

Richard G. Lyons

# 精简数字信号处理

## ——方法与技巧指导

[美] 理查德·G·莱昂斯 编

张国梅 译

S  
treamlining Digital  
Signal Processing  
A Tricks of the Trade Guidebook  
g

  
WILEY



西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

Streamlining Digital Signal Processing  
A Tricks of the Trade Guidebook

# 精简数字信号处理

## ——方法与技巧指导

[美] 理查德·G·莱昂斯 编

Richard G. Lyons  
*Besser Associates*  
*Mountain View, California*

张国梅 译



西安交通大学出版社  
Xi'an Jiaotong University Press

Richard G. Lyons

Streamlining Digital Signal Processing: A Tricks of the Trade Guidebook  
ISBN:978-0470-13157-2

Copyright © 2007 by Insitute of Electrical and Electronics Engineers.  
Published by John Wiley & Sons. Inc., Hoboken, New Jersey.

No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, scanning, or otherwise, except as permitted under Section 107 or 108 of the 1976 United States Copyright Act, without either the prior written permission of the Publisher, or authorization through payment of the appropriate per-copy fee to the Copyright Clearance Center, Inc., 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, (978) 750-8400, fax (978) 750-4470, or on the web at [www.copyright.com](http://www.copyright.com). Requests to the Publisher for permission should be addressed to the Permissions Department, John Wiley & Sons, Inc., 111 Rivers Street, Hoboken, NJ 07030, (201) 748-6011, fax (201) 748-6008, or online at <http://www.wiley.com/go/permission>.

All Rights Reserved. This translation published under license.

陕西省版权局著作权合同登记号:25-2009-033

---

图书在版编目(CIP)数据

精简数字信号处理——方法与技巧指导/(美)莱昂斯(Lyons, R. G.)编;  
张国梅译. —西安:西安交通大学出版社,2012.3

书名原文:Streamlining Digital Signal Processing: A Tricks of the  
Trade Guidebook

ISBN 978-7-5605-3960-7

I. ①精… II. ①莱… ②张… III. ①数字信号处理 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第130278号

---

书 名 精简数字信号处理——方法与技巧指导  
编 者 (美)理查德·G·莱昂斯  
译 者 张国梅

---

出版发行 西安交通大学出版社  
(西安市兴庆南路10号 邮政编码710049)

网 址 <http://ligong.xjtupress.com>  
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)  
(029)82668315 82669096(总编办)

传 真 (029)82669097  
印 刷 西安交通大学印刷厂

---

开 本 687mm×1012mm 1/16 印张 20 字数 364千字  
版次印次 2012年3月第1版 2012年3月第1次印刷  
印 数 0001~3000  
书 号 ISBN 978-7-5605-3960-7/TN·130  
定 价 45.00元

---

读者购书、书店添货,如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82665380

读者信箱:banquan1809@126.com

版权所有 侵权必究

本书献给所有正在努力提高自身业务水平且愿意与业界同行分享相关知识的信号处理工程师们,他们正如英国诗人乔叟所说的:“勤于学习的人才能乐于施教”。

## 译者序

数字信号处理(DSP)是将信号以数字方式表示并处理的理论和技术。自20世纪60年代以来,伴随计算机和信息技术的飞速发展,数字信号处理的理论和方法历经了建立、兴起、快速发展和广泛应用的成长历程,目前已成为信息科学的重要组成部分。随着数字信号处理技术的迅速发展,各种有关数字信号处理理论、实现和应用的教材及专著不断问世,本书正是其中的一支。

然而,本书与大量传统的数字信号处理教材不同,它不是对数字信号处理基本理论的介绍,也不是要展现在数学上深奥难懂的特殊DSP内容。本书撰写的主旨是要给出在传统教材和专著中没有涉及到的一些巧妙的、实用的DSP技巧和方法,它们可以简化一般的信号处理过程,或者提高信号处理的计算速度,能够为DSP工程师们的实际工作提供极大的帮助。本书内容来源于《IEEE信号处理杂志》的“DSP方法与技巧”专栏,本书的编者理查德·G·莱昂斯正是该专栏的创建人。书中精心收集了专栏中关于以下五个信号处理专题的优秀论文,包括数字滤波、信号与频谱分析、高速函数逼近、信号生成和其他高性能DSP技术。其中每篇论文都经过了仔细的编辑审阅,并充分吸收了来自读者的反馈意见,此外还补充了许多论文发表时由于篇幅限制而没有包含进去的附加注释、应用以及验证实例。

本书内容所涉及的数学知识简单,叙述简洁、平实,对于学术界和工业界的读者来说都比较容易理解。各章独立撰写,读者可以任意地选读相关内容。而各篇论文后面所列出的参考文献,更是为读者的进一步阅读和研究提供了帮助。受限于本书所选的内容及其撰写形式,本书更适合那些想要在某些DSP专题上获得更前沿和更专门知识的

读者,如博士研究生。总之,本书是一本便捷的、对于任何从事 DSP 研究的读者来说都颇具价值的参考书。

全书的翻译工作由张国梅完成,其指导的本科学生李德鑫、李保、周澎和吕沛同学参与了第五个专题的部分翻译工作。此外,在本书的翻译过程中还得到了西安交通大学刘树棠教授的关心和帮助,在此表示衷心地感谢。感谢西安交通大学出版社鲍媛同志在出版和编辑过程中所给予的支持、关心和帮助。最后,对我的家人马小辉同志所给予的关心和支持,表示深深地谢意。

原书中有少量输入和排版的疏漏,在翻译过程中做了改动。由于译者的水平有限和不可避免的主观片面性,翻译不当或表述不清之处在所难免,恳请广大读者及专家批评指正。

张国梅  
于西安交通大学

# 前 言

本书介绍了近期在数字信号处理(DSP)领域取得的先进成果,它们或者可以对一般的信号处理过程进行简化,或者可以提高其运算速度。本书的主旨是要对传统 DSP 课本中没有涉及到的巧妙的 DSP 技巧和方法进行阐述,所选内容是具有实际意义的实用 DSP 技巧和方法,而不是行业研究人员与大学教授所关注的那些传统的、高度特殊的、数学要求很深的研究内容。本书不再局限于标准 DSP 基础课本的形式,而是给出了全新的且经过反复检验被证明是非常可靠的一些巧妙的实现方法,包括数字滤波器设计、频谱分析、信号生成、高速函数逼近及各种其他 DSP 功能。

我们写作本书的目的是提供一些可以满足 DSP 工程师工作所需要的资料,使它们能够在介绍性的 DSP 课本与晦涩难懂的学术期刊之间建立一座理论到实际的桥梁。我们希望本书的内容可以让正在实践的 DSP 工程师们发出这样的感叹:“哇!真是太棒了!我一定要记住它,也许哪一天就可以用上了。”同时,本书对资深的 DSP 工程师们也会有所帮助,而对于 DSP 初学者来说也是颇有价值,因为本书采取了一种温和的指导性风格。

本书中用到的数学知识都是一些关于复数的简单代数和算术运算,使得本书对于绝大部分工程界和学术界的读者来说都是很容易理解的。此外,每章都给出了参考文献列表,为那些希望在某个 DSP 专题上做进一步深入研究的读者们提供了帮助。本书的各章专题是独立撰写的,因此读者可以按照任意想要的顺序来阅读相关内容。

本书的贡献者们都是经验极其丰富的 DSP 工程师,他们组建了一个该领域的梦之队。他们不仅深谙信号处理理论,同时他们也是将这些理论用于实用 DSP 系统实现的工程师。(他们确实能洞悉 DSP

的重点和精髓。)这不同于其他很多作者,那些作者写出来的东西看上去好像在表达:“这个主题我懂了,看你到底懂不懂”,而本书的作者们是在竭尽全力地将他们对 DSP 的理解尽可能多地呈现出来。就这点而论,本书的各个章节其实就是来自我们这些资深专家的明信片,表达了他们对于信号处理圣杯——“以最小的计算代价获得精确的处理结果”所进行的无尽探索。

我们欢迎读者们来了解这本指导书中给出的 DSP 技巧。我和出版商 IEEE Press 真诚地希望你们能够从中获益。

理查德·G·莱昂斯

E-mail:R. Lyons@ieee.org

“如果你真的想要学会飞翔,那么你必须驾驭机器,通过实际训练来掌握其中的诀窍”。

—— 韦尔伯·莱特(1867—1912, 第一架成功飞机的共同发明人)



# 本书贡献者

**马克·阿利 (Mark Allie)**

威斯康星大学麦迪逊分校  
麦迪逊市, 威斯康星州

**埃米·贝尔 (Amy Bell)**

弗吉尼亚理工大学  
布莱克斯堡, 弗吉尼亚

**格雷格·贝尔基 (Greg Berchin)**

信号处理业界专家顾问  
格契斯特市, 佛蒙特州

**马克·伯格丁 (Mark Borgerding)**

3dB 实验室, Inc  
辛辛那提市, 俄亥俄州

**琼·卡莱塔 (Joan Carletta)**

阿克伦大学  
阿克伦城, 俄亥俄州

**莱昂内尔·科尔代斯 (Lionel Cordesses)**

雷诺技术中心  
Guyancourt, 法国

**马修·多纳蒂奥 (Matthew Donadio)**

Night Kitchen Interactive  
费城, 宾西法尼亚州

**什洛莫·恩格尔伯格 (Shlomo Engelberg)**

耶路撒冷理工学院  
耶路撒冷, 以色列

**Huei-Wen Ferng**

台湾科技大学  
台北, 台湾

**弗雷德里克·哈里斯 (Fredric Harris)**

圣地亚哥州立大学  
圣地亚哥, 加利福尼亚州

**拉斯洛·哈尔斯 (Laszlo Hars)**

希捷研究院  
匹兹堡, 宾夕法尼亚州

**罗伯特·英克尔 (Robert Inkol)**

国防研发  
渥太华, 加拿大

**埃里克·雅各布森 (Eric Jacobsen)**

Abineau 通信  
弗拉格斯塔夫, 亚利桑那州

**阿兰·乔亚尔 (Alain Joyal)**

国防研发  
渥太华, 加拿大

**彼得·库克苏克斯 (Peter Kootsookos)**

UTC 消防与安全  
法明顿, 康涅狄格州

**基肖尔·科特瑞 (Kishore Kotteri)**

微软公司  
雷德蒙, 华盛顿

**里卡多·洛萨达 (Ricardo Losada)**

MathWorks 公司  
内蒂克, 马萨诸塞州

**理查德·莱昂斯 (Richard Lyons)**

Besser Associates  
山景城, 加利福尼亚州

**詹姆斯·麦克纳米 (James McNames)**

波特兰州立大学  
波特兰, 俄勒冈州

**文森特·佩利谢尔 (Vincent Pellissier)**

MathWorks 公司  
内蒂克, 马萨诸塞州

**查尔斯·雷德 (Charles Rader)**

退休, 原工作于 MIT 林肯实验室  
列克星敦, 马萨诸塞州

**斯里拉曼·拉贾 (Sreeraman Rajan)**

国防研发  
渥太华, 加拿大

**何塞普·萨拉 (Josep Sala)**

加泰罗尼亚科技大学  
巴塞罗那, 西班牙

**David Shiung**

联发科技公司  
新竹, 台湾

**雷纳·施托雷 (Rainer Storn)**

罗德斯瓦兹股份有限公司  
慕尼黑, 德国

**克莱·特纳 (Clay Turner)**

无线系统工程公司  
卫星海滩, 佛罗里达州

**克里希纳拉·瓦尔马 (Krishnaraj Varma)**

休斯网络系统公司  
德国城, 马里兰州

**Sichun Wang**

国防研发  
渥太华, 加拿大

**于里·于勒斯塔洛 (Jyri Ylöstalo)**

诺基亚西门子网络  
赫尔辛基, 芬兰

**弗拉迪米尔·瓦西里斯基 (Vladimir Vassilevsky)**

Abvolt 公司  
佩里, 俄克拉何马州

# 目 录

译者序

前言

本书贡献者

## 第一部分 高效的数字滤波器

第 1 章	知识回顾:锐化 FIR 滤波器 .....	(3)
第 2 章	基于补偿零点的量化 FIR 滤波器设计 .....	(10)
第 3 章	利用差分进化算法设计非标准滤波器 .....	(23)
第 4 章	给定 3dB 衰落点下的 IIR 滤波器设计 .....	(30)
第 5 章	FSK 解调中的滤波技巧 .....	(39)
第 6 章	降低 CIC 滤波器复杂度 .....	(47)
第 7 章	精确滤波器设计 .....	(55)
第 8 章	Turbo 型内插 FIR 滤波器 .....	(68)
第 9 章	一种最有效的数字滤波器:双路递归全通滤波器 .....	(80)

## 第二部分 信号及频谱分析技巧

第 10 章	快速精确的频率估计器 .....	(101)
第 11 章	计算信号相似性度量的快速算法 .....	(110)
第 12 章	高效多音检测 .....	(118)
第 13 章	将重叠保留处理转化为多频带且具有混频及减采样功能的 滤波器组 .....	(126)
第 14 章	滑动频谱分析 .....	(135)

## 第三部分 快速函数逼近算法

第 15 章	反正切家族的又一竞争者 .....	(151)
第 16 章	高速平方根算法 .....	(154)
第 17 章	基于多项式的函数逼近 .....	(162)

第 18 章	反正切函数的有效逼近 .....	(174)
第 19 章	一种独特的差分器 .....	(185)

## 第四部分 信号生成技术

第 20 章	递归离散时间正弦振荡器 .....	(191)
第 21 章	直接数字合成:一种周期波形生成工具 .....	(208)
第 22 章	定点算法实现 $\Sigma\Delta$ 数模转换器 .....	(222)
第 23 章	基于分布式算法高效生成 8-PSK 和 16-PSK 信号 .....	(229)

## 第五部分 各种高性能 DSP 技术

第 24 章	基于 DSP 的频率响应补偿 .....	(247)
第 25 章	按极坐标顺序生成直角坐标 .....	(257)
第 26 章	数字网络中的瑞士军刀(优异者) .....	(263)
第 27 章	JPEG2000——编码器的选择与折衷 .....	(280)
第 28 章	移位寄存器序列的使用 .....	(289)
词汇表	.....	(297)

## 第一部分

---

# 高效的数字滤波器



# 第 1 章 知识回顾:锐化 FIR 滤波器

Matthew Donadio

*Night Kitchen Interactive*

当你遇到如下情况时你会怎么做? 假设你正在现场对一个 DSP 系统中出现的问题进行诊断。在你忠诚的笔记本电脑中存有你的开发系统,而且你还拥有一台仿真器。你算出系统指标出了问题,软件中的一个对称 FIR 滤波器不能正常工作,或者需要降低通带波纹,或者需要增强阻带衰减。但此时你意识到,笔记本电脑中没有安装任何滤波器设计软件,而用户已经非常生气了。你该怎么办呢? 答案很简单:把已有滤波器拿来对它进行锐化。简单来说,滤波器锐化是一种在原有滤波器基础上生成新滤波器的技术<sup>[1~3]</sup>。虽然该技术已经有近 30 年的历史,但却并没有被 DSP 工程师们广泛了解,在绝大部分 DSP 课本中也很少提及。

## 1.1 改进一个数字滤波器

在讨论滤波器锐化之前,让我们先考虑一种最容易想到的解决办法,即用已有滤波器对数据进行两次滤波处理。如果原滤波器传递函数为  $H(z)$ ,则新滤波器的传递函数(滤波器  $H(z)$  与自己级联)为  $H(z)^2$ 。举个例子,假设原滤波器是一个抽头数为  $N$  的低通 FIR 滤波器,采用 Parks-McClellan 算法<sup>[4]</sup>进行设计,且具有如下特征:

系数个数:  $N=17$

采样率:  $F_s = 1$

通带带宽:  $f_{\text{pass}} = 0.2$

通带偏差:  $\delta_{\text{pass}} = 0.05$  (峰值波纹为 0.42 dB)

阻带频率:  $f_{\text{stop}} = 0.3$

阻带偏差:  $\delta_{\text{stop}} = 0.005$  (衰减 -46 dB)

图 1-1(a)给出了  $H(z)$  和级联滤波器  $H(z)^2$  的性能。看似一切都很正常,新的滤波器与原滤波器有着相同的通带边缘,且阻带衰减更大。但是通带怎么样呢? 让我们放大来看看,见图 1-1(b)。我们发现平方之后的滤波器  $H(z)^2$  在通带内的振荡比原滤波器更剧烈。一般来说,平方处理会产生如下

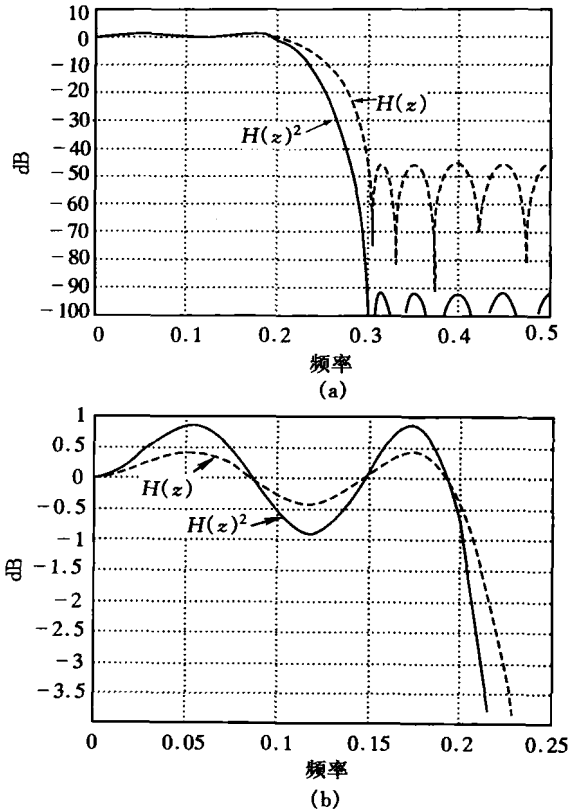


图 1-1  $H(z)$  和  $H(z)^2$  的性能:(a)全频率响应;(b)通带响应

结果:

1. 通带内误差(响应波纹)近似变为原来的 2 倍。
2. 阻带内误差变为原来的平方(即以 dB 为单位的阻带内衰减变为原来的 2 倍)。
3. 保持通带和阻带边缘不变。
4. 滤波器脉冲响应长度近似为原滤波器的 2 倍。
5. 滤波器线性相位特性不变。

如果我们以一种稍微不同于常规的方式来看待  $H(z)$  和  $H(z)^2$  的关系,就可以很容易地对这种平方操作进行清楚的审视,以观察上述行为特征。我们可以把滤波器平方看成是作用于传递函数  $H(z)$  上的某个功能函数  $F[H(z)]$ 。然后便可以对该函数  $H(z)^2$  的幅度随  $H(z)$  幅度变化的曲线进行作图,从而来观察函数的幅度变化功能。

对  $F[H(z)] = H(z)$  作图非常简单,输出等于输入,因此作图结果为图



1-2中的直线。函数  $F[H(z)] = H(z)^2$  对应于二次曲线。当  $H(z)$  输入幅度接近零时,  $H(z)^2$  输出幅度将更接近于零,也就是说  $H(z)^2$  的阻带衰减更大。当  $H(z)$  输入幅度接近 1 时,  $H(z)^2$  输出幅度将以大约 2 倍的速度远离 1,也就是说通带波纹增强。

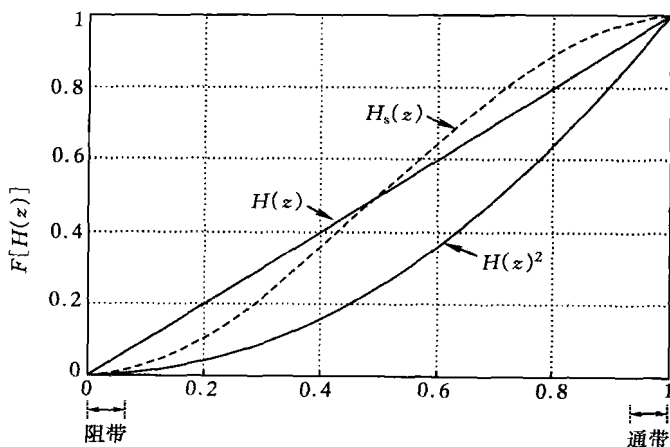


图 1-2 作用于  $H(z)$  的各种  $F[H(z)]$  函数

平方操作改进了阻带特性,却损失了通带性能,这种改进是源于幅度变化函数在 0 处是水平的。因此为在通带和阻带都获得性能改善,我们希望  $F[H(z)]$  幅度函数在  $H(z) = 0$  和  $H(z) = 1$  处都是水平的(换句话说,两个点上的一阶导数都为零)。这会导致,在我们远离 0 和 1 的过程中,输出幅度变化比输入幅度变化缓慢,进而减弱这些区域的波纹。满足这种要求的最简单的函数具有如下三次方形式:

$$F(x) = c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + c_3 x^3 \quad (1-1)$$

将上式对  $x$  求导,得到

$$F'(x) = c_1 + 2c_2 x + 3c_3 x^2 \quad (1-2) \textcircled{1}$$

利用  $F(x)$  和  $F'(x)$  在  $x=0$  和  $x=1$  处的特定取值,可以求解式(1-1)和式(1-2)中的各个系数  $c_n$ ,求解过程如下:

$$F(x) \Big|_{x=0} = 0 \Rightarrow c_0 = 0 \quad (1-3)$$

$$F'(x) \Big|_{x=0} = 0 \Rightarrow c_1 = 0 \quad (1-4) \textcircled{2}$$

$$F(x) \Big|_{x=1} = 1 \Rightarrow c_2 + c_3 = 1 \quad (1-5)$$

① 原书中式(1-2)中  $F(x)$  应改为  $F'(x)$ ,表示求导后函数,以便与式(1-1)中原函数进行区分。

——译者注

② 原书中式(1-4)中  $F(x)$  应改为  $F'(x)$ ,表示求导后函数,以便与式(1-3)中原函数进行区分。

——译者注