

“黑色经典”系列之《DSP 嵌入式系统开发典型案例》



第 1 章 绪论

数字信号处理是模拟电子时代向数字电子时代前进的理论基础，而数字信号处理器（DSP，Digital Signal Processor）是随着数字信号处理而专门设计的可编程处理器，是现代电子技术、计算机技术和信号处理技术相结合的产物。随着信息处理技术的飞速发展，DSP 在电子信息、通信、软件无线电、自动控制、仪器仪表、信息家电等高科技领域获得了越来越广泛的应用。DSP 不仅快速实现了各种数字信号处理算法，而且拓宽了数字信号处理的应用范围。DSP 的功能将越来越强大，应用范围也将越来越广泛。

1.1 DSP 概述

1978 年世界上第一块 DSP 芯片 S2811 在美国微系统 (Microsystems) 公司的 AMI 子公司问世, 1979 年第一块商用可编程 DSP 芯片 2920 在美国 Intel 公司诞生, 标志着 DSP 芯片早期雏形的形成。虽然这两种芯片内部不具备现代 DSP 芯片的硬件结构, 但为数字信号处理的发展开拓了道路, 促使 DSP 芯片向性能更高的方向发展。1980 年日本 NEC 公司推出第一个具有硬件乘法器的商用 DSP 芯片 UPD7720, 1982 年日本的 Hitachi 公司推出第一个采用 CMOS 工艺生产的浮点 DSP 芯片。紧接着, 1983 年日本的 Fujitsu 公司推出浮点 DSP 芯片 MB8764, 其指令周期仅为 120ns, 内部具有双总线结构, 从而使处理数据的吞吐量和前期产品相比有了一个很大的提高。但具有更高性能的 DSP 芯片是美国 AT&T 公司于 1984 年推出的浮点 DSP 芯片 DSP32。

此外, 1982 年 TI 公司成功推出了第一代 DSP 芯片 TMS32010 及其系列产品 TMS32011、TMS32C10/C14/C15/C16/C17 等。之后, 该公司又相继推出第二代 DSP 芯片 TMS32020、TMS320C25/C26/C28, 第三代 DSP 芯片 TMS32C30/C31/C32, 第四代 DSP 芯片 TMS32C44, 第五代 DSP 芯片 TMS32C50/C51/ C52/C53 以及集多个 DSP 核于一体的高性能 DSP 芯片 TMS32C80/ C82 等。

自 1980 年以来, DSP 芯片得到了突飞猛进的发展, DSP 芯片的应用也越来越广泛。从运算速度来看, MAC (一次乘法和一次加法) 的开销时间已经从 20 世纪 80 年代初的 400ns (如 TMS32010) 降低到 40ns (如 TMS32C40), 处理能力提高了 10 多倍。DSP 芯片内部关键的乘法器部件从 1980 年占模区的 40 个左右下降到 5 个以下, 片内 RAM 的数量增加一个数量级以上。从制造工艺来看, 1980 年是采用 4 μ 的 NMOS 工艺, 而现在则普遍采用微米 CMOS 工艺。DSP 芯片的引脚数量也从 1980 年的最多 64 个增加到现在的 300 个以上, 引脚数量的增加, 意味着结构灵活性的增加。此外, 随着 DSP 芯片的发展, DSP 系统的成本、体积、重量和功耗都有很大程度的下降。

现在, 世界上的 DSP 芯片有 300 多种, 其中定点 DSP 有 200 多种, 浮点 DSP 有 100 多种。迄今为止, 生产 DSP 的公司有 80 多家, 主要厂家有 TI 公司、AD 公司、Lucent 公司、Motorola 公司和 LSI Logic 公司。TI 公司作为 DSP 生产商的代表, 品种最多, 定点和浮点 DSP 都大约占 60% 的市场份额; AD 公司的定点和浮点 DSP 大约占 16% 和 13% 的市场份额; Motorola 公司的定点和浮点 DSP 大约占 7% 和 14% 的市场份额; Lucent 公司则主要生产定点 DSP, 约占 5% 的市场份额。根据 1998 年的统计, 占市场主导地位的产品是 AD 公司的 ADSP-21xx (16bit 定点)、ADSP-21xxx (32bit 定点和浮点), Lucent 公司的 DSP16xxx (16bit 定点)、DSP32xx (32bit 浮点), Motorola 公司的 DSP561xx (16bit 定点)、DSP560xx (24bit 定点)、DSP96002 (32bit 浮点) 和 TI 公司的 TMS320C54xx (16bit 定点)、TMS320C3x (32bit 浮点) 等。根据最近的统计, 占市场主导地位的产品是 TI 公司的 TMS320C54xx (16bit 定点)、TMS320C55xx (16bit 定点)、TMS320C62xx (32bit 定点)、TMS320C67xx (32bit 浮点), AD 公司的 TigerSHARC 系列的 DSP 芯片, Motorola 公司的 DSP68000 系列的 DSP 芯片等。

美国 TI 公司是 1930 年成立于美国德肯萨斯 (Texas) 州的一家从事石油勘探的公司, 1951 年更名为 TI 公司。1982 年 TI 公司的 TMS320 系列 DSP 芯片的第一代处理器 TMS320C10 问

世, TI 公司经营重点转向电子技术。经过十几年的发展, TI 公司又相继发展了 TMS320C2000、TMS320C5000 和 TMS320C6000 这 3 个系列的 DSP 产品。现今 TI 公司的 TMS320 系列已成为 DSP 市场中的主流产品, 约占市场份额的 70%, 是世界最大的 DSP 芯片供应商。

TI 公司的 TMS320 系列主要以 DSP 控制平台 C2000 (C20x、C24x), DSP 有效性能平台 C5000 (C54x、C55x), DSP 高性能平台 C6000 (C62xx、C67xx、C64xx) 以及 DSP 嵌入式平台 (OMAP) 这 4 个平台为发展基础。此外, 还有一些专用 DSP 和多处理器 DSP 芯片。本书案例涵盖了 TI 公司的这 4 个系列的 DSP。

1.1.1 TMS320C2000 系列

TMS320C2000 系列 DSP 一般应用于控制领域, 可以替代老的 C1x 和 C2x 型号的 DSP。现在 TMS320C2000 系列 DSP 的应用主要集中在以下两个方面。

① C20x。C20x 是 16bit 定点 DSP 芯片, 速度为 20MIPS~40MIPS (million instructions per second, 每秒执行百万次指令), 片内 RAM 比较少, 如 C204 片内只有 512 字节的 DARAM。有些型号的 C20x DSP 芯片中带有闪速存储器 (Flash Memory), 如 F206 就带有 32K×16bit 的闪速存储器。C20x 的主要应用范围为数字电话、数码相机、自动售货机等。

② C24x。C24x 是 16bit 定点 DSP, 速度为 20MIPS, 一般用于数字马达控制、工业自动化、电力交换系统、变频设备、空调等设备。为了在有限的空间里提高数字控制设备的性能, TI 公司最近推出了 TMS320LF2401A、TMS320LF2403A 和 TMS320LC2402A 这 3 款新型 C24xx DSP。这 3 款新型 C24xx DSP 降低了业界的原始设备生产商 (OEM) 的系统成本, 进一步实现了系统的小型化、智能化, 使产品设计更趋完善。

TI 公司的 TMS320LF2410A DSP 是将速度为 40MIPS 的 DSP 内核、闪速存储器以及外设集成到器件中, 其封装尺寸不超过一个隐形眼镜片的大小, 主要用于对实时性有严格要求的场合。而 TMS320LF2410A DSP 高度的系统集成和较小的封装体积, 有助于 OEM 厂商快速地将产品推向市场。

TI 公司的 TMS320LF2403A、TMS320LC2402A 主要针对有更大 RAM 需求而设计。TMS320LF2403A DSP 控制器内部集成了 16K×16bit 闪速存储器、1K×16bit RAM、8 通道的 10bitADC、事件管理器, 具有 CAN2.0B 协议的 CAN 总线控制器、SPI 总线接口及 21 个 GPIO 被全部封装到一只 64 个引脚的 10×10mm 芯片中。TMS320LC2402A DSP 是与 TMS320LF2403A DSP 处理器引脚兼容的处理器, 其内部集成了能替代闪速存储器的 6K×16bitROM 存储器, 生产成本较低。

上述几种新产品都是基于 TI 公司的 TMS320C2x DSP 内核而设计, 从而进一步地拓展了 TI 公司的 C2000 系列 DSP 的应用范围。

1.1.2 TMS320C5000 系列

TMS320C5000 系列是 16bit 定点, 速度为 40~200MIPS, 可编程、低功耗和高性能的 DSP。主要用于有线或无线通信、互联网协议 (IP, Internet Protocol) 电话、便携式信息系统、手机、助听器等。

目前, TMS320C5000 系列中有 3 种有代表性的常用芯片。第一种是 TMS320C5402, 速度为 100MIPS, 片内存储空间较小, RAM 为 16K×16bit、ROM 为 4K×16bit。主要用于无

线 Modem (调制解调器)、新一代个人数字助理 (PDA, Personal Digital Assistant)、网络电话和数字电话系统以及消费类电子产品。TMS320C5402 每片的价格在 5 美元以下,属廉价型的 DSP。第二种常用芯片 TMS320C5420,它拥有两个 DSP 内核,速度可达到 200MIPS, 200K×16bit 片内 RAM,功耗为 0.32mA/MIPS, 200MIPS 全速工作时功耗不超过 120mW,为业内功耗较低的 DSP。TMS320C5420 是当今集成度较高的定点 DSP,适合于多通道基站、服务器、Modem 和电话系统等要求高性能、低功耗、小尺寸的场所。第三种是 TMS320C5416,它是 TI 公司 0.15 μm 器件中的第一款 DSP 芯片,有 128K×16bit 片内 RAM,速度为 160MIPS,有 3 个多通道缓冲串行口 (MCBSP, Multi-channel Buffered Serial Port),能够直接与 T1 或 E1 线路联接,不需要外部逻辑电路,主要用于 IP 语音 (VOIP, Voice Over IP)、通信服务器、专用小型交换机和计算机电话系统等。

为满足对性能、尺寸、价格和功耗有严格要求的设备, TI 公司设计了一种属于 TMS320C5000 系列的 DSP 产品 TMS320C5500™DSP (以下简称 TMS320C55xx)。TMS320C55xx 与 TMS320C54xx 代码兼容,且每个 MIPS 功耗只有 0.05mW,是目前市场上的 TMS320C54xx 产品功耗的 0.4 倍。TMS320C55xx 有强大的电源管理功能,能进一步增强省电功能,可使网络音频播放器用两节 AA 电池工作 200 个小时以上 (相当于目前播放器的工作时间的 10 倍)。

TMS320C55xx 系列的代表产品有 TMS320C5509 和 TMS320C5502。TMS320C5509 DSP 芯片主要用于网络媒体娱乐终端、个人医疗、图像识别、保密技术、数码相机、个人摄像机等设备。TMS320C5509 DSP 芯片是目前集成度较高的通用型 DSP,能提供完备的系统解决方案,具有 96K×16bit 的单口 SRAM、32K×16bit 的双口 SRAM, 32K×16bit 的 ROM 和 6 通道的直接访问存储器 (DMA, Direct Memory Access)。此外, TMS320C5509 DSP 芯片还含有 USB 1.0 接口、用于全双工通信的 3 个多通道缓冲串行接口、Watchdog 定时器、32kHz 晶振输入和单电源的实时时钟、片上 10bit ADC、连接微控制器的 I²C 总线接口以及用于芯片内的编解码器、增强型 16bit 主机接口、两个 16bit 定时器等。TMS320C5509 DSP 支持流行的存储方式,包括对记忆棒、多媒体卡和安全数字卡 (SDC, Secure Digital Card) 的支持。因此, TMS320C5509 DSP 可以广泛地支持 DSP 系统板上的外围器件,包括用于直接连接 PC 机或其他 USB 主机设备的 USB 1.0 端口,并能遵循大多数流行的可移动存储标准,以及多媒体的文件格式。

TMS320C5502 DSP 芯片作为 TI 的 TMS320C5000 DSP 系列平台上新型的性价比较佳的产品,每秒执行的指令高达 4 亿条,可满足当今个人设备对价格和性能的要求。TMS320C5502 DSP 芯片具有 32K×16bit 的片上双口 RAM、一个主机接口、通用外围设备 (如 3 个多通道缓冲串行接口)、1 个硬件 UART、I²C 总线接口和 76 个专用 GPIO 口,提供传输速度为 400Mbit/s 的 32bit 外部存储接口,并支持低价 SDRAM 外设。

1.1.3 TMS320C6000 系列

TMS320C6000 系列 DSP 是 TI 公司 1997 年 2 月推向市场的高性能 DSP,综合了目前 DSP 性价比高、功耗低等一些优点。TMS320C6000 系列中又分为定点 DSP 和浮点 DSP 两类。

(1) TMS320C62xx

该系列是 TMS320C6000 系列中的 32bit 定点 DSP，内部集成了多个功能单元，可同时执行 8 条指令，运算速度为 1200 MIPS~2400MIPS。其主要特点如下。

l 运行速度快。指令周期为 5ns，运算能力为 1600 MIPS。

l 内部结构不同于一般 DSP 芯片。内部同时集成了 2 个乘法器和 6 个算术运算单元，且它们之间是高度正交的，使得在一个指令周期内最大能支持 8 条 32bit 的指令。

l 指令集不同。为充分发挥其内部集成的各执行单元的独立运行能力，TI 公司使用了 VelociTI 超长指令字 (VLIW) 结构。它在一条指令中组合了几个执行单元，结合其独特的内部结构，可在一个时钟周期内并行执行几个指令。

l 大容量的片内存储器和大范围的寻址能力。片内集成了 512K 字程序存储器和 512K 字数据存储器和 32bit 的外部存储器界面。

l 智能外设。内部集成了 4 个 DMA 接口，2 个多通道缓存串口，2 个 32bit 计时器。

l 低廉的使用成本。在一个无线基站的应用中，每片 TMS320C62xx 能同时完成 30 路的语音编解码，每路成本为 3 美元，而以前的 DSP 系列最大只能完成 5 路，每路的成本为 7 美元。

这种芯片适合于无线基站、无线 PDA、组合 Modem、GPS 导航等需要大运算能力的应用场合。

(2) TMS320C67xx

该系列是 TMS320C6000 系列中的 32bit 浮点 DSP，内部同样集成了多个功能单元，可同时执行 8 条指令，其运算速度为 1GFLOPS。该系列除了具有 TMS320C62xx 系列的特点外，其主要特点如下。

l 运行速度快。指令周期为 6ns，峰值运算能力为 1336 MIPS，对于单精度运算可达 1G FLOPS，对于双精度运算可达 250M FLOPS。

l 硬件支持 IEEE 格式的 32bit 单精度与 64bit 双精度浮点操作。

l 集成了 32×32 bit 的乘法器，其结果可为 32 或 64bit。

l TMS320C67xx 的指令集在 TMS320C62xx 的指令集基础上增加了浮点执行能力，可以看作是 TMS320C62xx 指令集的超集。TMS320C62xx 指令能在 TMS320C67xx 上运行，而无需任何改变。

与 TMS320C62xx 系列芯片一样，由于其出色的运算能力、高效的指令集、智能外设、大容量的片内存储器和大范围的寻址能力，这个系列的芯片适合用于基站数字波束形成、图像处理、语音识别、3D 图形等对运算能力和存储量有高要求的应用场合。

目前，TMS320C6000 系列主要向两个方向发展，一是追求更高的性能，二是在保持高性能的同时向廉价型发展。例如，TI 公司最近推出的 TMS320C6414、TMS320C6415 和 TMS320C6416 三款新产品的工作频率高达 800MHz，计算速度接近每秒 64 亿次指令，而功耗仅为现有器件的三分之一。它们既可通过一条单独接入家庭的宽带线路传输大量的个性化数据、视频和语音，也可通过 3G 无线基站向无线手机发送多媒体信息。

TMS320C6000 系列中的 C64x 系列在 DSP 芯片中处于领先水平。C64x 系列 DSP 不但提高了时钟频率，而且在内部结构上也采用了新的优化，主要表现在以下几个方面。

l 寄存器个数比 C62x 增大了一倍，从原来的 32 个变成了 64 个。

l 乘法器、累加器、桶式移位器和加法器等特殊硬件运算器的数量比原来增加了 1~

3 倍。

l CPU 通过 L1 程序缓存 (L1P, L1 Program Cache) 和 L1 数据缓存 (L1D, L1 Data Cache) 执行指令并处理数据, 通过 L2 缓存 (L2, L2 Cache) 与增强型 DMA 控制器 (EDMAC, Enhanced DMA Controller) 相连, 且能控制外围设备, 从而使 Cache 空间增大。

l 外部的总线变成了 64bit, 是 C62x 的一倍。

l 数据结构支持 8bit 的运算操作。尤其适应于 8bit 图像信号的处理。

l 在 C62x 系列 DSP 指令基础上增加了一些新的指令。例如增加了 GF 域的乘法, 一次可以实现 4 个 GF 域的乘法, 为无线通信的 RS 编译码提供快速实现。

l 内部嵌入各种应用软件, 包括 Viterbi 译码、RS 译码、回音抵消、图像压缩等。

1.1.4 OMAP 系列

开放式多媒体应用程序平台 (OMAP, Open Multimedia Applications Platform) 是 TI 公司推出的专门支持第三代 (3G) 无线终端应用而设计的应用处理器体系结构。该处理器结合了 TI 公司的 DSP 处理器核心以及 ARM 公司的 RISC 架构处理器, 成为一款高度整合性的片上系统 (SOC, System of Chip), OMAP 处理器平台提供了语音、数据和多媒体所需的带宽和功能, 可以极低的功耗为高端 3G 无线设备提供极佳的性能。OMAP 嵌入式处理器系列包括应用处理器及集成的基带应用处理器, 目前已广泛应用于实时的多媒体数据处理、语音识别系统、互连网通信、无线通信、PDA、Web 记事本、医疗器械等领域。

OMAP5910 是 OMAP 系列的最新成员, 它采用独特的 MCU+DSP 双内核架构, 把高性能低功耗的 DSP 核与控制性能强的 ARM 微处理器结合起来, 具有集成度高、硬件可靠性和稳定性强、速度快、数据处理能力强、功耗低、开放性好等优点。

OMAP5910 应用处理器双核结构的主要优势在于: 由于两个独立的组件来完成应用处理任务, 其中 MCU 负责支持应用操作系统并完成以控制为核心的应用处理; 而 DSP 则负责完成多媒体信号 (如音频、语音和图像/视频信号) 的处理。与单核结构相比, 双核架构的一个明显优势就是可以使操作系统的效率和多媒体代码的执行更加优化并延长电源寿命; 同时采用双处理器可以将总工作负荷进行合理划分, 从而降低时钟工作频率, 使系统的功耗降至最低, 成功地实现了性能与功耗的最佳场合。

OMAP5910 的软件结构建立在两个操作系统之上: 一是基于 ARM 的 Windows CE、Linux 等操作系统; 二是基于 DSP 的 DSP/BIOS。连接两个操作系统的核心技术是 DSP/BIOS 桥, 它是 OMAP5910 的关键。对于软件开发者来说, DSP/BIOS 桥提供了一种使用 DSP 的无缝接口, 允许开发者在通用处理器上使用标准应用编程接口访问并控制 DSP 的运行环境, 比如, 利用 TI 公司的集成代码开发工具 CCS (Code Composer Studio)。从开发者的角度来看, OMAP 好像仅用 GPP 处理器就完成了所有处理功能, 这样, 开发者就不需要为两种处理器分别编程, 这使编程工作大为简化。在 OMAP 体系结构下, 开发者可以像对待单个 GPP 那样对 OMAP 的双处理器平台进行编程。而在开发多媒体应用程序时, 也可以通过标准的多媒体应用编程接口使用多媒体引擎, 从而方便了应用程序的开发, 多媒体引擎对相应的 DSP 任务通过 DSP 应用编程接口 (DSPAPI) 使用 DSP/BIOS 桥, 最后由 DSP/BIOS 桥对数据、I/O 流和 DSP 任务控制进行协调。OMAP 支持 Symbian OS (tm)、Linux、Microsoft Windows CE 3.0

和.NET 以及 Palm OS 等操作系统。

1.2 DSP 理论和算法概述

数字信号处理是利用计算机或专用处理设备,以数值计算的方法对信号进行采集、变换、综合、估值和识别等加工处理,以达到提取信息和便于应用的目的。数字信号处理在理论上所涉及的范围极其广泛。在数学领域,微积分、概率统计、随机过程、复变函数等都是数字信号处理的基本工具,网络理论、信号和系统等均是它的理论基础。在学科发展上,数字信号处理又和最优控制、通信理论、故障诊断等紧紧相连,近年来又成为人工智能、模式识别、神经网络等新兴学科的理论基础之一,其算法实现(无论是硬件还是软件)又和计算机学科及微电子技术密不可分。因此可以说,数字信号处理是把经典的理论体系作为自己的理论基础,同时又使自己成为一系列新兴学科的理论基础。

国际上,一般把 1965 年快速傅立叶变换(FFT, Fast Fourier Transform)的问世作为数字信号处理这一新兴学科的开端。在这 40 余年的发展中,数字信号处理自身已基本形成一套较为完整的理论体系。这些理论一般统称为经典数字信号处理算法,其主要内容如下。

- (1) 信号的采集, A/D (模/数转换) 技术、采样定理、多采样率、量化噪声分析等。
- (2) 离散信号的分析, 时域和频域分析、各种变换技术、信号特征的描述等。
- (3) 离散系统分析, 系统的描述、系统的单位抽样响应、转移函数及频率特性等。
- (4) 信号处理中的快速算法, 快速傅立叶变换、快速卷积、快速相关等。
- (5) 信号的估值, 各种估值理论、相关函数与功率谱估计等。
- (6) 信号滤波技术, 各种数字滤波器的设计和实现。
- (7) 信号的建模, 最常用的有 AR、MA、ARMA、PRONY 等模型。
- (8) 信号处理中的特殊算法, 如抽取、插值、奇异值分解、反卷积、信号重构等。
- (9) 信号处理技术的实现, 包括软件实现和硬件实现。
- (10) 信号处理技术的应用。

自 20 世纪 80 年代以来,随着电子技术的高速发展,尤其是移动通信、无线通信和卫星通信的广泛使用,推动了很多新的数字信号处理的进一步应用和改进,同时也产生了一些较新的数字信号处理算法,这些算法一般称为现代数字信号处理算法。现代的数字信号处理算法一般包括现代滤波方法(维纳滤波、卡尔曼滤波、陷波理论、自适应滤波等)、现代谱估计方法、高阶谱估计方法、小波变换、非均匀采样、混沌理论等,现代数字信号处理算法已经逐渐应用于各种信号处理领域。例如,自适应滤波器应用于回音抵消,现代谱估计方法应用于微弱信号检测,小波变换应用于图像压缩,非均匀采样应用于高频信号采样,混沌理论应用于保密通信和传感技术领域等。

现代数字信号处理算法一般都比较复杂,从算法仿真到 DSP 应用都需要有很深的理论基础知识和实际应用经验。很多现代数字信号处理算法的应用都固化在特定的芯片内,用户直接调用该算法就可以实现数字信号处理,有些固化的算法甚至不需要用户做任何调用就可以直接使用。例如, C6x 系列 DSP 中的 C6414 处理器集成图像压缩和传输算法, C54xx 系列 DSP 中的 C54CST 集成有回音抵消算法等。

根据应用方向，DSP 广泛应用于以下系统和信号处理中。

(1) 控制类，包括仪器仪表、数据采集、函数发生、信号发生、自动驾驶、机器人控制、磁盘控制、马达控制等。

(2) 语音信号处理类，包括语音编码、语音合成、语音识别、语音增强、语音邮件、语音储存、语音去噪等。

(3) 图像信号处理类，包括数字电视、可视电话、数字相机、图像编解码器、图像压缩解压缩、图像信号采集传输、图像存储、图像识别、图像监控、超声波成像检测、电子地图、图像去噪、图像增强、动画、机器人视觉等。

(4) 通信信号处理类，包括有线、无线、移动以及卫星通信信号处理。主要有蜂窝电话、调制解调器、蓝牙产品、数字电话、IP 电话、全球定位导航系统、卫星电话、电话会议、ATM 电话、智能天线等。

华清远见