



国际信息工程先进技术译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group

实时数字信号处理 —— 基于TMS320C6x DSK 平台的Matlab到C

REAL-TIME DIGITAL SIGNAL PROCESSING
from MATLAB to C with the TMS320C6x DSK

Thad B. Welch

(美) Cameron H.G. Wright 著

Michael G. Morrow

曹建国 等译

附赠光盘



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际信息工程先进技术译丛

实时数字信号处理—— 基于 TMS320C6x DSK 平台的 Matlab 到 C

(美) Thad B. Welch Cameron H. G. Wright 著

Michael G. Morrow

曹建国 等译



机械工业出版社

本书是一本有关实时数字信号处理的译作,主要介绍了基于数字信号理论的 Matlab 算法程序如何转换到实时数字信号处理平台上使用的 C 语言程序。本书首先介绍了数字信号处理常用的采样与重构、FIR 数字滤波器、IIR 数字滤波器、周期信号产生、帧结构、基于帧的数字滤波、FFT、谱分析和窗函数的理论、算法的 Matlab 仿真及硬件平台实时处理实现,接着介绍了 8 个实际的工程项目应用。本书内容翔实,讲解深入浅出,通过大量实例的介绍可以帮助读者顺利地实现从 Matlab 仿真算法到硬件平台上的实时处理的转换。

本书适合信号处理方面的工程、技术人员使用,也可以作为通信等专业相关研究生课程的指导用书。

Real-Time Digital Signal Processing From MATLAB® To C with The TMS320C6x DSK

Copyright © 2006 by Taylor & Francis Group, LLC.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved; 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下, CRC 出版公司出版,并经其授权翻译出版,版权所有,侵权必究。

本书中文简体翻译版权机械工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis Sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

本书版权登记号:图字 01-2007-5494。

图书在版编目(CIP)数据

实时数字信号处理:基于 TMS320C6x DSK 平台的 Matlab 到 C/(美)韦尔奇(Welch, T. B.), (美)赖特(Wright, C. H. G.), (美)莫鲁(Morrow, M. G.)著;曹建国等译. —北京:机械工业出版社,2011.6

(国际信息工程先进技术译丛)

Real-Time Digital Signal Processing From MATLAB® To C with The TMS 320C6x DSK

ISBN 978-7-111-33881-9

I. ①实… II. ①韦…②赖…③莫…④曹… 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 051174 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:王欢 责任编辑:王欢 版式设计:霍永明

责任校对:张晓蓉 封面设计:马精明 责任印制:杨曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2011 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 23 印张 · 460 千字

0 001 — 2 500 册

标准书号:ISBN 978-7-111-33881-9

ISBN 978-7-89433-005-5 (光盘)

定价:98.00 元(含 1DVD)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

销售二部:(010) 88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

译 者 序

随着数字信号理论的发展,新的数字信号处理理论及算法不断涌现,同时现代电子技术也在飞速向前发展,使得实时数字信号处理成为可能。在工业、军事、经济和生活等领域需求的推动下,实时数字信号处理已经成为一门发展迅速的交叉学科,并且已成为现代电子技术的核心之一。然而,实现数字信号处理理论算法到实际硬件平台的实时处理并不是一件容易的事,相关的参考资料也较为少见。

翻译这本书的目的是使具有基本 DSP 理论知识的读者快速地从熟悉的 Matlab 环境转移到实现 DSP 操作的实际的硬件目标电路板上。本书会告诉读者如何简单地从一个 Matlab 演示范例,发展到在真正的 DSP 硬件上运行的 C 语言实时代码的演示实例。本书给读者提供了大量实际数字信号处理算法移植到实时系统的实例,它们易于应用到各种不同类型的工程实际中。书中介绍了常见的信号处理方法,通过对本书实例的学习,可以使读者更好地洞悉实时数字信号处理的方法和步骤。

本书共分为三部分:第一部分包括前 9 章,介绍了常见的 DSP 的基础算法理论及目标电路板系统实时数字信号处理转换,通过对这些章节内容的学习,为后续工程项目应用奠定基础;第二部分是工程实际部分,介绍了实际工程应用中的数字信号处理理论、算法例程及目标电路板上实际运行的实时处理代码;第三部分(即附录)介绍了书中前两部分使用的一些相关信息,包含学习实时 DSP 所需的软硬件平台等。

本书的翻译工作由三个人完成。其中,第 11 章和第 12 章由胡园翻译,第 5 章由胡玉玲翻译,其余部分由曹建国翻译,全书由曹建国统稿。由于实时数字信号处理技术涉及广泛、发展迅速,加之译者水平有限、时间仓促,书中难免会有对原著理解不妥甚至错误之处,欢迎广大读者批评指正,谢谢。

译 者

原 书 前 言

本书为需要简单易懂的工具书，并具有工程背景的实时数字信号处理的学生和工程师而写。过去，关于实时数字信号处理的理论和实践方面存在一条难以克服的“鸿沟”。本书使用作者证明了的方法，在这条“鸿沟”上架起了一座桥梁。

如果读者是第一次接触 DSP，那么我们希望读者在使用本书的同时能够结合更多传统的书籍。本书提供了一个实际的、渐进式的强化基本数字信号处理理论（作者这里指的是基本原理）的构架。这一构架使用了一系列范例、练习和工程，每一个都是从理论开始，接着是 Matlab 编程，最后是在高性能实时 DSP 硬件平台上运行。一定要看看本书的附录——很多人认为这部分就足够体现本书的价值。

比较理想的情况是，读者熟悉或者已经学习过基本的 DSP 课程（或者离散时域信号与系统）课程。然而，对那些暂时还没有 DSP 基础知识的学生，我们也成功地使用了本书的各部分内容。这本书的覆盖面非常广泛，足以满足大学生和研究论文的水平。当然，最好熟悉基本的 Matlab 和 C 编程语言，但不要求你是这两方面的专家。为了更好地利用本书，读者应该使用适当的物美价廉的开发工具。特别是以下列出的条目，包括标准的安装 Windows 系统的 PC，安装 Matlab 和它的信号处理工具箱，使用美国 TI 公司的 TMS3206713 DSK[⊖] 开发板（或者是 TMS32067113 DSK 开发板）和装载到 DSK 板上的软件开发工具（CCS2.1 或更高的版本）。另外还有一些外围设备，如信号源（工作正常的 CD 播放器），有放大功能的扬声器（连接到 PC 上能正常工作），以及 3.5mm 的立体声电缆（有时也称作 1/8in 立体声拾音插头电缆）将可以使用。为了处理输入及输出信号，DSK 支持一些不同的编解码器（见本书第 1 章）。对于一些常用的测试设备，如示波器、频谱分析仪及更灵活的信号发生器，如有必要的话，我们可以利用更便宜的 DSK 板或者 PC 的声卡来代替以上各项设备。

⊖ DSK, DSP Starter Kit——初学者开发套件。可以从美国 TI 公司授权的经销商处购买，也可以直接向该公司购买（见 dspvillage.ti.com）。

本书是为了满足许多大学的学生和全体教职员工的需求而写。当作者讨论中出现在本书参考文献中的一些概念时，我们为那些试图从理论到实践（使用实时硬件）的“鸿沟上架桥”的读者着想。本书从惟一的起点出发一步步地跨越那个“鸿沟”。我们希望你能享受这个过程。

T. B. W. , C. H. G. W. , M. G. M.

致 谢

如果没有美国 TI 公司的帮助和支持,本书是不可能完成的。特别要真诚地感谢 Catchy Wicks 先生,他不懈努力的 TI 公司大学编程计划帮助无数的学生和教授得到了价格合理的 DSP 软硬件。Catchy 的前任 Christina Peterson、Maria Ho 和 Torrence Robinson 也为本书的最后完成作出了贡献。TI 公司的 DSP 教育支持在行业中非常卓越,作者非常感谢这样一个具有前瞻性的计划。

我们也要感谢 Nora Konopka、Helena Redshaw 和 CRC 出版社 (Taylor&Francis 集团的一部分) 的 Katy Smith。他们对本书的热情对我们是巨大的鼓舞,并且他们有益的指导使本书得以完成。他们的热心帮助、快速的反应以及从来都没有失去的幽默感都是出版商所追求的。

我们也要感谢 Debbie Rawlings、Susan 和 Alan Czarnecki,由于他们慷慨地提供了湖边度假住宅,使得我们更有创造性地写出了这本书关键部分的内容。

如果省略一些关系到写作的技术性细节,我们将是何等粗心:本书排字使用了 LATEX,这是一个非常好的文档编排系统,由 Leslie Lamport 开发作为 Donald Knuth 的 TEX 程序之一。LATEX 是一个非常合适的技术文章写作工具,并且很好地支持世界范围的 TEX 用户群 (TUG)。查阅 <http://www.tug.org/> 可获得相关详细资料。LATEX 和 TEX (美国数学协会的注册商标) 对于出版界是可以免费获得的。我们使用优秀的 WinEdt 共享软件编辑器 (见 <http://www.winedt.com/>) 作为 LATEX 发布的免费 MikTeX 前端 (见 <http://www.miktex.org/>)。

作者简介

Thad B. Welch, 哲学博士, 专业工程师, 马里兰州安纳波利斯市美国海军军官学校 (US Naval Academy, USNA) 电子与计算机工程系终身教授、副教授, 曾执教于美国空军军官学校 (US Air Force Academy, USAFA) 电子工程系。他是海军中校, 曾获得 1997 年度美国空军杰出教师奖, 2001 年度 ECE 杰出教师奖, 2002 年度拉乌尔杰出工程教育奖, 2003 年度美国海军杰出研究奖。Welch 博士是美国电气电子工程师学会 (Institute of Electrical and Electronic Engineers, IEEE) 前主席, 并且是 IEEE 数字信号处理协会 (IEEE Signal Processing Society) 技术委员会的创办会员。他是资深的 IEEE 会员并且是美国工程教育协会 (American Society for Engineering Education, ASEE) 会员。

Cameron H. G. Wright, 哲学博士, 专业工程师, 怀俄明州大学电子与计算机工程系特聘教授, 曾在美国空军军官学校电子工程系执教近十年。在 USAFA 他任职教授, 并且担任系副主任。他是美国空军的退役空军中校, 因对学员教育的突出贡献曾分别获得 1992 年度及 1993 年度 R. E. Thomas 准将奖 (Brigadier General R. E. Thomas Award)。在 2005 年, 他获得了为该年度杰出教授设立的 IEEE 学生选择奖和怀俄明州大学的 Mortar Board “顶尖教授” 奖 (“Top Prof” Award)。Wright 博士是 IEEE 数字信号处理协会中的数字信号处理教育技术委员会 (Technical Committee on Signal Processing Education) 的创始会员, 是 IEEE 资深会员, 并且是美国工程教育协会会员, 美国职业工程师协会 (National Society of Professional Engineers) 会员, 并且是国际光学工程协会 (International Society of Optical Engineers) 会员。

Michael G. Morrow, 电子工程硕士, 专业工程师, 威斯康辛-麦迪逊大学电子与计算机工程系的在职人员。他是美国海军退役的海军上尉, 曾执教于美国海军军官学校电子工程系。Michael 先生获得了 2002 年度电子与计算机工程系杰出教育奖和威斯康辛-麦迪逊大学 2003 年度 Gerald Holdridge 卓越教学奖 (Gerald Holdridge Teaching Excellence Award), 并且被指定为微软最有价值专业人士 (Microsoft Most Valuable Professional)。他是 DSP 教育 (Educational DSP, eDSP) 有限公司 (Limited-Liability Company, LLC) 的创始人和董事长, 开发出了费用合理的 DSP 教育解决方案。他是 IEEE 信号处理教育技术协会会员, IEEE 资深会员, 美国工程教育协会会员。

目 录

译者序	
原书前言	
致谢	
作者简介	

基 础 篇

第 1 章 导言和内容结构	2
1.1 为什么需要本书	2
1.1.1 另外一些关于数字信号处理的书籍	2
1.1.2 演示范例和 DSP 硬件	3
1.1.3 本书的理念	3
1.2 实时 DSP	3
1.3 如何使用本书	4
1.3.1 转换到实时	7
1.3.2 各章的内容	7
1.3.3 硬件和软件的安装	8
1.3.4 阅读代码注意事项	8
1.4 开始学习	9
第 2 章 采样与重构	10
2.1 理论	10
2.1.1 选择采样频率	10
2.1.2 输入/输出问题: 采样或帧	10
2.1.3 Talk-Through 概念精讲	11
2.2 winDSK6 示例	11
2.2.1 winDSK6 的启动	11
2.2.2 Talk-Thru 应用	11
2.3 Talk-Through 使用窗口	14
2.4 Talk-Through 使用 Matlab 和 Windows	15
2.4.1 只使用 Matlab 的 Talk-Through	18
2.4.2 使用 Matlab 的流程详解	20

2.5 使用 C 语言的 DSK 实现	21
2.6 接下来的挑战	22
第 3 章 FIR 数字滤波器	24
3.1 理论	24
3.1.1 传统符号	24
3.1.2 FIR 滤波器和 IIR 滤波器比较	25
3.1.3 计算滤波器的输出	25
3.2 winDSK6 示例	27
3.2.1 图形均衡器应用	28
3.2.2 陷波滤波器应用	29
3.2.3 音效应用	31
3.3 Matlab 应用	32
3.3.1 内建方法	32
3.3.2 生成自己的滤波器算法	36
3.4 使用 C 语言的 DSK 实现	38
3.4.1 使用 C 语言的平滑 FIR 滤波: 第 1 部分	38
3.4.2 使用 C 语言的平滑 FIR 滤波: 第 2 部分	40
3.4.3 环形缓冲 FIR 滤波	42
3.5 接下来的挑战	44
第 4 章 IIR 数字滤波器	46
4.1 理论	46
4.2 winDSK6 示例: 陷波器的应用	49
4.3 Matlab 应用	51
4.3.1 数字滤波器的设计和分析	51
4.3.2 IIR 滤波器描述	57
4.3.3 框图	59
4.3.4 内建的方法	63
4.3.5 创建自己的滤波器算法	65
4.4 使用 C 语言的 DSK 实现	66
4.4.1 平滑 (倒 L 形) IIR 滤波器	66
4.5 接下来的挑战	68
第 5 章 周期信号产生	69
5.1 理论	69
5.1.1 在 DSP 中的周期信号	69

5.1.2 信号产生	70
5.2 winDSK6 范例	78
5.2.1 任意波形	78
5.2.2 双音多频	79
5.3 Matlab 应用	81
5.3.1 直接数字合成器方法	81
5.3.2 查表方法	82
5.4 使用 C 语言的 DSK 实现	83
5.4.1 直接数字合成方法	83
5.4.2 查表方法	84
5.4.3 带有表格创建程序的查表方法	86
5.4.4 数字式谐振器方法	87
5.5 接下来的挑战	89
第 6 章 基于 DSP 的帧结构	90
6.1 理论	90
6.1.1 基于采样数字信号处理的缺点	90
6.1.2 什么是帧结构	91
6.2 winDSK6 范例	93
6.3 Matlab 应用	94
6.4 C 语言在 DSK 上的应用	94
6.4.1 三重缓冲存储器	95
6.4.2 基于帧的 DSP 例程	96
6.4.3 直接存储器存取应用	101
6.5 基于帧处理的总结	110
6.6 接下来的挑战	111
第 7 章 使用帧的数字滤波器	112
7.1 理论	112
7.2 winDSK6 范例	112
7.3 Matlab 应用	112
7.4 使用 C 语言的 DSK 实现	112
7.4.1 理解 FIR 对帧的处理	113
7.4.2 怎样避免“边缘”问题	114
7.4.3 该 C 语言程序代码的解释	114
7.5 接下来的挑战	117

第 8 章 快速傅里叶变换	118
8.1 理论	118
8.1.1 快速傅里叶变换定义	118
8.1.2 旋转因子	118
8.1.3 FFT 处理	119
8.1.4 位码倒置	120
8.1.5 使用 FFT 滤波	122
8.1.6 避免循环卷积	123
8.1.7 实时快速卷积	125
8.2 winDSK6 范例	128
8.3 Matlab 应用	128
8.4 使用 C 语言的 DSK 实现	128
8.5 接下来的挑战	131
第 9 章 谱分析和加窗	133
9.1 基础理论	133
9.1.1 信号的功率谱	133
9.1.2 对加窗的需求	135
9.1.3 窗函数特征	137
9.2 winDSK6 范例	140
9.3 Matlab 应用	142
9.4 基于 C 语言的 DSK 应用	143
9.5 结论	144
9.6 接下来的挑战	144

工 程 篇

第 10 章 工程 1: 吉他的特殊效果	146
10.1 项目介绍	146
10.2 理论	146
10.2.1 背景	146
10.2.2 这些效果如何工作	147
10.3 winDSK6 范例	159
10.4 Matlab 实现	159
10.4.1 FIR 梳状滤波器	159
10.4.2 IIR 梳状滤波器	161

10.4.3 陷波滤波器	162
10.4.4 镶边	163
10.4.5 颤音	165
10.5 DSK 的 C 语言实现	165
10.5.1 实时梳状滤波器	166
10.5.2 其他实时特效	170
10.6 接下来的挑战	171
第 11 章 工程 2: 图形化均衡器	172
11.1 理论	172
11.2 winDSK6 范例	173
11.2.1 图形均衡器应用	174
11.2.2 图形均衡器的效果	174
11.3 Matlab 的实现方法	175
11.4 DSK 的 C 语言实现	178
11.4.1 设定滤波器带宽增益	178
11.4.2 GEL 文件的滑轮控制	180
11.5 接下来的挑战	181
第 12 章 工程 3: 峰值音量表	183
12.1 理论	183
12.2 winDSK6 描述: commDSK	183
12.3 Matlab 实现	185
12.4 DSK 的 C 语言实现	185
12.4.1 PPM 编码的例子	185
12.4.2 DSK LED 控制	187
12.4.3 另一个 PPM 的代码版本	187
12.5 接下来的挑战	189
第 13 章 工程 4: AM 发射机	190
13.1 理论	190
13.2 winDSK6 描述	192
13.3 Matlab 实现	193
13.4 使用 C 语言的 DSK 实现	195
13.5 接下来的挑战	197

第 14 章 工程 5: AM 接收机	198
14.1 理论	198
14.1.1 包络检波器	199
14.1.2 基于 Hilbert 的 AM 接收机	204
14.2 winDSK6 描述	209
14.3 Matlab 实现	209
14.4 DSK 的 C 语言实现	211
14.5 接下来的挑战	212
第 15 章 工程 6: 锁相环	214
15.1 理论	214
15.2 winDSK6 描述	215
15.3 Matlab 实现	215
15.3.1 PLL 仿真	215
15.3.2 Matlab 实现的一些更新	221
15.4 使用 C 语言的 DSK 实现	224
15.4.1 PLL 的组成部分	224
15.4.2 系统测试	226
15.5 接下来的挑战	227
第 16 章 工程 7: 数字通信发射机	230
16.1 理论	230
16.1.1 随机数和符号发生器	230
16.1.2 使用双极矩形脉冲比特位 BPSK	232
16.1.3 使用脉冲调制的升余弦形态的比特位 BPSK	232
16.2 winDSK6 说明	233
16.2.1 commDSK: 未滤波的 BPSK	234
16.2.2 commDSK: 升余弦滤波的 BPSK	236
16.3 Matlab 实现	238
16.3.1 矩形 BPSK 信号发生器	238
16.3.2 脉冲调制的升余弦 BPSK 信号发生器	240
16.4 C 语言实现 DSK	243
16.4.1 一个矩形脉冲型 BPSK 发射机	243
16.4.2 一个升余弦脉冲型 BPSK 发射机	245
16.4.3 实时代码总结	247
16.5 接下来的挑战	247

第 17 章 工程 8：数字通信接收机	248
17.1 理论	248
17.1.1 匹配滤波器的输出	250
17.1.2 眼图	251
17.1.3 最大似然同步恢复	252
17.2 winDSK6 说明	254
17.3 Matlab 实现	254
17.4 使用 C 语言的 DSK 实现	258
17.4.1 数字接收机元件	258
17.4.2 系统测试	263
17.5 接下来的挑战	265

附 录

附录 A 代码设计套件：简要指南	268
A.1 介绍	268
A.2 启动代码设计套件	268
A.3 必要的文件	272
A.4 创建一个新的工程	273
A.5 打开存在的工程	275
A.6 添加文件到一个工程中	276
A.7 工程选项	280
A.8 构建工程	281
A.9 加载程序到 DSK 板	282
A.10 在 DSK 板上运行程序	284
A.11 开始了解 CCS	286
A.12 CCS 工程的典型文件	286

附录 B DSP/BIOS	288
B.1 介绍	288
B.1.1 DSP/BIOS 主要特征	288
B.1.2 DSP/BIOS 线程	288
B.2 使用 DSP/BIOS 调度程序	289
B.2.1 添加一个周期函数 PRD	290
B.2.2 添加一个 HWI 函数	291
B.2.3 添加一个 SWI 函数	292

B. 2. 4 添加一个 TSK 函数	293
B. 2. 5 实时分析工具	293
B. 3 在 6711 DSK 板上的一个 DSP/BIOS Talk-Through 应用程序	294
B. 3. 1 主函数 main. c	295
B. 3. 2 hwi. c	295
B. 3. 3 DSP/BIOS 的硬件配置	296
B. 3. 4 DSP/BIOS 串口配置	296
B. 3. 5 源代码	296
B. 4 对立体声编解码器来说需要做的更改	297
B. 4. 1 主函数 main. c	298
B. 4. 2 hwi. c	298
B. 4. 3 DSP/BIOS HWI 配置	299
B. 4. 4 DSP/BIOS 串口配置	299
B. 5 一个 DSP/BIOS 的 Talk-Through 应用基于 6713 DSK 板	299
B. 5. 1 main. c	300
B. 5. 2 hwi. c	301
B. 5. 3 DSP/BIOS HWI 配置	301
B. 5. 4 DSP/BIOS 串口配置	302
B. 5. 5 源代码	303
附录 C 数值表示	305
C. 1 字节顺序	305
C. 2 整型表示	306
C. 3 整数除法和取整	307
C. 4 浮点表示法	308
C. 5 定点表示法	310
C. 6 数值表示方法总结	312
附录 D TMS320C6x 结构	313
D. 1 计算机结构基础	313
D. 1. 1 指令集架构	314
D. 1. 2 寄存器结构	314
D. 1. 3 内存结构	314
D. 1. 4 取指-执行模式	316
D. 1. 5 流水线操作	316
D. 1. 6 单线程与多线程	318
D. 1. 7 调度	318

D. 2	TMS320C671x 结构	319
D. 2. 1	存储器系统	321
D. 2. 2	流水线和程序调度	322
D. 2. 3	外设	322
D. 2. 4	主机接口	323
附录 E	DSK 的相关工具	324
E. 1	介绍	324
E. 2	Windows 控制应用程序	324
E. 2. 1	基本的 Windows 控制应用程序	325
E. 2. 2	产生一个示波器应用程序	326
E. 2. 3	创建一个频谱分析应用程序	331
E. 3	Matlab 输出	333
E. 3. 1	输出直接 II 型	333
E. 3. 2	输出 2 阶环节实现	334
E. 4	Matlab 实时接口	335
附录 F	编程风险和陷阱	336
F. 1	Debug 对 Release Builds	336
F. 2	易变性关键词	336
F. 3	函数原型和返回类型	337
F. 4	算术问题	338
F. 5	控制变量在存储器中的位置	339
F. 6	实时调度故障	340
附录 G	文字符号说明	342
参考文献		347