1	特殊类型的非对称半平面滤波器的设计 ^(3.10)	86
	例4 扇形滤波器设计	89
3.4.2	采用谱因式分解来设计非对称半平面滤波器	91
	用于滤波器的设计	93
	例5 扇形滤波器设计	95
3.4.3	稳定的非对称半平面滤波器的设计——	
	二变量网络法	95
	评注	100
	例6 扇形滤波器设计	101
	用于设计对称半平面滤波器	102
3.5	小结	104
	参考文献	106
第四章	一般二维递归滤波器的稳定性	
	B. T. 奥康诺 黄煦涛(107)	
4.1	基础知识	107
4.2	引导性评论	111
	例1 (E1)	111
4.3	一般递归滤波器	113
	例2 (E2)	118
	例3 (E3)	119
	例4 (E4)	127
	例5 (E5)	130
4.4	稳定性定理	131
	例6 (E6)	135
4.5	多维滤波器的一个有意义的性质	138
4.6	一般稳定性定理	140
	例7 (E7)	142

4.7	稳定性检验引论	146
4.8	利用稳定性定理进行检验	147
4.9	代数法	149
4.9.1	黄煦涛-安塞尔 (Ansell) 法	150
4.9.2	玛丽亚和法米检验	152
4.9.3	安得森、朱里及西利雅克检验	153
4.9.4	博塞检验	154
4.9.5	第一象限法小结	154
4.9.6	示例	155
4.10	用映射检验法检验第一象限滤波器	158
4.10.1	根映射法	162
4.10.2	奈奎斯特检验法	164
4.10.3	积分的对数微分法	168
4.10.4	朱里检验法	169
	例 8 (E8)	170
4.10.5	詹森公式	171
4.10.6	讨论	174
4.11	其它第一象限稳定性检验法	176
4.11.1	二维倒频谱	176
4.11.2	用倒频谱来检验稳定性的方法	178
	例 9 (E9)	181
4.12	确定 T^2 上 $B(w, z)$ 的零点的存在	183
	例10 (E10)	190
	例11 (E11)	191
	例12 (E12)	192
4.13	求二维傅里叶变换的零点	193
4.14	一般递归滤波器的频率响应	195
	附录 A: 一维多项式的根分布检验	198
	参考文献	200

第五章 二维卡尔曼滤波 J. W. 伍兹(202)

5.1 概述	203
5.2 马尔柯夫图象模型	204
5.2.1 空间不变、高斯型模型	204
5.2.2 空间变化模型	207
高斯模型	207
空间马尔柯夫链	208
双重随机高斯场	211
5.3 卡尔曼滤波器	213
5.3.1 二维卡尔曼滤波	214
二维标量卡尔曼滤波器	214
适于向量观测方程的卡尔曼滤波器	217
5.3.2 近似方法	218
条带滤波器	218
条带动态模型	219
条带宽度的最优选择	222
例	223
简化更新的滤波器	224
简化更新的滤波器的推导	227
标量方程	228
为强化最优所需的修正	230
对强最优的近似	230
计算量	232
例	235
5.3.3 推广至图象复原	236
例	238
5.3.4 仔细考查边界条件	240
简化更新的滤波器	245
5.3.5 多重模型估计	247
多重模型递归估计	248

例	251
双重随机高斯估计	254
例	255
5.4 系统辨识	257
5.4.1 谱模型的建立	257
谱因式分解	258
5.4.2 线性预测技术	260
5.4.3 多重模型辨识	264
双重随机高斯情况	266
5.5 结论	267
参考文献	268
具有论文题目的附加文献	269
汉英名词对照索引	271

第一章 引 言

黄 煦 涛 (T. S. Huang)

1.1 图 象 处 理

推动本书中所介绍的数学技术得到应用的领域是图象处理。为了给大家以适当的概貌，我们将先总括介绍一下图象处理中三个主要的方面：有效编码、复原与增强以及模式识别。

1.1.1 有效编码

用数字方法传输和存储图象，所要求的位数常常是极大的。采用有效编码以减轻这些要求不仅是一件想做的事情，而且在很多情况下也是一件非做不可的事情。以往很多研究运动图象编码问题的出发点主要来自可视电话；而近来，应用的兴趣则是广播电视及会议电视。若对NTSC的彩色视频信号（广播电视）以10.7兆赫频率（3倍于彩色亚载波频率）采样，并把每个采样值整量化为256灰级（8位）的话，则位传输率将为85.6兆位/秒。目前已经建成了达到广播电视质量要求的图象传输系统，它采用了各种帧内及帧间编码技术，位传输率约为20兆位/秒。对会议电视来说，图象中的运动较少且也允许有较大的图象误差，故位传输率可低至2—5兆位/秒。

另一个要求有效编码的场合是陆地卫星（LANDSAT）多光谱图象的存储和传输。据估计，三个陆地卫星1，2，3

中的每个卫星所产生的数据量约为 1.5×10^{18} 位/年。LAND-SAT 4 的图象分辨率更高，它输出的数据量约为 3.7×10^{15} 位/年，因而需要很高的压缩系数以便使数据易于管理。这些多光谱图象的不同用户所要从中抽取的特征也各不相同，因此也难于决定数据中哪些失真和畸变是可以接受的。从保险的角度来考虑，人们大概都会要求原始的数字化数据基本上没有失真和畸变，这就使大量压缩成为不可能。

对帧内和帧间编码来说，行之有效的通用方法为高频颤动法、预测编码法及变换域编码法。在很多系统中，这些技术常常结合起来应用。

1.1.2 复原和增强

复原和增强的目的都是为了改进图象质量，但它们之间的分界线并不很明确。粗略地说，当谈到复原时，我们已明确知道象质变坏的因素（如镜头散焦），并要设法消除这些变坏的因素以便获得理想的图象（即要获得没有畸变和失真的图象）。增强所包括的范围更宽些。在这里，我们是要把图象变得能适合于某种目的，而并不一定要获得理想图象。

成功地进行了图象复原的最突出的例子要算喷气推进实验室（JPL）的工作了，他们对人造卫星上TV照相机所拍摄的月球、火星及其它行星的图象作了复原处理，成功地对各种象质变坏的因素进行了补偿，如：随机噪声、干扰、几何畸变、不均匀场、低对比度及模糊等。对通过大气层所成的象的复原是推动大量图象复原研究工作的另一个原因，但至今尚未有令人满意的解答。这个问题的目的是想要由地球上的摄象系统来获得高质量的行星、恒星及人造卫星的图象。其象质变坏的主要因素是由于大气紊流对图象所造成的模糊。

图象复原方法有两类：“先验”法和“后验”法，人们试图发明一种新的成象方法，通过它就能得到优质图象，这种办法称为先验法。后验法则仍由普通的成象系统如镜头来摄取图象，然后改进其象质。对通过大气层成象的问题来说，已经有人提出了好几种先验的办法，其中包括全息技术及编码孔径成象，后者已经获得了某些成功。在自适应光学处理方面正在作深入细致的研究，测出大气所造成的相位干扰，并利用可控可变形光学系统实时地补偿这种相位干扰。

在后验方法的研究中，主要的工作集中在线性象质变坏问题上，这是因为大多数图象的象质变坏的因素都能恰当地用三个串级的子系统这样的模型来表示：线性部分、无存储的非线性部分及噪声。例如感光胶片就可用这种模型，其线性部分代表化学扩散所引起的模糊，无存储的非线性部分代表了 $H-D$ 曲线，而噪声则是由胶片上感光颗粒所产生的。“无存储”一词的意思如下：若在任何给定点处的输出值只由相应点处的输入信号值所决定，而与任何其它输入点处的信号无关，则一个二维系统就称之为无存储系统。倘若知道了象质变坏的特性，则无存储非线性部分的补偿就是很简单的。更困难的事情则是线性象质变坏的补偿，或等效地说是找出线性象质变坏的逆。图象复原方法的性能最后还受噪声的限制。

若线性象质变坏是空间-不变的话，则就可用傅里叶技术（如维纳滤波）来作逆向处理。线性空间不变的象质变坏因素包括镜头的散焦和球差、相机相对于物体的横向移动等。在利用傅里叶技术时，我们对象质变坏了的图象进行线性空间不变的（LSI）逆滤波来达到复原效果，但LSI逆滤波有些限制因素。因为这种滤波过程是把象质变坏图象的每一个空间频率成分都乘以一个复常数，所以它不能改变任一

空间频率处的信噪比。这种滤波过程能做的事情只是把信号大于噪声的那些频率成分加以提升并对噪声大于信号的频率成分加以抑止而已。更受人关注的本质问题还在于这种滤波器不能恢复理想图象中被带限象质变坏系统所截去的那部分频率成分，这种问题有时可陈述为：“LSI 逆滤波器是不能实现超分辨率的”。

为了实现超分辨率，我们得采用非线性（NL）或线性空间变化（LSV）的技术，并还需要利用信号的一些附加信息。就非相干成像系统来说，我们总是会有这样一个信息：图象是非负的。另一个并不总是正确的信息就是产生图象的景物可能是处在均匀背景中而空间大小为有限的物体。

现已提出了利用这些信息的若干LSV和NL复原方法。这些方法可分为两大类：频率域技术和空间域技术。已经证明后者是更成功的，这主要是因为有关信号的信息都是在空间内表示的，且把其转换至频率域内又是很不明智的。空间域技术还有另一个优点，即它也能够应用于线性空间变化的象质变坏〔如镜头象差（不包括球差）、照相机相对于物体的旋转等〕问题。

在许多LSV技术中，有些方法是以广义矩阵逆为基础的，它包括奇异值分解和投影迭代法。NL技术则包括最大熵法和贝叶斯估计技术。一般来说，这些方法所得到的复原要比傅里叶法为好，但必须付出计算复杂的代价。例如，即使对 128×128 点那样小的图象来说，把空间域法处理放在小型计算机（如有浮点运算硬件的PDP11/45）上进行的话可能要几小时的时间。

1.1.3 模式识别

狭义上说，模式识别的意思是把一给定而未知的模式分