

## DSP 多级自举加载技术在 IMA 系统 SPM 模块中的应用

刘可

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

**摘要:** 为了在模块化综合集成航空电子(IMA)系统信号处理模块(SPM)中实现应用程序的动态加载和代码更新,基于现有的 DSP 二级引导流程,引入 DSP 多级自举加载技术,能够按照系统要求配置功能处理单元,支持数十种信号处理功能程序的存储和运行。目前该技术已在一系列航空电子工程项目和产品中使用,应用程序动态加载和代码更新稳定可靠。

**关键词:** 模块化综合集成航空电子; 信号处理模块; 动态加载; 代码更新

**中图分类号:** TN911 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)06-0077-04

## Application of Multi-Level Bootloading Technology of DSP in Signal Processing Module in IMA System

LIU Ke

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

**Abstract:** To accomplish dynamic configuration and code updating of application programs on signal processing module in integrated modular avionics system, and based on current two-level bootloading process, a multi-level bootloading technology for DSP is employed to dynamically configure processing unit on system's commands to store and perform dozens of digital signal processing programs. Currently, the technology has been widely used in a series of avionic electronics equipments and supports stable and reliable dynamic configuration and code updating of application programs.

**Key words:** integrated modular avionics; signal processing module; dynamic reconfiguration; code updating

### 0 引言

TI 公司 TMS320C6000 系列 DSP 在各个行业领域的电子产品中得到了广泛应用。在这些应用中,最常见的 DSP 自举模式设置是 ROM 自举,即 DSP 自带的片上自举加载程序使用直接存储器访问控制器,以单帧数据块传输方式将挂在 EMIF 总线上的片外 ROM 中一定量的代码和数据拷贝到内存中,拷贝完成后从内存地址 0 开始执行<sup>[1]</sup>。由于 ROM 自举所能搬移的代码尺寸有限(620X/670X 拷贝 64 kB,621X/671X/64X 拷贝 1 kB)<sup>[2]</sup>,不能满足现今 DSP 应用程序规模日渐增大的需求,为此,TI 公司为开发者提供了一种解决方案,即次级自举加载程序(secondary bootloader)<sup>[3]</sup>。次级自举加载程序是用户自己设计的自举代码,通常使用汇编语言,编译后一般不超过 1 kB(620x/670x 的次

级自举加载程序编译后不超过 64 kB),驻留在 DSP 片外 ROM 中。DSP 自举时,片上自举加载程序(可视为初级自举加载程序)将次级自举加载程序拷贝到内存中并执行。次级自举加载程序负责将应用程序的主体部分(代码段和已初始化数据段)搬移到 DSP 内存中并跳转到应用程序起始处开始执行。通过这个过程,较大的 DSP 应用程序可以被加载和运行。

模块化综合集成航空电子是当前航电体系结构发展的最高阶段<sup>[4]</sup>。IMA 体系架构的硬件资源与软件资源均采用模块化设计,系统通过对软件和硬件资源进行配置及重构来实现各项功能线程<sup>[5]</sup>。在 IMA 系统中,信号处理模块通过加载不同的应用程序和配置参数来实现不同的数字信号处理功能<sup>[6]</sup>。DSP 是 SPM 模块功能处理的核心器件,也是应用程序动态加载和代码更新的主控器。动态加载是指信号处理模块按照系统指令要求为功能处理单元加载不同的应用程序,代码更新则是指信号处理模块接收系统下发的应用程序代码并固化在本地非易失性存储器中。受限于较小的代码规模,

收稿日期:2014-08-25

修回日期:2014-09-16

作者简介:刘可(1978—),男,四川南充人,硕士,工程师,研究方向为航空电子设备高性能通用数字信号处理平台的开发和应用。

DSP 次级自举加载程序实现应用程序动态加载和代码更新的难度较大,更大的问题是难以支持系统功能的扩展。因此,需采用一种基于 TMS320C6000 系列 DSP 的应用程序多级自举加载技术以满足系统需求。

### 1 多级自举加载基本原理

DSP 多级自举加载技术的基本原理是在已有的初级自举加载程序、次级自举加载程序之上增加一层自举加载程序,即三级自举加载程序(third-level bootloader)。三级自举加载程序的主要任务是完成应用程序的动态加载和代码更新。跟前两级自举加载程序一样,三级自举加载程序也保存在 DSP 片外 ROM 中。DSP 自举过程中,次级自举加载程序将三级自举加载程序复制到 DSP 内存中并跳转到其起始处开始执行。三级自举加载程序根据默认设置或者系统指令将 ROM 中的应用程序代码搬移到 DSP 内存中,在对代码进行校验确认无误后跳转到应用程序入口执行。DSP 三级自举加载的基本流程如图 1 所示。

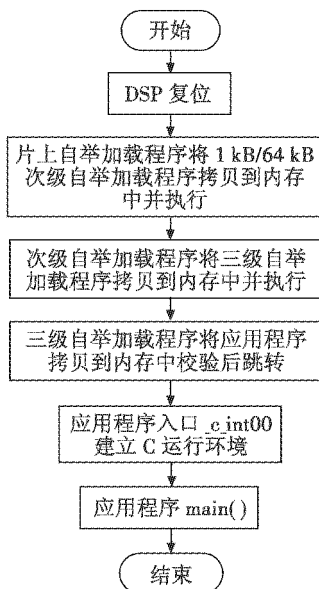


图 1 DSP 多级自举加载流程图

Fig. 1 Flow chart of multi-level bootloading for DSP

### 2 多级自举加载技术应用

#### 2.1 SPM 模块硬件架构

根据航空标准化体系结构联合组织(ASAAC)技术标准,IMA 系统 SPM 模块硬件架构的主要部分是功能处理单元(PU)、网络接口单元(NIU)、模块支持单元(MSU)、大容量存储器等<sup>[7]</sup>。PU 单元包括 DSP 和 FPGA。NIU 单元可以是 DSP 内部集成的总线接口,如 TMS320C6455 配备的 RapidIO 接口<sup>[8]</sup>,用于与系统交换功能数据和控制命令。MSU 单元可以选用 CPLD 或

小容量 FPGA 实现。大容量存储器包括 DSP 片内和片外的 ROM 和 RAM。图 2 为 SPM 模块简化框图。

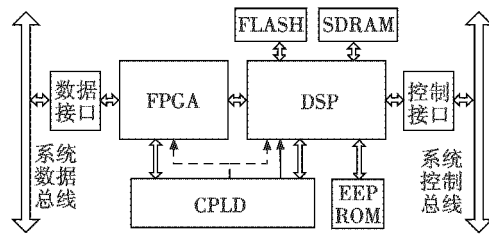


图 2 SPM 模块简化框图

Fig. 2 Simplified block diagram of SPM

#### 2.2 应用程序动态加载流程设计

系统需要 SPM 模块动态加载应用程序时,首先通过控制接口向 DSP 发送动态加载指令。DSP 当前运行的应用程序接收到该指令后,将指令中包含的加载操作参数析出后保存在 CPLD 中,然后通过 CPLD 发出 DSP 复位信号,启动 DSP 自举加载流程。DSP 依次运行片上自举加载程序、次级自举加载程序和三级自举加载程序。三级自举加载程序调取 CPLD 中保存的加载参数以确定从 FLASH 存储器中哪一部分地址空间读取用户程序代码。FPGA 可以视作 DSP 的外设,所以 FPGA 先加载,DSP 后加载。用户程序 FPGA 代码通过 CPLD 中的适配逻辑界面写入 FPGA 配置接口,FPGA 在数据加载正确完成后自动启动配置流程。此后,三级自举加载程序将用户程序 DSP 代码直接写入 DSP 内存,校验正确后跳转执行。在跳转执行应用程序前,三级自举加载程序通过控制接口将应用程序动态加载操作结果上报系统。动态加载流程如图 3 所示。

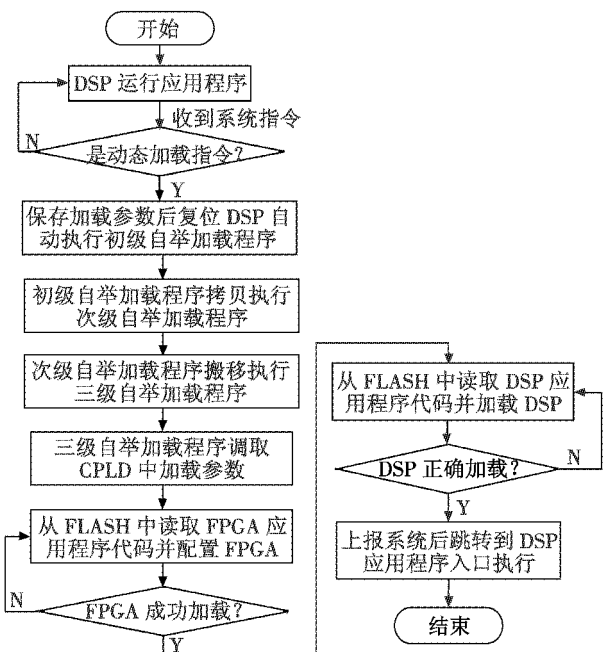


图 3 应用程序动态加载流程图

Fig. 3 Flow chart of dynamic configuration of application programs

### 2.3 应用程序动态加载过程中 SPM 模块与系统功能同步问题

SPM 模块应用程序动态加载实质上是信号处理功能重构的过程<sup>[9]</sup>,这个过程必然伴随着 IMA 系统其他部分工作状态的改变,涉及到的电路模块可能有射频信道模块、网络交换模块(NSM)和系统控制模块(SCM)等。为了确保应用程序动态加载后系统正常运行,必须考虑 SPM 模块与系统的功能同步问题,在动态加载流程中需有相应的操作步骤和通信协议设计。

首先,系统应与 SPM 模块约定信号处理功能重构所需时间,即从系统指示 SPM 停止运行当前的功能到 SPM 上报系统开始执行新加载功能这个过程的耗时。SPM 模块通常具备多个信号处理通道,在功能重构时段中,系统认为 SPM 当前信号处理通道不可用。其次,SPM 模块当前运行的应用程序在接收到功能重构指令之后、触发 DSP 多级自举加载之前,需将有价值的功能参数、数据和命令格式等信息保存在 DSP 片外 ROM(FLASH 或 EEPROM)中,以备后续功能恢复使用。最后,SPM 完成应用程序动态加载后应即刻与系统进行必要的握手,以此确定其他电路模块需具备的协同工作状态,并为系统与 SPM 之间的实时控制操作建立硬件和软件通路<sup>[10]</sup>。

### 2.4 应用程序代码更新流程设计

SPM 模块在动态加载流程中读取的 DSP 和 FPGA 应用程序代码全部存放在本地大容量 FLASH 存储器中。单板调试时 DSP 可挂接仿真器,在 PC 机 CCStudio 开发环境中将保存在本地硬盘上的 DSP 和 FPGA 应用程序代码固化到 FLASH 内。在整机维护阶段,系统可通过控制接口向 SPM 模块 DSP 发送应用程序代码更新指令。DSP 当前运行的应用程序接收到该指令后,将指令中包含的更新操作参数解出并保存在模块支持单元中,然后通过模块支持单元发出 DSP 复位信号,启动 DSP 自举加载流程。DSP 依次运行片上自举加载程序、次级自举加载程序和三级自举加载程序。三级自举加载程序首先读取 CPLD 中保存的更新操作参数,以确定将向 FLASH 中哪一部分地址空间烧录用户程序代码,然后通过数据接口接收系统下发的 DSP 和 FPGA 应用程序代码数据。应用程序代码以数据帧的形式分包传送,每一帧数据内含该包数据的 CRC 校验值。SPM 模块先将接收到的应用程序代码数据暂存在 SDRAM 存储器中,校验无误后再将代码烧写到 FLASH 中并将操作结果上报系统。应用程序代码更新流程如图 4 所示。

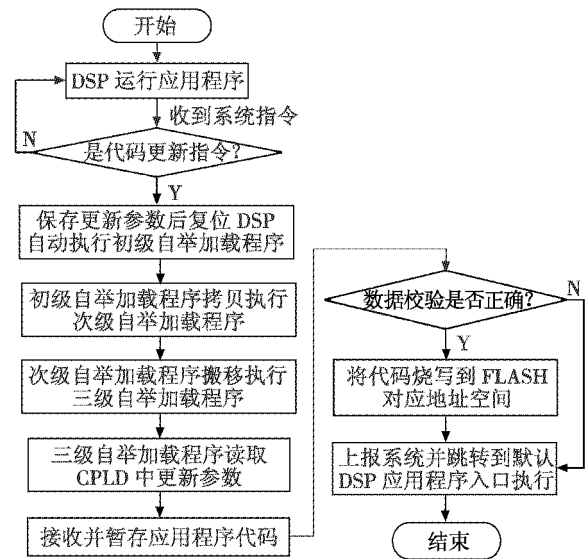


图 4 应用程序代码更新流程图

Fig. 4 Flow chart of code updating of application programs

## 3 结束语

本文介绍了一种基于 TMS320C6000 系列 DSP 的应用程序多级自举加载技术。借助这项技术,SPM 模块不仅能够方便地实现应用程序的动态加载和代码更新,而且为系统功能的扩展奠定了良好的基础,可支持数十种数字信号处理功能程序的存储和运行。开发者可以灵活选用 TI 公司 TMS320C6000 系列各型 DSP 以及配套的外部 ROM 和 RAM 存储器,通过选择 DSP 内核时钟速率、EMIF 总线工作速度和存储器位宽等参数,来满足不同的系统规模、功能配置和加载时长要求。理论上,DSP 多级自举加载流程可延展为更多加载层级以满足应用需求,该技术目前已在一系列航空电子工程项目和产品中使用,动态加载和代码更新稳定可靠。

## 参考文献

- [1] Texas Instruments. TMS320C6414T/15T/16T datasheet [Z]. August, 2011.
- [2] Texas Instruments. TMS320C6000 tools: Vector table and boot ROM creation [Z]. April, 2004.
- [3] Texas Instruments. Creating a second-level bootloader for FLASH bootloading on TMS320C6000 platform with code composer studio [Z]. May, 2006.
- [4] 张凤鸣,褚文奎,樊晓光,等. 综合模块化航空电子体系结构研究 [J]. 电光与控制, 2009, 16(9): 47-51. (ZHANG F M, CHU W K, FAN X G, et al. Research on architecture of integrated modular avionics [J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(9): 47-51.)

- [5] 茅成. 综合通信导航识别系统中的多链路超短波通信的实现[J]. 电讯技术, 2009, 49(8):59-64. ( MAO C. Implementation of multi-channel UHF communication in the integrated CNI system [J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(8):59-64. )
- [6] 陈颖,苑仁亮,曾利. 航空电子模块化综合系统集成技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2013. ( CHEN Y, YUAN R L, ZENG L. The integrating technology of integrated modular avionics electronics system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013. )
- [7] 王运盛,陈颖. ASAAC 航空电子体系结构标准分析[J]. 电讯技术, 2007, 47(5):159-162. ( WANG Y S, CHEN Y. Analysis of ASAAC avionics standards [J]. Telecommunication Engineering, 2007, 47(5):159-162. )
- [8] Texas Instruments. TMS320C6455 fixed-point digital signal processor datasheet [Z]. August, 2011.
- [9] 陈颖. 从复杂系统观点看模块级综合集成航空电子结构[J]. 电讯技术, 2009, 49(4):98-102. ( CHEN Y. The integrated modular avionics electronic architecture from complex system views [J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(4):98-102. )
- [10] 钟瑜. 通用信号处理中的硬件抽象层连接设计[J]. 电讯技术, 2011, 51(6):46-50. ( ZHONG Y. Design of hardware abstraction layer connectivity for general signal processor [J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(6):46-50. )

(上接第 30 页)

算时用到的路径长度都小于实际得到的长度,而方法 3 得到的弹道长度最精确。

#### 4 结束语

特定的落角可以大大提高空地导弹的精确打击效果,本文对一种具有落角约束的空地导弹最优导引律进行了更深入的讨论。提出了对于特定的落角如何选择导弹的初始指向角度,从而避免制导指令被限幅。提出了两种更精确的剩余飞行时间估算方法,考虑了弹道曲率对估计精度的影响。仿真结果验证了所得结论的有效性。

#### 参 考 文 献

- [1] 刘大卫,夏群利,崔莹莹,等. 具有终端位置和角度约束的广义弹道导弹成型制导律[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(12):1408-1413. ( LIU D W, XIA Q L, CUI Y Y, et al. Generalized trajectory shaping guidance law with both impact position and angle constraints [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(12):1408-1413. )
- [2] 蔡洪,胡正东,曹渊. 具有终端角度约束的导引律综述[J]. 宇航学报, 2010, 31(2):315-323. ( CAI H, HU Z D, CAO Y. A survey of guidance law with terminal impact angle constraints [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(2):315-323. )
- [3] 孟克子,周获. 过载指令约束下的导弹导引律设计[J]. 兵工学报, 2014, 35(9):1419-1427. ( MENG K Z, ZHOU D. Design of missile guidance law subject to acceleration command constraint [J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(9):1419-1427. )
- [4] GAMELL P. Guided weapon control system [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2003:297-364.
- [5] KIM T H, LEE J I, TAHK M J. Time-to-go polynomial guidance laws with terminal impact angle/acceleration constraints [C]//Preprints of the 18th IFAC World Congress, Milano, Italy, 2011:3915-3919.
- [6] JEON I S, LEE J I, TAHK M J. Homing guidance law for cooperative attack of multiple missiles [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2010, 33(1):275-280.
- [7] ZHANG Y A, MA G X. A biased PNG law with impact time constraint for antiship missiles [C]//Chinese Guidance, Navigation and Control Conference, Beijing, China, 2012:874-878.
- [8] SHIN H S, CHO H, TSOURDOS A. Time-to-go estimation using guidance command history [C]//Preprints of the 18th IFAC World Congress, Milano, Italy, 2011:5531-5536.
- [9] 张友安,马国欣. 大前置角下比例导引律的剩余时间估计算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(11):1409-1414. ( ZHANG Y A, MA G X. Time-to-go estimation algorithm for the proportional navigation guidance law with a large head angle [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(11):1409-1414. )
- [10] 徐兴元,林青松,蔡远利. 具有落角约束的空地导弹最优导引律[J]. 计算机仿真, 2015(6):61-64. ( XU X Y, LIN Q S, CAI Y L. Optimal guidance law with angle-of-fall constraint for air-to-surface Missile [J]. Computer Simulation, 2015(6):61-64. )