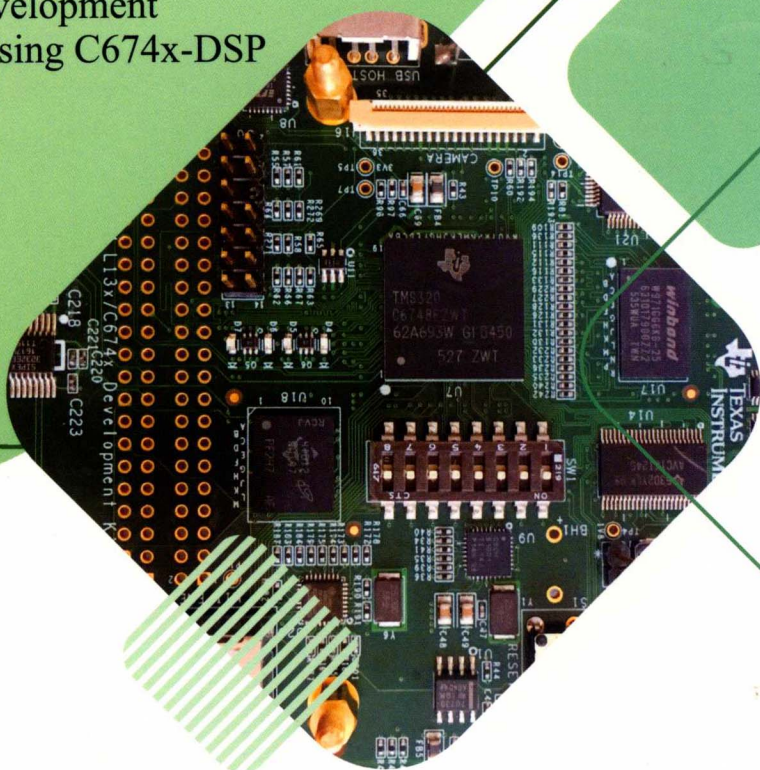


C674x-DSP

嵌入式开发与实践

路锦正 张红英 李 强 / 著

Embedded Development
and Practice Using C674x-DSP



科学出版社

C674x-DSP 嵌入式开发与实践

路锦正 张红英 李 强 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统讲解了 C674x-DSP 的硬件结构、软硬件开发工具、DSP 算法优化和应用系统开发等技术。主要包括 DSP 技术现状及趋势、主流 DSP 芯片架构、软硬件开发工具、CCS 集成开发环境、基于文件的 DSP 软件仿真开发、DSP 算法优化技术、基于 StarterWare 的系统软件开发、基于 SYS/BIOS 的系统软件开发、DSP 图像通信嵌入式开发与实践等内容。

本书秉承开发入门、开发储备、开发实践的编写思路,为读者构建逐层深入、由简入繁、由粗到细、由概念到应用、由模块到系统的学习模式,努力降低开发难度、缩短产品成型时间。

本书适合本科高年级学生、研究生、广大 DSP 爱好者,以及从事 DSP 技术开发的企业工程技术人员阅读,为以上群体提供学习与工作上的参考。

图书在版编目(CIP)数据

C674x-DSP 嵌入式开发与实践 / 路锦正, 张红英, 李强著. —北京: 科学出版社, 2019.1

ISBN 978-7-03-059716-8

I. ①C… II. ①路… ②张… ③李… III. ①数字信号处理-研究 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 262893 号

责任编辑: 张 展 侯若男 / 责任校对: 彭 映

责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化

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>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年1月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019年1月第一次印刷 印张: 19 3/4

字数: 464 千字

定价: 89.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

数字信号处理器(DSP)以其可编程、高性能、低功耗、易升级等特点在嵌入式电子信息产品方案中被普遍采纳。虽然 ARM 及 FPGA 在嵌入式开发中也有广泛的应用,但是其适用领域有各自的特点。ARM 更适合人机交互、任务管理等, FPGA 适合时序逻辑转换且并行度高,而 DSP 的独特架构更适于实时数字信号处理。美国 TI 公司作为目前 DSP 芯片的全球领导企业,其超长的产品线、丰富的开发文档资料以及性能超强的 C 编译器奠定了其在 DSP 产业的首要地位。C6000 系列 DSP 包含了八个功能单元,可最多八条指令并行执行,大大提高了 CPU 指令周期的利用率。C674x-DSP 是一款定浮点处理器内核,可应用于语音处理、图像处理以及低级机器视觉应用等任务。

毋庸置疑,电子信息产品的软件开发,是整个开发周期中最重要也是最耗时的环节。特别是算法优化、系统联调等更是重中之重。然而市面上的 DSP 相关著作或教材更偏向数据手册、客观指标的介绍或翻译,能提供实战指南或开发实践的书籍甚少。《C674x-DSP 嵌入式开发与实践》弱化了硬件知识,加强了软件开发中算法仿真、算法优化以及实践开发等环节,逐渐引导读者从概念到应用、由模块到系统地构建 DSP 产品。同时,该书作者从事与 DSP 开发相关的科研和教学达十五年之久,承担了多个企业工程项目,积累了丰富的工程实战经验和教学经验。

该书图文并茂,深入浅出,可为高等院校师生提供学习和参考,也可与 DSP 相关的科技工作者和开发人员提供参考借鉴。

作者还持续在 DSP 嵌入式开发中刻苦耕耘,编写、调试代码,实属难能可贵,这种脚踏实地的精神定能感染学生或读者们。作者将开发经验、过程体会整理成册,与读者分享,并将部分项目源代码无私共享,也为推动 DSP 产业发展贡献了一份力量。

电子科技大学 彭真明
2018 年 6 月

前言

随着物联网、大数据、云计算、人工智能等新一代信息技术的发展,满足低功耗、高性能,以及个性化、可定制等要求的嵌入式技术或产品是必然趋势。实现这些技术和产品的关键部件是可编程嵌入式处理器,它包括擅长人机交互或任务管理的 ARM,并行能力强或时间精度高的FPGA,以及信号处理能力强或适于多算法任务的DSP等。信息技术中语音信号处理、图像信号处理、视频或视觉处理等的算法编程和持续优化任务,需要并行计算能力强、通用 C 语言编程、易调试升级、低功耗高性能的嵌入式应用方案来承载,以实时处理数字信号为特点的 DSP 芯片是满足上述应用要求的最佳选择。

美国德州仪器(Texas Instruments, TI)是世界上知名的 DSP 芯片生产厂商,目前其产品应用领域、市场占有率相比其他 DSP 厂商都具有绝对优势。其超长的 DSP 产品线、丰富的技术开发文档及性能强悍的 C 编译器等奠定了 TI 公司在 DSP 业界的领导地位。TI 公司的 DSP 主要包括适于控制的 C2000 系列,用于便携式低功耗的 C5000 系列,以及满足高性能和复杂功能的 C6000 系列。

然而随着MCU、ARM 等技术进步以及信息产业对物联网嵌入式装置的大量需求,C2000/C5000 系列 DSP 已经被 ARM Cortex-M 系列处理器(如 STM32)所取代。但是,目前相当多高校开设的 DSP 相关课程实践平台仍然以 C2000/C5000 系列居多。然而,公司企业或科研院所很少或几乎不再选用 C2000/C5000 系列 DSP 来设计方案。基于该现状我校拨付专项经费用于实践平台升级,以期缩小高校教学与企业需求之间的鸿沟。TI 公司的 C6000 系列 DSP 配备了丰富的软硬件开发资源,为开展高性能、复杂应用的嵌入式产品设计提供了灵活的芯片方案。C674x-DSP 是 TI 公司推出的低功耗、高性能定浮点处理器内核,非常适合控制、通信、信号等领域应用。读者在学习了该处理器的相关开发后,一方面在实际嵌入式方案设计中能直接选用该平台;另一方面,读者升级到更高一级型号如 C66x 时,开发过程将变得非常轻松。

TMS320C6748 是基于 C674x 内核的单核处理器,其 CPU 主频高达 456MHz, L1 数据缓存 32KB, L1 程序缓存 32KB, L2 缓存 256KB,可外接 DDR2 存储器。丰富的片内外设包括网络 EMAC、视频采集 VPIF、图像显示 LCD、本地存储 SD、语音接口 McASP、UART/SPI 串口、USB 通信、硬盘 SATA 等,可满足控制、通信和信号处理领域的典型应用。

在 DSP 技术开发中,软件开发、算法优化占据着项目研发总周期的绝大部分。通常,DSP 入门级人员对硬件开发或电路设计关注较少,即使资深嵌入式工程师在硬件成型后,除非电路不稳定,均极少对硬件部分做出改动。因此,DSP 开发者更多地关注基于已有开发板如何快速入门、上手并编写出自己的 DSP 程序,实现“麻雀虽小,五脏俱全”的系统程序和高度优化的算法模块。

基于这种工程认知,为了让广大开发人员快速上手、实现编程任务,本书按照由简入繁、由粗到细、由概念到应用、由模块到系统的学习模式讲述 DSP 嵌入式开发与实践,本书特点如下:

(1)概略描述 C674x-DSP 的 CPU 架构,原理性地介绍软件开发和硬件开发工具。

(2)集成开发环境 CCS 是开发人员实战的主要战场,CCS 程序类型包括应用程序工程、算法程序工程,CCS 具有程序编辑、编译、调试、跟踪及数据多方式查看等功能。

(3)算法优化是 DSP 系统开发的难点和重点,通过多年的 DSP 技术相关教学和项目经验,总结提炼出两步优化策略,通过 DMA 或 Cache 使待处理数据空间靠近 CPU;算法软件流水或单指令多数据提高指令周期效率,均得到了实战验证。

(4)典型实践应用借助项目实战,为读者展示了 DSP 实用系统的详细搭建、开发、调试和测试过程。

每章内容要点如下所述。

第 1 章主要介绍 DSP 的前世今生、TI 公司的 DSP 产业链、DSP 的技术优势以及其结构特点。

第 2 章主要介绍 TI 公司的 TMS320C674x 系列处理器、DSP 的功能模块、CPU 的内核架构以及 C674x-DSP 的片上外设。

第 3 章主要介绍 DSP 的硬件、软件开发工具以及应用系统开发过程。

第 4 章主要介绍 CCS v5 的安装、简单编程以及 CCS 的编辑透视图和调试透视图功能。

第 5 章主要介绍 CCS 的软件仿真开发,包括创建各种源文件及简单调试。

第 6 章主要介绍 CCS 编译器优化,C 语言级优化,Intrinsic 指令优化,线性汇编优化以及使用第三方优化库等 DSP 算法优化技术。

第 7 章主要介绍 StarterWare 应用系统软件开发。

第 8 章主要介绍 SYS/BIOS 应用系统软件开发。

第 9 章主要介绍基于 C674x-DSP 的图像通信项目开发与实践。

虽然,我们努力提供可重复的工作,但由于软件安装环境、使用软件版本等差别,简单照搬可能会导致不正确的结果。因此,在充分还原本书构建环境、理解本书思想内容的基础上,方可重复本书中涉及的实例。

全书由路锦正统筹、撰写。张红英教授作为课题组成员,为本书的立项提供了大量帮助,审阅了全文稿件,提出了富有建设性的意见。李强教授为书稿写作也提供了宝贵的参考意见。研究生刘川、朱豪、刘姝、刘明、董川、李意弦、杨柳等为本书搜集相关资料,帮助验证了部分应用程序。在此,对他们的支持与帮助,一并表示感谢。

本书得到了中国教育部—美国 TI 公司产学研合作协同育人项目的支持,在此表示感谢。特别感谢德州仪器半导体技术(上海)有限公司中国 TI 大学计划部总经理潘亚涛、工程师谢胜祥的指导和支持。

本书的出版得到了西南科技大学信息工程学院领导的大力支持,资助经费以保障本书顺利出版,在此表示感谢。

特别感激家人的亲情力量,他们是我努力工作的动力和源泉,感谢他们的无言奉献与温情陪伴。

本书是在科学出版社编辑的帮助下完成的，没有他们的辛苦付出，本书是不可能出版的。

本书中关于 TI 公司 DSP 的相关资料部分来源于 TI 公司相关网站，如 TI 公司官网 (www.ti.com)、TI 维基社区 (processors.wiki.ti.com)，相关文档或软件的最新版本均可以从中查询、下载。

另外，本书还参考了广州创龙电子科技有限公司提供的部分案例源码，在此表示感谢。

本书的所有案例程序以及有关软件可以从下述短链接网盘免费下载：

链接：<http://dwz.cn/C674x-DSP> 或 <http://t.cn/RrEX6Ju>。密码：wf9u。

本书尽可能列出所有参考文献，若有遗漏，敬请谅解。

由于时间仓促，水平有限，书中难免有疏漏之处，欢迎读者批评指正。

联系方式：swustdsp@163.com。

路锦正

2018 年 5 月 12 日

目 录

第1章 DSP 技术概述	1
1.1 DSP 的前世今生	3
1.2 TI 公司的 DSP 产业链	5
1.2.1 概览	5
1.2.2 TI 公司的 DSP 产品	9
1.2.3 TI DSP 新手入门	13
1.2.4 DSP 的应用	16
1.2.5 工具与软件	18
1.2.6 技术文档	18
1.2.7 支持与培训	19
1.3 DSP 的技术优势	20
1.3.1 DSP 的价值	20
1.3.2 性能优先	21
1.3.3 轻松实现 DSP 的性能	23
1.3.4 稳定的 DSP 工具组件	25
1.3.5 DSP 势不可挡	26
1.4 DSP 的结构特点	26
1.4.1 DSP 的内核特征	27
1.4.2 适于数字信号处理的特点	27
1.5 本书主要内容	30
第2章 TMS320C674x-DSP 的硬件结构	32
2.1 C674x 系列处理器	32
2.2 C674x-DSP 的功能模块	36
2.3 C674x-CPU 的内核	40
2.3.1 C674x-CPU 的特征	40
2.3.2 C674x-CPU 的结构	42
2.3.3 存储器映射	43
2.3.4 CPU 的数据通路	44
2.4 C674x-DSP 的片上外设	48
第3章 DSP 技术开发工具	60
3.1 硬件开发与调试工具	60
3.1.1 EVM 评估板	60

3.1.2 仿真器	63
3.2 软件开发与调试工具	70
3.2.1 集成开发环境(Code Composer Studio, CCS)	70
3.2.2 算法软件开发支持包	70
3.2.3 系统软件开发支持包	74
3.3 DSP 应用系统开发过程	80
第4章 CCS 集成开发环境	82
4.1 CCS v5 安装	82
4.1.1 安装准备	82
4.1.2 安装过程	82
4.2 创建一个可执行 CCS 程序	88
4.2.1 创建 CCS 工程	88
4.2.2 运行 CCS 工程	90
4.3 CCS 功能简介	93
4.3.1 CCS 编辑透视图	94
4.3.2 CCS 调试透视图	108
第5章 DSP-Simulator 软件仿真开发	118
5.1 软件仿真概述	118
5.1.1 软件仿真优势	118
5.1.2 软件仿真类型	119
5.1.3 软件仿真用法	120
5.2 创建源文件	121
5.2.1 静态算法库程序	122
5.2.2 可执行应用程序	131
*5.2.3 链接器命令文件	135
5.2.4 目标配置文件	138
5.3 工程依赖性配置	139
5.4 DSP 软件仿真调试	140
5.4.1 断点设置与运行	141
5.4.2 查看变量与内存	142
5.4.3 数据图像化显示	145
第6章 DSP 算法优化技术	147
6.1 DSP 优化概述	147
6.1.1 DSP 算法优化流程	149
6.1.2 DSP 算法优化策略	151
6.2 CCS 编译器优化	156
6.2.1 CCS 编译选项	156
6.2.2 执行的优化种类	159

6.3 算法 C 语言级优化	161
6.3.1 编写 C 程序	161
6.3.2 使用关键字	164
6.3.3 Cache 优化	172
6.4 算法 Intrinsic 指令优化	175
6.4.1 SIMD 指令	176
6.4.2 Intrinsic 使用举例	176
6.4.3 图像反色的 Intrinsic 优化	178
6.5 算法线性汇编优化	180
6.5.1 线性汇编语言	181
6.5.2 优化使用举例	182
6.5.3 优化技巧总结	184
6.6 使用第三方库优化	185
6.6.1 数字信号处理库 DSPLIB	185
6.6.2 图像库 IMGLIB	187
6.6.3 视觉库 VLIB	192
第 7 章 基于 StarterWare 的应用系统开发	196
7.1 什么是 StarterWare	196
7.2 StarterWare 构成	197
7.2.1 系统配置	197
7.2.2 串行设备	199
7.2.3 显示设备	200
7.2.4 NAND	201
7.2.5 GPIO	201
7.2.6 RTC	202
7.2.7 以太网	202
7.2.8 McASP	204
7.2.9 字符 LCD	204
7.2.10 Cache MMU	205
7.2.11 USB	205
7.2.12 开箱即用演示程序	205
7.3 如何使用 StarterWare	206
7.3.1 设备驱动	207
7.3.2 应用示例	207
7.4 StarterWare 图像回环案例	208
7.4.1 构建新驱动库	209
7.4.2 视频回环示例	210
7.4.3 视频回环演示	216

第 8 章 基于 SYS/BIOS 的应用系统开发	218
8.1 SYS/BIOS 概述	218
8.1.1 SYS/BIOS 与 DSP/BIOS	219
8.1.2 SYS/BIOS 与 XDCtools	219
8.2 SYS/BIOS 工程实例	223
8.2.1 构建 SYS/BIOS 工程	223
8.2.2 修改 SYS/BIOS 工程	225
8.3 配置 SYS/BIOS 应用程序	225
8.3.1 XGCONF 打开 SYS/BIOS	226
8.3.2 XGCONF 配置 SYS/BIOS	227
8.3.3 访问全局字符	230
8.4 线程调度(Thread Scheduling)	230
8.4.1 概述	230
8.4.2 硬中断(Hwi)	233
8.4.3 软中断(Swi)	234
8.4.4 任务(Task)	235
8.4.5 闲置(Idle)	238
8.5 线程同步(Synchronization)	239
8.5.1 旗语(Semaphore)	239
8.5.2 事件(Event)	241
8.5.3 邮箱(Mailbox)	243
8.5.4 队列(Queue)	244
8.6 内存管理	245
8.6.1 内存映射(Memory map)	246
8.6.2 映射段到内存块	248
8.6.3 堆栈(Stack)	249
8.6.4 缓存配置(Cache Configuration)	250
8.6.5 动态内存申请	251
8.7 硬件抽象层 HAL	254
8.8 NDK 网络应用程序开发	255
8.8.1 网络开发套件	255
8.8.2 创建网络应用程序	255
8.8.3 修改网络应用程序	258
8.8.4 运行网络应用程序	259
第 9 章 C674x-DSP 项目开发实践	261
9.1 项目开发实践概述	261
9.2 图像通信的 DSP 端编程	262
9.2.1 C674x-DSP 视频编码库	262

9.2.2	创建 DSP 应用程序	262
9.2.3	视频图像实时采集	264
9.2.4	创建编码器实例	267
9.2.5	YUV420 视频序列编码	269
9.2.6	码流 UDP 网络发送	270
9.3	图像通信的客户端编程	271
9.3.1	构建位图界面应用程序	271
9.3.2	码流 UDP 网络接收	284
9.3.3	码流实时解码	286
9.3.4	YUV 序列图像显示	289
9.4	图像通信系统联调	292
9.4.1	DSP 端程序运行	292
9.4.2	PC 端程序运行	293
9.4.3	编码性能剖析	294
参考文献		295
附录		296

第 1 章 DSP 技术概述

数字信号处理器 DSP (Digital Signal Processor) 是伴随着软件实时 (Real-time) 数字信号处理任务需求而发展起来的可编程器件。与软件实现相对的是 ASIC (Application Specific Integrated Circuit) 专用芯片, 它可通过直接搭建硬件电路完成信号处理。显然, DSP 的可编程、易升级、实时等特点, 使得 ASIC 无法比拟。实时信号处理指系统在规定的时间内将单帧图像、单个数据包或单个样本等用确定的 CPU 资源处理完毕。例如实时视频图像通常在每帧 40 毫秒 (帧率 25 帧/s)、每帧 16.7 毫秒 (帧率 60 帧/s), MP3 语音每帧 26.12 毫秒 ($1152 \times 1000 / 44100$) 内, 对来源于任何场景的数据, 系统都能保证完成既定的处理任务。信号处理指以数字形式对信号进行采集、滤波、增强、变换、压缩、识别等处理, 以得到符合人们需要的信号结果。

实现软件实时信号处理平台除 DSP 外, 还有 FPGA (Field-Programmable Gate Array)、ARM (Advanced RISC Machine)、GPU (Graphics Processing Unit)、GPCPU (General Purpose Central Processing Unit) 等器件, 与 DSP 相比其侧重点各有不同。FPGA 的本质是硬件实现, 其编程语言与 C 语言差别较大, 调试异常艰难, 在实现等量信号处理任务下, DSP 系统所需的物料、人力和时间等资源成本都完胜 FPGA。ARM 更适于人机交互、任务管理等应用, 但信号处理能力弱; 而同时包含 ARM 和 DSP 的异构处理器结合了二者的优势, 已经在产品中得到了很好的应用。GPU 适用于大型图形工作站、密集数据运算, 但难以满足恶劣环境、低功耗、小型化等需求。通用处理器 CPU, 其信号处理能力弱、硬件组成复杂、系统体积大、功耗高、抗环境影响能力较弱。因此, DSP 适用于信号处理的系统架构、通用 C 语言编程、易调试升级, 具有低功耗、体积小、开发难度小等优点, 是诸多嵌入式应用方案的优秀选项。然而, DSP 也不是万能的, FPGA 的高精度时序逻辑、高度并行等是 DSP 器件无法企及的; ARM 的人机控制和多任务实时调度等也明显优于其他器件。所以, ARM+DSP、FPGA+DSP 异构设计方案, 由于其吸纳了不同类型处理器优势, 确保了系统的可靠性、实时性和灵活性。

物联网、大数据、云计算和人工智能等新一代信息技术, 其技术功能可用“人”来类比其作用。所谓智能机器世界, 即通过物联网 (身体) 中的传感器或摄像头 (皮肤、眼睛、耳朵、鼻子) 等终端产生并收集海量数据, 然后存储于云平台 (大脑), 借助云计算、大数据分析, 通过人工智能做出类似人的行为和决策。反过来, 可将这些行为和决策通过物联网和智能终端设备来实施。以上述技术为代表的时代, 有人称之为“第四次工业革命”。德国的“工业 4.0”、美国的“工业互联网”以及中国的“中国制造 2025”, 在外延上三者虽有所区别, 但内涵基本一致, 异曲同工。DSP 微处理器作为一种可实现智能应用的载体, 其相关软硬件开发资源为嵌入式实践提供了方案支撑。

众所周知, 美国德州仪器 (Texas Instruments, TI) 是世界上最知名的 DSP 芯片生产厂

商,其产品应用最广泛、市场占有率高,其生产的 TMS320 系列 DSP 芯片已广泛应用于各个领域。其他厂商如 ADI 的 ADSPxx、TSxx 系列,飞思卡尔的 MSC8xx、DSP56Fxx 系列,虽然也占有一定的市场,但因其处理性能、编译器效率的局限性,都无法与 TI 相抗衡。TI 的 DSP 芯片主要分为三个系列,包括适用于控制的 C2000 系列,用于便携式、低功耗的 C5000 系列和满足高性能、复杂功能的 C6000 系列。然而随着 MCU(单片机、微控制器)、ARM 技术的进步以及产业对物联网嵌入式装置的大量需求,C2000、C5000 系列的 DSP 可以被 ARM Cortex-M 系列处理器(又称 STM32)所取代,且有迅猛发展的态势。通过对国内知名高校、科研院所及嵌入式终端制造商的调研和分析,得到了如下结论:本科生或研究生的实践平台选用 C2000/C5000 系列居多,如 C2812、C5402、C5509 系列,而选择 C6000 系列的较少;公司企业或科研院所选用 C6000 系列的居多,选用 C2000/C5000 系列 DSP 来设计方案的基本上没有。

TI 的 C6000 系列 DSP 包括第一代 C62x、C64x、C67x,第二代 C64x+、C67x+、C674x,第三代 C66x。根据数据格式类型划分,C62x、C64x、C64x+为纯定点 DSP,C67x、C67x+为纯浮点 DSP,C674x、C66x 为定浮点 DSP。浮点 DSP 可运行浮点或定点算法,定点 DSP 只能高效运行定点算法,定浮点 DSP 可根据数据运算类型自动选择定浮点指令。

C6000 系列 DSP 可满足控制、通信、信号等领域的应用需求,能够处理包括视频、图像、语音、弱信号等类型的数据,可应用于机器视觉、电网自动化、航空电子、高性能计算、视频编解码、生物识别、汽车电子等领域。TI 的 DSP 开发资源包括操作系统、演示、组件和开发包等,以及尤为丰富的文档来简化、加速开发。TI 提供了独立于操作系统且优化的多种算法库,如基础数学和信号处理库(MathLIB、IQMath、FastRTS、DSPLIB)、图像和视频处理库(IMGLIB、VLIB)、电信库(VoLIB、FaxLIB、AER/AEC)、医学库(STK-MED)、多媒体数据 VISA(Video/Image/Speech/Audio)编解码库 CODEC。用于 DSP 的开发工具主要有:软件工具——集成开发环境 Code Composer Studio(CCS)、硬件工具——DSP 开发套件和评估模块(EVM)及硬件仿真器(Emulator)。

DSP 软件开发又包括系统软件开发和算法软件开发。与系统软件配套的 SDK 开发包有实时嵌入式操作系统 SYS/BIOS、硬件访问软件包 StarterWare、芯片支持库 CSL、网络开发包 NDK/NSP/LWIP 和核间通信 IPC 等。这些工具一方面极大地降低了产品开发难度,提高了系统稳定性;另一方面让开发者集中精力关注体现与其他产品重要差别的算法软件开发。算法软件开发主要关注优化技术,包括 C 语言级优化、线性汇编优化、内联指令优化、使用第三方优化库以及算法的 xDAIS/xDM 标准化和商用化封装。

产品的可定制性为实现差异化提供了条件;系统可编程为功能升级,掌握知识产权和核心技术提供了前提。DSP 是嵌入式解决方案的核心,TI 的 C6000 系列 DSP 配备了丰富的软硬件开发资源,为开展高性能、复杂应用的嵌入式实践活动提供了灵活的芯片方案选择。TMS320C674x 作为 TI 公司生产的一款定浮点、低功耗、高性价比的 DSP 处理器,非常适合控制、通信、信号等领域的嵌入式开发应用。读者在学习了该款 DSP 的有关应用开发后,一方面在实际嵌入式方案设计中可直接选用该平台;另一方面,当后续升级到更高级型号,如 C66x 时,学习和使用过程将变得非常轻松。

根据笔者十余载的 DSP 技术开发和教学科研经验,实际情况中软件开发、算法优化

占用了 DSP 项目研发总周期约 80% 的精力和时间。DSP 入门级人员通常对硬件开发或电路设计关注较少,甚至对于资深的嵌入式工程师,硬件成型后,除非电路不稳定均不会做改动。DSP 开发者更多地关注基于已有开发板如何快速地入门、上手,编写出自己的 DSP 程序,实现“麻雀虽小,五脏俱全”的系统程序和高度优化的算法模块。

然而,市面上的 DSP 有关著作或教材中,大部分是对芯片手册的翻译,芯片硬件指标介绍的偏多,而实战经验或开发实践的偏少。读者从纸质材料中获取对开发与应用有参考价值的工作经验及信息甚少。本书撇弃传统的芯片手册翻译著书形式,零基础入门,从读者接触的 DSP 概念开始,逐层引入到实用系统的开发过程,具体如下:

(1) 概略描述 C674x-DSP 的 CPU 架构,原理性地介绍软件开发和硬件开发工具。

(2) 集成开发环境 CCS 是开发人员实战的主要战场,CCS 程序类型包括应用程序工程、算法程序工程,CCS 具有程序编辑、编译、调试、跟踪及数据多方式查看等功能。

(3) 算法优化是 DSP 系统开发的难点和重点,笔者根据多年的 DSP 技术教学和项目经验,总结提炼出两步优化策略,并得到了实战印证。

(4) 典型实践应用借助项目实战,为读者展示了 DSP 实用系统的详细搭建、开发、调试和测试过程。

本书从开发入门、开发储备和开发实践的编写思路,为读者构建逐层深入、由简到繁、由粗到细、由概念到应用、由模块到系统的学习模式,同时努力降低开发难度、缩短产品成型时间。

1.1 DSP 的前世今生

2012 年,值 TI 公司 DSP 历史 30 周年之际,EDN 记者 Steve Taranovich 以题为《DSP 的 30 年:从儿童玩具到 4G 和未来》专访了 TI 公司首席科学家 Gene Frantz (Taranovichs. 2017)。如 Gene Frantz 所言,TI 公司的 DSP 先驱者们顿悟于 70 年代,并一直深耕于这片领地。他有幸参加了玩具“Speak&Spell”的设计,这款产品是首次搭载 DSP 技术的儿童玩具,可通过合成语音来进行启蒙教育,图 1.1 为拍摄于 1978 年的玩具最初原型。在确定了产品的可行性研究后,TI 投入了大量的人力和物力,并成立了新的 DSP 团队。1982 年 2 月,TI 在著名的“国际固态电路研讨会”上以一篇《一种具有数字信号处理能力的微计算机》的论文将 DSP 设计结果公之于世(Magars et al., 1982)。同年 4 月,TI 公司的 Caudel 在巴黎召开的“音频、语音与信号处理国际研讨会”上宣布了 DSP 最终产品——TMS32010。自此,TI 公司打造了一条 DSP 系列生产线,包括早期的 TMS320C1x/C3x/C4x/C8x、主系列 C2000 (TMS320C28xx/C24xx)、主系列 C5000 (TMS320C54xx/C55xx) 和主系列 C6000 (TMS320C62xx/C64xx/C67xx, C64x+, C67x+, C674x, C66x)。

一直以来,TI 持续关注“三 P 价值”:性能(Performance)、价格(Price)和功耗(Power dissipation)。Gene Frantz 特别提到“大多数人没有意识到功耗是重要问题”,“但是,自计算机被发明的 60 年代中期,我们一直在探究低功率器件技术”。若没有 DSP 以及它在音频、图像和多媒体处理方面的推动作用,就不会有“信息娱乐”内容。针对特定的市场

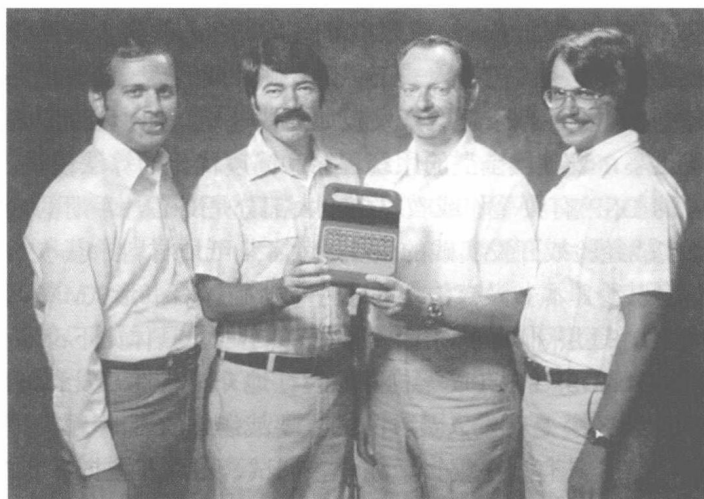


图 1.1 搭载 DSP 技术的“Speak&Spell”玩具原型(左一为 Gene Frantz, 摄于 1978 年)

需求, TI 公司的信号处理器一直进行着优化。与其说 TI 公司打造了一条 DSP 产品线, 不如说打造了一条马达控制处理器、音频信号处理器、通信信号处理器、图像信号处理器、视频信号处理器和视觉信号处理器的产品线, 所有这些都能采用数字信号处理的理论和硬件。Gene Frantz 强调, 很显然异构处理器架构会是一个综合方案, 即 TI 公司要将 DSP 集成在各种系统处理器(如 ARM)、各种加速器和外设中。通过集成这些元素, 他们创造出了完整的嵌入式处理器的系统解决方案。所以信号处理的历史, 从发现数字信号处理理论到现在, 可以总结为信号处理理论到信号处理器产品的转变, 甚至是到嵌入式处理器系统的使能器的转变。

TI 公司 DSP 的开创者们从拜访数字信号处理领域的权威教授开始, 为他们提供 TI 当时的主流可编程 DSP 设备的硬件和软件, 让其亲自进行研究和实施, 从而加速了 DSP 技术在市场上的普及和扩散。但是这些还不够, TI 公司需要加速 DSP 人才的培养, 所以 TI 赞助了教科书、实验室, 捐赠了设备, 还游说了全球各地的教授来推动大学中的 DSP 教育, 从学士、硕士到博士的每个阶段都有机会接触到 DSP 技术课程。TI 中国大学计划于 1996 年正式启动, 由模拟技术(Analog)大学计划、单片机(MCU)大学计划以及数字信号处理器(DSP)大学计划三部分组成。目前 TI 公司在国内 600 多所大学中建立了超过 3000 个联合实验室, 极大地推动了三个领域的教学与实践发展。TI 中国大学计划为老师和学生们提供了丰富的教学资源、实验室合作项目、科研合作项目以及电子设计竞赛平台, 让他们能够在日常学习和研究中获得更多乐趣, 在实践中掌握世界领先技术。

人们从外界接收的各种信息中 80% 以上是通过视觉获得的。因此图像和视频的各种应用孕育着巨大的商机, 如视频监控、机器视觉、人工智能、深度学习等当下炽热的技术都以视频图像作为重要的信息载体, 而这些技术应用的关键部件则是处理器。全球半导体业务领先的 TI 公司当然也要来分享这个大蛋糕, 在 2003 年推出了用于分析和处理视觉信息的高度集成式数字媒体片上系统 SoC(System on Chip)——达芬奇系列数字视频处理器(DaVinci Digital Video Processors)。风靡一时的 TMS320DM642 为安防行业立下了汗马功

劳,业界如海康威视、浙江大华等公司凭借其独特的视频算法及对处理器的充分发掘,成为当前全球领先的视频监控产品的制造商。DaVinci 处理器是 DSP 的一个系列,专为数字视频、影像和视觉应用而设计。产品包括针对 ARM9 的低成本解决方案到基于 DSP 的全功能片上系统 SoC。

TI 公司的数字视频处理器系列是高度集成式、具有成本效益的嵌入式可编程平台,可捕捉、分析和处理来自现实世界物理环境的数据密集型视觉信息。利用 TI 公司的 SoC 处理器技术和强大的 SDK,设计人员可快速向市场推出具有创新性的视频和视觉产品。TI 公司的数字媒体 SoC 处理器满足了视频和视觉应用的日常需求,如智能视频安防、楼宇自动化、工厂自动化、工业运输、内窥镜和非军用无人机等。处理器的高度集成、超低延时及可扩展性等优势为种类多样的视频应用提供了保障。通过在单个硅芯片上集成多个处理引擎,兼顾了成本、功耗和性能的要求;超低延迟可实现高级视频编码/解码功能,具有最小丢包和延迟,从而提供卓越的用户体验;完整的器件系列可最大限度地重复使用硬件和软件资源。

TMS320DM36x 数字媒体处理器专为成本敏感型应用而设计,这些应用要求在 30 帧/s 下实现 HDVICP (High-Definition Video Image Coprocessor) 视频协处理器所能实现的像素高达 1080pH.264 的视频编解码。TMS320DM38x 数字媒体处理器专为 1GHz 的 ARM Cortex-A8 和 HDVICP2 视频协处理器支持的视频应用而设计,支持 1080p 60 帧/s 实时视频编解码。TMS320DM812x/4x 数字媒体处理器集成了强大的 C674x 浮点超长指令字 (VLIW) DSP 和 3D 图形引擎,专为视频分析、编解码和显示应用而设计。DM50x 视觉分析处理器集成了嵌入式视觉引擎和双核 C66x-DSP,专为要求高性能、低延迟处理和低功耗的高级视觉处理应用而设计。

特别地,从 DM50x 的硬件资源和应用特点来看,其配置和产品定位与 DM642 非常相似。作者大胆预测,DM50x 处理器将在嵌入式图像/视觉处理领域中,再造 DM642 的业界传奇,续写 TI 公司 DSP 的产业辉煌。

1.2 TI 公司的 DSP 产业链

1.2.1 概览

DSP 是嵌入式解决方案的核心,鉴于物联网、人工智能、深度学习等技术的猛烈发展需求,TI 公司打造了从传感器到服务器的 DSP 多系列产品线。TI 公司是 DSP 领域的领先提供商,可提供广泛、可扩展且易于编程的器件产品。TI 公司的 DSP 具有精确的确定性架构,并提供了响应时间极短的实时操作系统。超高性能的 C66x-DSP 具有业界领先的高浮点处理性能综合测评分数。低功耗是嵌入式系统的不变追求,TI 公司的 DSP 具有业界功耗最低的处理器的性能功耗比遥遥领先于其他同类器件。

1. 精确的确定性架构

实时确定性处理指在一般的任何场景下,硬中断和软中断响应时间短,实时操作系统