



基于 MATLAB 平台的 DSP 嵌入式应用程序设计的研究

张德龙, 刘海东, 卢福永

(冶金自动化研究设计院, 北京 100071)

[摘要] 随着 DSP 的广泛应用及 DSP 产品复杂度的提高, 传统的 DSP 嵌入式应用系统设计方案面临许多困难。文章介绍了新的设计方案, 以 T 的 DSP 为例, 研究了基于 MATLAB R2009B 版本的 DSP 嵌入式应用程序综合开发平台、设计流程以及相关技术。研究表明, 新的设计方案具有难度更小、开发周期更短、开发成本低、可移植性好等优点, 且便于多人协作完成任务, 完全能够满足当前 DSP 系统的性能要求, 是解决传统设计方案困境的重要途径。

[关键词] MATLAB; RTW; CCS; DSP; 嵌入式程序

[中图分类号] TH867

[文献标识码] B

[文章编号] 1002-1183(2010)02-0014-04

Research on DSP Embedded Application Programming Technology Based on MATLAB Software Platform

ZHANG De-long, LIU Hai-dong, LU Fu-yong

(Automation Research and Design Institute of Metallurgical Industry, Beijing 100071, China)

Abstract As application of DSP is becoming popular and DSP product is more complex, traditional design approach of DSP embedded applications has faced many difficulties. A new design idea is introduced. Taking T DSP families as an example, integrated development platform, design work flow and related techniques of DSP embedded application based on MATLAB R2009B release has been studied. Results show that the new design solution has advantages of more little difficulty, shorter development cycle, lower development cost, entirely transplantable ability and so forth. Beside, it is convenient for team cooperation to fulfill design task and absolutely meets performance requirement of current DSP system. Therefore, the new design solution is an important approach to overcome difficulties faced by traditional one.

Key words MATLAB; Real-Time Workshop; Code Composer Studio; DSP; embedded application

高效、低风险地进行产品设计及科学研究是每个科技工作者的愿望。近年来, DSP 的性能飞速提高, 应用范围不断扩大。同时, 激烈的市场竞争要求更低的产品开发成本; 急剧变化的产品需求, 多样、复杂的新产品结构及功能, 使产品研发难度激增。相应地, 硬件平台的更新换代较以往更快, 产品的生命周期越来越短, 对嵌入式 DSP 软件可移植性提出了更高的要求。总之, 巨大的市场风险要求产品的方案设计、系统实现以及测试等工作并行运作, 给传统的 DSP 系统设计方案带来严重挑战^[1]。

在 MATLAB 软件平台上开发嵌入式 DSP 应用程

序可以解决传统设计方案面临的困难。MathWorks 公司推出的 MATLAB 软件, 主要包含 MATLAB 和 Simulink 两大部分, 其中有多多个工具箱 (Toolbox) 和模块集 (Blocksets) 广泛应用于技术计算、控制系统设计、信号处理和通信、图像处理、测试和测量等领域。从概念到实现, 从理论科学研究到产品研发, MATLAB 的应用不仅极大地提高了工作效率, 也给传统的工作方式带来了变革。结合 MATLAB 软件中的嵌入式 MATLAB (Embedded MATLAB)、Simulink、RTW (RTW Embedded Coder)、Embedded DE Link 和 Target Support Package 以及开发 DSP 应用程序的集成

[收稿日期] 2009-10-14

[作者简介] 张德龙 (1980-), 男, 山东临沂人, 冶金自动化研究设计院在读硕士研究生, 从事 DSP 在工业自动控制中应用的研究。

开发环境（如用于 TI 的 Code Composer Studio 集成开发环境）构建的 DSP 软件系统综合开发平台，采用基于模型的嵌入式应用软件设计理念，包括算法设计及仿真、代码及项目生成、代码验证以及在线调试等在内的系统研发任务可以一气呵成，极其便于 DSP 嵌入式软件开发^{[2][3]}。

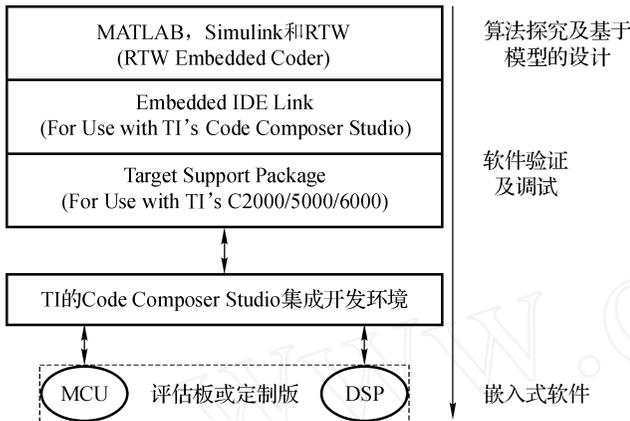


图 1 基于 MATLAB 的 DSP 应用程序开发平台图

本文以 TI 的 DSP 为例，结合 MATLAB R2009B 版本以及 CCS3.3 版本，详细介绍基于 MATLAB 和 Simulink 产品嵌入式 DSP 应用程序开发的流程以及主要产品的功能特点。

1 相关产品及其功能

1.1 Real-time Workshop (RTW) / RTW Embedded Coder

RTW 是 Simulink 的重要组成部分，是 Simulink 代码生成的基础。程序员开发算法的 Simulink 模型，或以嵌入式 MATLAB 语言开发的算法，应用 RTW 技术，整个算法模型或单个子系统可以生成符合 ANSI/ISO 标准的 C 代码，根据系统目标文件（System Target File）选项指定的目标系统，生成的代码能够运行在相应的微处理器或实时操作系统上。RTW 还能将生成独立的 C 代码编译成可执行的程序，用于算法的开发和测试。生成的代码还可用于许多实时的和非实时的应用程序中，包括加速仿真、快速原型以及硬件在环测试（hardware-in-the-loop testing）。用 Simulink 模块及内置的分析工具可调节或检测生成的代码，或者，在 MATLAB 及 Simulink 环境之外运行代码并与之交互。

Real-time Workshop Embedded Coder 扩展了 RTW 代码生成的功能，扩展的这些功能对嵌入式软件开发尤为重要。使用 RTW Embedded Coder 附加产品，不仅可以使 RTW 技术的各个方面，还可以生

成清晰、高效的专业技术水平级代码。

1.2 Embedded DE Link

Embedded DE Link 的功能是将 MATLAB、Simulink 和 DSP 嵌入式软件的集成开发环境联接起来。通过 Embedded DE Link，可以生成、编译、测试以及优化将部署到用于原型研制或实际产品中的嵌入式代码。Embedded DE Link 自动完成调试、项目生成以及运行在嵌入式处理器或集成开发环境（DE）提供的指令集模拟器上的目标代码验证等任务。此外，可以在 MATLAB 和 Simulink 中创建测试工作台（test bench），用于处理器在环测试方式（Processor-in-the-Loop testing）验证手写代码及生成的代码。

Simulink 中有四个处理器支持库，分别对应于 Embedded DE Link 支持的四个集成开发环境：Altium 的 TASKING，Analog Devices 的 VisualDSP++，Green Hills 的 MULTe，以及 Texas Instruments 的 Code Composer Studio。在 MATLAB 平台上可以开发以上四个制造商相关 DSP 系列产品的应用程序。

Embedded DE Link/For use with TI's CCS 专门针对 TI 的 DSP 系列产品，它与 RTW 及 RTW Embedded Coder 联用，能在 Simulink 中以图形化方式创建的算法模型顺利地转换为 CCS 中完整的项目（projects）文件，并能进一步编译成在嵌入式处理器上可执行的实时独立程序。所生成项目不仅包含生成的应用程序的 C 代码，还有嵌入式软件架构需要的初始化、调度以及处理器实时执行的应用程序代码的管理。硬件平台改变时，只需要改变目标选择模块中处理器及开发板的相应参数，即可重新生成适合新硬件平台的嵌入式 C 代码，几乎不需手动改写代码，具有极强的可移植性。Embedded DE Link 主要功能有：

(1) 用 MATLAB 调试 CCS 环境中的项目

MATLAB 与 CCS 集成开发环境的自动接口（Automation Interface），仅与 MATLAB 单独使用（不用 Simulink），即应用 MATLAB 语言编写脚本文件，自动调试和分析 CCS 中的项目，在 MATLAB 环境中察看运行时的数据并通过 MATLAB 改变目标板上运行程序的参数。Embedded DE Link 支持所有 CCS 支持的 T 处理器，接口包含两种方式：调试模式（Debug Mode）和 RTDX 模式。

(2) 与 Simulink 联合仿真

应用 Embedded DE Link 和 RTW Embedded Coder，可以将 MATLAB 和 Simulink 的算法运行在目标处理器或集成开发环境提供的指令集仿真器上、仿真模型作为测试工作台进行联合仿真。算法部署到目标



平台，PL仿真功能可以让开发者验证算法代码，而不必手工搭建一个嵌入式测试平台。

(3) 用 RTW 进行项目生成和代码优化

项目生成 (Project Generator) 使用 RTW 以及 RTW Embedded Coder 将 Simulink 模型生成完整的 CCS 项目。这些产品生成应用程序的 C 源代码，并根据需要包含汇编代码以及链接描述文件。应用 RTW Embedded Coder，可以在 MATLAB 支持的 C2000/C55x/C6000 系列的 DSP 上生成代码并进行 PL 测试。RTW 从 MATLAB 和 Simulink 模型生成与目标无关的算法 ANSIC 代码，与 RTW 联用时，Embedded DE Link 为算法代码添加上实时的嵌入式框架代码，包括在目标处理器上实时运行的必备调度程序和中断处理机制。Embedded DE Link 还添加处理器专用的优化表，自动将 ANSIC 代码尽可能地替换为优化的内部对象，减少手工修改代码，提高代码执行效率。

对于 MATLAB 及 Simulink 不能生成应用程序的项目及代码的处理器，RTW 仍然支持，但必须手工完成外设软件集成及项目创建的工作。

1.3 Target Support Package

Target Support Package 用于将 MathWorks 产品生成的实时程序代码部署到嵌入式微处理器、微控制器以及 DSP 上。它使外围设备和实时操作系统与用 Simulink 模型、Stateflow 流程图以及嵌入式 MATLAB 语言子集结合起来，不必手写底层驱动程序和运行时代码。合成的可执行程序可以被部署到嵌入式硬件上，用于目标板上快速原型、实时性能分析以及现场生产。

Target Support Package/For Use with TI's C2000, C5000, C6000 模块集分别支持 TIC2000 系列，C5000 系列以及 C6000 系列的 DSP。MATLAB 对 TI 的 DSP 支持主要有以下几个方面：

一是开发板级的支持。如 Avnet S3ADSP, DM6437, C5510 DSK 和 C6713 DSK, 不仅支持 DSP 芯片及片上资源，还支持板上外设，能直接生成专用的驱动程序，将模型生成的代码直接运行在目标板上。

二是对 DSP 芯片级的支持。除了上面列出的特定硬件开发板，也支持使用 C2000、C55xx 以及 C6000 处理器的定制开发板 (custom boards)。对定制开发板的支持需要使用 Embedded DE Link 和 Texas Instruments Code Composer Studio adapter。只要采用 CCS 支持的 DSP 芯片，MATLAB 均能支持。内核支持库 (Core Support library) 提供输入/输出、通信以及访问 DSP 外设或板上外设的模块，比如 CPU Timer 和

Hardware Interrupt 模块。但板上外设的驱动程序需要用户自己开发，集成到模型中，在编译时一同转化为项目的代码。

三是提供 TI 某些 DSP 专用的优化算法库，如 C28x 的优化模块 C28x Qmath 库等，QMath 库可以通过 Simulink 的对话框修改这些模块的参数，生成高效优化的代码。

再者就是用于 MATLAB 平台和 CCS 集成开发环境之间的联系，如 C2000 系列的 RTDX 以及 Host SCI Blocks。对选定的处理器系列支持片上外设和板上的外设以及实时操作系统。

1.4 Code Composer Studio (CCS) DE

CCS DE 是用于 TI DSP、微处理器和应用处理器的集成开发环境，包含了一整套用于开发和调试嵌入式应用程序的工具。CCS DE 包含适用于每个 TI 器件系列的编译器、源代码编辑器、项目开发环境、调试器、优化器、仿真器以及许多其它的功能。CCS DE 提供的单用户界面能使用户完成应用程序开发流程的每一步。CCS 主要部分为：

- (1) CCS 代码生成工具；
- (2) CCS 集成开发环境；
- (3) DSP/BDS 插件程序和 API
- (4) RTDX 插件、主机接口和 API

2 实现思路

在 MATLAB 平台上设计嵌入式 DSP 实时应用程序的步骤，以算法模型开始，添加并配置目标选择模块 (Target Reference block)，设置仿真参数，编译模型，在处理器上运行生成的代码。从算法设计到验证、从概念到代码实现的整个环节，所有的重点落在方案的验证及算法开发上，代码开发的工作变得相当简单。

2.1 设置代码生成的工作环境

首先必须配置好代码生成的软件环境。Embedded DE Link 要求特定版本的第三方工具和相关软件。用函数 checkEnvSetup 为开发板或处理器检查并配置 Embedded DE Link 和 Target Support Package 环境。例如，要列出 C6713 DSP 需要的第三方工具和相关软件，在 MATLAB 命令窗口中运行：

```
checkEnvSetup ( 'ccs', 'C6713', 'list' )
```

回显信息如下 (视工作需要，某些列出的必要工具和软件在具体的任务中未必需要)：

- (1) CCS (Code Composer Studio)
- Required version: 3.3.80.11
- Required by : Embedded DE Link 4.0



Required for : Automation and Code Generation

(2) CGT (Code Generation Tools)

Required version: 6.1.4

Required by : Embedded DE Link 4.0

Required for : Code generation

(3) DSP/BDS (Real Time Operating System)

Required version: 5.32.04

Required by : Embedded DE Link 4.0

Required for : Code generation

配置系统需求的软件环境, 将 checkEnvSetup 函数中的 “list” 选项, 换成 “setup”, 重新运行。该选项列出开发板或处理器的系统要求并将其和当前软件环境进行对比, 帮助配置软件环境以满足系统要求。

2.2 设计算法并进行仿真

在 Simulink 平台下开发算法模型, 通过仿真验证算法模型是否能实现设计目标。在这种开发方案中, 该部分工作是所有工作的重点。

2.3 添加目标选择模块 (Target Preferences Block)

所创建模型需要添加目标选择模块以生成针对特定 TI 处理器的嵌入式实时代码。通过目标选择模块, 选择 TI 的 DSP 型号, 定义存储器分配表, 分配代码段和数据段。每个模型有且只有一个目标选择模块。为模型添加目标选择模块之后, 在参数配置选项中, 会出现 Embedded DE Link 选项, 用以配置运行时选项、项目选项、代码生成选项以及诊断选项等。同时, 在 RTW 选项中, 系统目标文件被设定为用于 TI CCS 的 ccslink_ert.tlc。

2.4 配置目标选择模块

通过目标选择模块设置开发板和处理器的参数, 如开发板参数、存储器配置参数、段参数以及片上外设参数等:

(1) 开发板 (Board): 设置处理器的类型、CPU 时钟频率以及开发板等相关参数;

(2) 存储器 (Memory): 设置器映像及配置参数;

(3) 段 (Section): 用于分配不同的代码段, 如编译程序、DSP/BDS, 以及自定义的段;

(4) 外设 (Peripherals): 设置 C280x 和 C281x 处理器外设的运行参数。

具体配置参数根据不同的开发板及 CPU 型号而有所差别。设置的参数在代码生成及项目生成时被转换为相应的代码。

2.5 设置 Simulink 的配置参数

Embedded DE Link 提供某些配置参数是模型仿真配置参数的一部分, 根据具体任务需要进行必要的修改和调整。

2.6 编译模型

Embedded DE Link 创建项目并编译该项目, 装载可执行程序到目标处理器, 然后运行。在 CCS 中打开源文件, 或者通过生成的 HTML 格式报告, 可以查看生成的代码。

2.7 其他工作

根据需要进行必要的代码验证及代码优化等工作, 确保生成代码能正确执行并给出预期结果, 并进一步优化代码, 提高代码执行效率。

3 结论

研究表明, 基于 MATLAB 软件平台的 DSP 嵌入式程序设计技术, 充分利用 MATLAB 科学计算软件的强大功能, 以图形化、基于模型的组态式建模, 结合软件仿真及软硬件相结合的仿真方式对算法的正确性进行验证, 快速高效地生成直接运行在目标开发板上的嵌入式实时 C 代码独立程序, 并可在 MATLAB 环境下通过 DSP 开发环境实时地调试目标板上运行的程序以及改变相关参数。这种开发方案的意义还在于代码生成的快捷高效, 有利于软件系统的升级和针对硬件平台的移植, 系统易于维护。采用这种设计方案, 能够很好地解决目前产品研发中面临的很多困难。

[参考文献]

- [1] 苏奎峰, 吕强, 常天庆, 等. TMS320X281X DSP 原理及 C 程序开发 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- [2] 卢小锦, 曾岳南. 基于 Matlab/Simulink 的 TMS320F2812 代码开发 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2009, 2: 79 - 81.
- [3] 段国强, 陈月云. MATLAB 辅助 DSP 设计的研究与实现 [J]. 微计算机信息, 2007, 23, 7 - 2: 130 - 132.

[编辑: 谢永善]

《工业计量》杂志网站开通, 欢迎网上投稿!