

非线性滤波器 与数字图像处理

陈荣贵 著

国防工业出版社

非线性滤波器 与数字图像处理

陈贺新 著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

非线性滤波器与数字图像处理/陈贺新著. —北京:国防工业出版社, 1997. 9

ISBN 7-118-01703-5

1. 非…Ⅱ. 陈…Ⅲ. 非线性滤波器-应用 数字图像处理 IV. TN919.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 01318 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 8 1/4 211 千字

1997 年 9 月第 1 版 1997 年 9 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:17.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模		
主任委员	黄 宁		
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允
	曾 铎		
秘 书 长	刘琯德		
委 员	尤子平	朱森元	朵英贤
(按姓氏笔划为序)	刘 仁	何庆芝	何国伟
	何新贵	宋家树	张汝果
	范学虹	胡万忱	柯有安
	侯 迁	侯正明	莫梧生
	崔尔杰		

前 言

在人类探索自然科学乃至社会科学的奥秘过程中,发现各种复杂现象都是各种因子、各种尺度运动之间的非线性相互作用的结果。由于这些非线性因素之间的关系无法利用线性理论与技术揭示与表征,因此,自 70 年代以来,非线性科学就逐渐形成了一门崭新的学科,并且成为各学科共同关注的真正近代基础研究之一。

非线性滤波器是非线性科学中的一个重要分支。在近代数字信号处理中,非线性滤波器对于解决雷达、通信、水声、遥测、自动控制、地球物理、生物医学、图像处理、语音处理、模式识别、振动分析等领域中的复杂问题与现象有重要的意义。

与线性滤波器不同,非线性滤波器很难用确定性的时间函数或者频率函数来描述,它必须用统计方法来研究,用离散数学方法来表示。非线性滤波器以稳健统计学和形态学为理论基础,融合信息论、统计估计理论、自适应理论、随机噪声理论以及计算机技术等学科的知识,能够在很好地保护信号细节的同时,去除信号中的噪声。特别在数字图像处理中,非线性滤波器作为一种有效的处理理论与技术,得到了广泛应用与重视。

作者多年来从事非线性数字图像处理理论与应用技术的研究与教学工作。在研究工作中,发展了非线性滤波理论,提出了全方位多级中值滤波器,创立了对称加权中值滤波的收敛理论,利用次序统计理论将秩统计滤波器、形态滤波器、同态滤波器以及多项式滤波器等与中值滤波器在理论上统一起来,这些都给研究和设计非线性滤波器提供了理论依据与保障。

本书是作者多年来研究与教学工作的结晶,考虑到非线性滤

波器特点,从理论和技术的系统性入手,较全面地介绍了非线性滤波器的一些研究方法。

本书写作过程中,得到了中国科学院长春光机研究所宋健中教授和吉林大学庞云阶教授的帮助,他们审阅了全稿,并提出了许多宝贵的意见和建议;吉林工业大学戴逸松教授对编撰工作给予大力支持;作者指导的硕士博士研究生也为本书做了许多工作,在此一并表示衷心的感谢。

本书力图将各学科有关知识融为一体进行系统的理论阐述,并将非线性滤波理论与数字图像处理联系在一起。因此,要求读者具有数字图像处理、概率论与数理统计、随机过程、稳健统计、形态学以及数字滤波器的基本知识。作者希望本书能对从事数字信号处理与数字图像处理的科学技术人员以及高等院校有关师生有所裨益。

由于非线性科学理论性强,技术性新,加之作者水平有限,难免有不妥或者错误之处,敬请读者指正。

陈贤新

目 录

第一章 非线性滤波器	(1)
1.1 原理与定义	(1)
1.2 性能评价	(2)
1.3 分类与发展	(4)
第二章 次序统计滤波器	(6)
2.1 稳健统计基础	(6)
2.2 α -修正均值滤波器	(25)
2.3 L -滤波器	(28)
2.4 M -滤波器	(34)
2.5 R -滤波器	(36)
第三章 中值滤波器	(39)
3.1 一维中值滤波器	(39)
3.2 中值的位置估计	(44)
3.3 常数信号和白噪声	(49)
3.4 信号边缘和白噪声	(55)
3.5 非白噪声的中值滤波器	(62)
3.6 中值滤波器输出的自相关函数	(63)
3.7 一维中值滤波器根信号	(65)
3.8 级叠滤波器	(67)
3.9 根信号构成	(72)
3.10 二维中值滤波器	(76)
3.11 二维根信号的形状	(81)
第四章 改进型中值滤波器	(85)
4.1 极大/中值滤波器	(85)
4.2 混合中值滤波器	(94)

4.3	秩统计滤波器	(99)
4.4	矢量中值滤波器	(103)
4.5	加权中值滤波器	(109)
4.6	递归中值滤波器	(111)
4.7	中值滤波器的收敛速率	(114)
4.8	次序统计滤波器与中值滤波器的关系	(116)
第五章	同态滤波器与多项式滤波器	(120)
5.1	同态滤波器	(120)
5.2	非线性均值滤波器	(125)
5.3	多项式滤波器	(127)
5.4	非线性维纳滤波器	(132)
第六章	形态图像与滤波处理	(138)
6.1	形态学基础	(138)
6.2	形态开闭	(146)
6.3	图像形态变换	(150)
6.4	形态滤波器	(158)
6.5	形态骨架	(167)
6.6	形态分解	(175)
6.7	形态细化和浓缩	(178)
第七章	自适应非线性滤波器	(180)
7.1	稳健尺度估计	(180)
7.2	非线性边缘检测	(182)
7.3	消除脉冲噪声的次序统计滤波器	(187)
7.4	自适应秩统计滤波器	(189)
7.5	自适应级叠滤波器	(201)
7.6	自适应 L -滤波器	(217)
7.7	自适应非线性滤波器性能比较	(219)
第八章	彩色图像的非线性滤波器	(221)
8.1	彩色图像处理基础	(221)
8.2	多变量数据的次序统计	(223)
8.3	多维位置估计的临界次序统计	(228)
8.4	彩色图像多信道边缘增强滤波器	(230)

第九章 非线性滤波器算法及硬件结构	(234)
9.1 游动统计算法	(234)
9.2 排序和最大/最小值选择游动算法	(238)
9.3 快速中值滤波器的硬件结构	(240)
9.4 形态图像处理器	(242)
参考文献	(246)

第一章 非线性滤波器

在数字信号处理和数字图像处理的早期研究中,线性滤波器是主要处理手段。线性滤波器简单的数学表达形式以及某些理想特性使其很容易设计和实现。然而,当信号中含有非叠加性噪声时,例如由系统非线性引起的噪声或存在非高斯噪声等,线性滤波器的处理结果就很难令人满意。在处理图像时,线性滤波器将破坏边缘,而且不能有效滤除脉冲噪声。就是说,线性滤波器在信号与噪声彼此相关情况下不能很好工作。大家知道,虽然人类视觉的确切特性目前还未完全揭示出来,但许多实验表明,人类视觉系统的第一处理级是非线性的。基于上述原因,早在1958年维纳(Wiener)就提出了非线性滤波理论^[1]。

1.1 原理与定义

任何一个一维滤波器输出 y 都可以表示为

$$y = L(x) \quad (1-1)$$

如果 $L(\cdot)$ 是线性算子,对应的滤波器是线性滤波器;如果 $L(\cdot)$ 是非线性算子,对应的滤波器是非线性滤波器。二维或 m 维滤波器情况与此相似,只是输入信号不是 x 而是 $x(m, n)$ 或 $x(i_1, i_2, \dots, i_m)$, 同样,对应的输出信号是 $y(m, n)$ 或 $y(i_1, i_2, \dots, i_m)$ 。

作为非线性滤波器,它不具有叠加特性和比例特性,因此输出信号不是其脉冲响应函数与输入信号的卷积。非线性算子 $L(\cdot)$ 可用各种函数实现,不同的函数对应的非线性滤波器具有不同特性。例如, $L(\cdot)$ 选择为稳健统计函数方式相应的非线性滤波器是中值滤波器,平均滤波器,以及其他类型次序统计滤波器;如果 $L(\cdot)$ 选择为形态运算函数,非线性滤波器就变成了形态滤波器,依此类

推。

广义非线性滤波器结构如图 1.1 所示,该结构采用了两个非线性单调函数 $g(\cdot)$ 和 $f(\cdot)$,两个线性滤波器 L_1 和 L_2 ,一个分类网络。如果函数 $g(x)$ 和 $f(x)$ 和线性滤波器选择合适,如下非线性滤波器就是广义非线性滤波器结构的特殊情况:

- (1) 次序统计滤波器;
- (2) 非线性均值滤波器;
- (3) 形态滤波器。

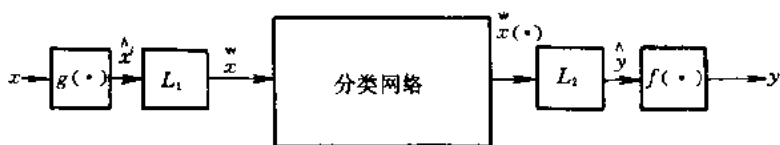


图 1.1 广义非线性滤波器结构

显然,式(1-1)中的 $L(\cdot)$ 函数对应图 1-1 中 $g(\cdot)$, $L_1(\cdot)$, 分类网络, $L_2(\cdot)$ 和 $f(\cdot)$ 对应总体性能。

1.2 性能评价

任何滤波器都有一定的优点和缺点,因此对于特定应用场合很难说出哪种滤波器最适合。在不同应用中,存在着不同类型的噪声影响,各类噪声可以归纳如下:

- (1) 短尾叠加白噪声;
- (2) 叠加白高斯噪声;
- (3) 长尾叠加白噪声;
- (4) 正向脉冲噪声;
- (5) 负向脉冲噪声;
- (6) 椒盐噪声;
- (7) 积性噪声;
- (8) 与信号相关的噪声;

(9) 混合噪声((1), (6) 和(8) 类噪声共存)。

滤波器设计就是考虑如何滤除某种类型噪声。实际上,滤波器性能完全取决于应用场合。常用的一些滤波器性能测量项目如下:

- (1) 对不同类型噪声的滤波特性;
- (2) 边缘保护;
- (3) 细节信息保护;
- (4) 无偏性;
- (5) 计算复杂性。

噪声滤波特性通常通过输出方差或连续滤除脉冲噪声的比率来测得。另外,一些性能测量是归一化均方误差(NMSE)和感知均方误差(PMSE)。这些测量的主要缺点是它们与人的主观判定准则相对来说差得较远。主要原因是,人的视觉相对复杂得多,它的特性无法用一个性能表达函数来描述。

边缘保护是滤波器一个重要性质。其量度是保护边缘的能力。细节信息保护的特性主要是保护图像上各类线段、尖角和其他图像细节的能力。滤波器通常只能增强某一方向上的图像(例如,可分离滤波器增强水平和垂直方向的图像)或者增强某种照度特性的图像区域(例如,腐蚀滤波器和膨胀滤波器)。所有性能测量都是定性测量,它们不能用某种定量标准描述,因此,上述测量都带有相对主观性。在对几种滤波器进行性能比较时,通常都针对某一给定噪声图像进行滤波,然后用某种测量结果进行比较。显然,这具有一定的片面性,但是目前也只能这样相对比较。

滤波器的计算复杂性实际上用每个输出像素所需的代数运算次数来测量,这些运算包括乘法、比较以及加法等。在并行运算情况下,滤波器计算复杂性用所需硬件(加法器、乘法器和比较器等)的数目和每一输出像素所需输入输出信号通量的总延时来测量。通量总延时与最小可能并行计算时间(也称临界时间)有关。在常规计算机上的串行运算情况下,滤波器的计算复杂性利用运算速度测量。当然,运算速度与采用的算法、程序语言以及计算机本身特性有关。可见,滤波器计算复杂性由许多因素决定。

1.3 分类与发展

图像处理应用的大多数非线性滤波器是次序统计滤波器,其中最简单的非线性滤波器是1977年图基提出的中值滤波器^[36]。次序统计滤波器的理论基础是数学的稳健统计学^[11],该类滤波器有:中值滤波器,级叠滤波器,中值混合滤波器, α -修正均值滤波器和 L -滤波器等。

利用集合运算进行图像几何结构分析的非线性滤波器称作形态滤波器,它们是70年代由麦哲劳恩(Matheron)和瑟拉(Serra)等人提出来的^[37~39]。这些滤波器主要应用在生物医学图像处理、形状识别、边缘检测、消除噪声以及图像增强等方面。近几年来,形态滤波器在图像处理中已成为热门研究课题。

多项式滤波器是以沃特拉级数为数学理论基础的一种非线性滤波器。由于沃特拉级数在高阶时代数计算极其复杂,因此在实际应用中多项式滤波器受到了一定的限制。近年来,二次多项式滤波器(利用二阶沃特拉级数)的研究成功,为图像处理带来新的方法^[40~42]。

非线性滤波器在实际应用中,由于图像信号与噪声的统计特性极其不规则,因此许多参数的最佳化问题很难解决。于是,自适应非线性滤波器的研究与应用成果不断涌现^[43,44]。

在数字图像滤波应用中,遇到的主要问题之一是图像本身的数据量巨大而且每一像素对应的运算量也非常大。许多线性和非线性图像处理器都是利用每一个像素的毗邻进行计算,这些运算包括对每一个像素的多种加法、乘法、比较和某些非线性函数运算。这样,计算的复杂性相对就非常高,在某些图像处理应用中(例如,电视图像处理以及一些自动检测应用等),需要实时处理图像。这时,常用的单指令单数据流(SISD)计算机在速度上满足不了实际要求,应采用单指令多数据流(SIMD)结构计算机或专用芯片(SCL)。因此,各类非线性滤波器在硬件实现时都采用单指令多数

据流的专用芯片^[45-47]。

非线性滤波器处理彩色图像是当前研究的又一热门课题。数字电视和高分辨率电视(HDTV)需要先进的数字彩色图像处理技术,因此一些研究人员目前正在将黑白(BW)图像处理技术向彩色图像处理技术中扩展。虽然,这些研究结果还没有完全成熟,但是我们认为这种做法是非常重要的。另外,利用人工神经网络(ANN)理论构成非线性滤波器,已经应用在图像分析的图形识别领域^[48,49]。

第二章 次序统计滤波器

非线性滤波器的主要算法基础是稳健统计学,也就是次序统计理论。

2.1 稳健统计基础

2.1.1 次序统计

设 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 为总体 X 的一个容量为 n 的样本,将其任一实现 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 按大小顺序排成:

$$x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \dots \leq x_{(n)} \quad (2-1)$$

设 $X_{(k)}(x_1, x_2, \dots, x_n) = x_{(k)}, k = 1, 2, \dots, n$, 则有:

$$X_{(1)} \leq X_{(2)} \leq \dots \leq X_{(n)} \quad (2-2)$$

$X_{(1)}, X_{(2)}, \dots, X_{(n)}$ 称为次序统计量。

1. 某 k 个次序统计量的联合分布

设总体 X 的密度函数为 $f(x)$, 分布函数为 $F(x)$, 则次序统计量 $X_{(1)}, X_{(2)}, \dots, X_{(n)}$ 中某 k 个次序统计量 $X_{(i_1)} \leq X_{(i_2)} \leq \dots \leq X_{(i_k)}, 1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_k \leq n, 1 < k \leq n$ 的联合密度函数为:

$$\begin{aligned} f(x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_k}) = & \frac{n! P_1^{i_1-1} P_2^{i_2-i_1-1} \dots P_k^{i_k-i_{k-1}-1} P_{k+1}^{n-i_k} \cdot f(x_{i_1}) f(x_{i_2}) \dots f(x_{i_k})}{(i_1-1)! (i_2-i_1-1)! \dots (i_k-i_{k-1}-1)! (n-i_k)!} \\ & x_{i_1} \leq x_{i_2} \leq \dots \leq x_{i_k} \end{aligned} \quad (2-3)$$

式中 $P_l = \int_{x_{i_{l-1}}}^{x_{i_l}} f(x) dx = F(x_{i_l}) - F(x_{i_{l-1}})$

$l = 1, 2, \dots, k+1$, 且 $x_{i_0} = -\infty, x_{i_{k+1}} = \infty$

2. n 个次序统计量 $X_{(1)}, X_{(2)}, \dots, X_{(n)}$ 的联合分布

在式(2-3)中,令 $k = n$, 则得 $X_{(1)}, X_{(2)}, \dots, X_{(n)}$ 的联合密度函