

# 浅谈嵌入式操作系统在航天领域中的应用

朱亚杰,王劲强,石志成,杨明明

(北京空间机电研究所,北京 100076)

**摘要:** 基于对国内星载软件现状的分析,阐述了引入嵌入式操作系统对系统性能的影响,并介绍了几种典型的嵌入式实时操作系统(RTOS),总结了在航天领域中选用操作系统的几点原则,最后通过比较4种典型的嵌入式实时操作系统,探讨了航天领域中选用哪种实时操作系统较适合。

**关键词:** 星载软件;嵌入式操作系统;RTOS

**中图分类号:** TP316.2

**文献标识码:** A

## Discussion on Application of Embedded Operating System in Aerospace

Zhu Yajie, Wang Jinqiang, Shi Zhicheng, Yang Mingming

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100076, China)

**Abstract:** The paper illustrates the impact on system performance of using embedded operating system based on analyzing the status of domestic on-board software. Then, it introduces several kinds of typical embedded real-time operating systems (RTOS) and also summarizes some rules to select a suitable embedded operating system in aerospace. Finally, it explores which RTOS will suit well in aerospace by comparing four typical embedded RTOS.

**Key words:** on-board software; embedded operating system; RTOS

## 引言

目前,国内星载计算机大多不使用操作系统,主要使用针对单任务或者少量任务的星载软件,规模相对较小,功能相对简单,并且软件设计大多使用汇编语言和C语言,设计方法仍然停留在控制循环阶段。由于星载应用软件直接控制硬件,因而软件对硬件的依赖非常强。硬件系统简单变化,例如发生I/O地址的差异、时序的差异、数据锁存的差异等,应用软件就需要作出大量改动,甚至重新编写<sup>[1]</sup>。当前每一个星载型号几乎都需要重新开发相关的软件。在已有星载软件研制中,若干软件设计问题已被发现,有的在某一型号中花费了大量精力去解决,但在其他型号中因元器件的变动未能予以使用,仍需要重复解决。这样浪费了大量人力物力,星载软件的开发周期长,可靠性差,复用度也低。

引入嵌入式操作系统能够有效地解决上述问题。嵌入式操作系统把CPU时间、I/O、定时器等资源包装起来,留给应用软件开发一个标准的系统调用(API),这样便于对硬件进行操作,从而增强了系统的稳定性和可靠性;还把任务管理调度、任务间通信、内存管理等系统功能以函数调用的方式提供给用户,使用户能够将精力放在应用

程序的开发上,有助于星载软件的通用化和模块化设计,缩短软件产品的研制周期,提高星载软件的可靠性<sup>[2]</sup>。而且它支持多任务,使得程序开发更容易,易于功能的扩展和维护,提高了软件复用度。但引入操作系统的同时也会增加星上RAM/ROM的存储空间和星载计算机额外负荷,还可能出现由多任务引起的死锁、竞争和优先级翻转等问题。不过随着星载存储器和CPU性能的提高、价格的降低和软件算法的改进,这些问题会逐步得到解决<sup>[3]</sup>。

## 1 几种典型嵌入式RTOS

POSIX 1003.1标准为实时操作系统(RTOS)下了一个简单的定义:实时操作系统是能够在有限的响应时间内为应用提供所要求级别服务的操作系统<sup>[4]</sup>。RTOS具有截止时间控制、规模小、中断时间短、进程切换快、中断屏蔽时间短、定时器多是ms或ps级等重要特性。

目前世界上有许多嵌入式实时操作系统,其中最典型的包括:VxWorks、QNX、eCos、RTEMS、VRTX、LynxOS、Nucleus Plus、PalmOS、WinCE、pSOS、RTLinux、 $\mu$ C/OS-II等。下面着重介绍在航天领域较为热门的几款嵌入式实时操作系统。

### (1) VxWorks

VxWorks 是美国 Wind River 公司于 1983 年设计开发的目前功能最全的、独立于处理器的一种商业化嵌入式实时操作系统。大多数的 VxWorks API 是专有的,采用 GNU 的编译和调试器。VxWorks 以其良好的可靠性及持续发展能力、卓越的实时性、高性能的内核及友好的用户开发环境而被广泛地应用在通信、军事、航空、航天等高精尖技术及实时性要求极高的领域中。它支持 x86、i960、SPARC、MIPS、PowerPC、Motorola MC68xxx 等型号众多的处理器,同时支持 RISC、DSP 技术。

VxWorks 及其开发工具已被 NASA/JPL、ESA、NASDA 等航天机构及 Lockheed Martin、Aerospatiale Matra、Hughes Aircraft、Honeywell、SAAB 等著名公司用于火箭、航天飞机、卫星控制系统、导弹等,在国际空间站、火星探路者等重大航天项目中得到应用<sup>[3]</sup>。成功案例主要有:深空探测器(Deep Space One)和 X-38 宇航员返回舱;2004 年 1 月 3 日在火星登陆的“勇气”号和“机遇”号火星探测器上使用了 VxWorks 5.3.1;NASA 喷气推进实验室在探测 Wild 2 号彗星的星际太空船上用 VxWorks 负责太空船的轨道控制及星际尘埃和彗星物质的收集等关键任务。

### (2) RTEMS

RTEMS (Real-Time Executive for Multiprocessor System)是由美国军方支持的 OAR 公司(On-Line Applications Research Corporation)研制的一种源码公开的实时多任务嵌入式系统,但其军用版本(用 Ada 语言实现)是不公开的。RTEMS 的设计采用了对象、构件等先进技术,支持 POSIX 1003.1b 和 ITRON API,具有很高的实时性、稳定性,可配置性和可扩充性很强,具有很高的可重用性,并且支持多处理器结构,可以与第三方软件构成功能强大的应用平台<sup>[5]</sup>。它支持 ix86、Power PC、SPARC、MIPS、M68K 等 15 个 CPU 系列,还计划为 NEC 的 V850 和 Texas Instruments 公司的 C32 处理器提供支持。

RTEMS 操作系统最初用于“爱国者”地空导弹系统,美军在 RTEMS 的基础上对控制软件进行了升级和改进,使其具备了反导能力。NASA 的戈达德航天中心至今还有项目在支持 RTEMS 的应用开发<sup>[6]</sup>。欧洲航天航空局采用 RTEMS 开发了空间应用系统 ERC32。中国空间技术研究院的容错计算机上也使用该系统。

由于其开源性,目前在全球已有不少用户,无论是航空航天、军工,还是民用领域,RTEMS 都有着极为广泛的应用,其性能毫不逊色 VxWorks。

### (3) eCos

eCos(Embedded Configurable operating system)是由 RedHat 公司于 1997 年开发研制的源码开放的实时操作

系统,采用微内核结构,具有执行效率高、占用空间小、实时性能优良和可扩展性强、配置灵活等特点。由于其内核可配置性,设计理念比较新颖,结构优美,使得 eCos 被广泛地运行在不同处理器和开发平台之上。

eCos 很好的可移植性是通过硬件抽象层(HAL)来实现的,现在已经支持的目标环境包括 Motorola 68K、Cold-Fire、PowerPC、MIPS、X86、ARM、SPARC 等。开发平台可以是 Unix、Windows 或 Linux,开发环境也是采用 GNU 系列开发调试工具。

### (4) $\mu$ C/OS-II

由美国人 Jean J. Labrosse 先生编写的一种源码公开、占先式的多任务实时操作系统。它基于优先级,总是让就绪的优先级最高的任务先运行,每个任务有互不相同的优先级(静态优先级)。绝大部分代码用 C 语言编写,CPU 硬件相关部分用汇编语言编写,代码量小,具有良好的编程风格,可移植性强,最小内核可编译至 2 KB,只需要 C 语言交叉编译器和汇编、链接工具就可以进行其应用程序的开发,所以它已经移植到了几乎所有知名的 CPU 上。目前, $\mu$ C/OS-II 已通过了美国航空航天局的认证,可用于飞行器、太空站等关键系统的开发。

上述 4 种实时操作系统中,VxWorks 是商用系统,提供很好的售后技术支持,性能也不错。后面 3 种都是源码开放的系统,在嵌入式系统中有大量的应用。后 3 种 RTOS 与 VxWorks 在任务切换时间与中断延迟时间两方面作比较,都具有良好的实时性,尤其是 RTEMS 的实时性能与 VxWorks 不相上下<sup>[2]</sup>。从任务调度机制、配套开软件包、稳定性等角度对它们进行比较分析,具体如表 1 所列。

## 2 嵌入式操作系统选型原则

对于航天系统来说,为了合理地调度多任务,管理和利用资源系统、系统函数,以及和专用库函数接口,必须选配嵌入式操作系统平台,这样才能保证程序执行的实时性、可靠性,减少开发时间,保证软件质量<sup>[7]</sup>。

因而,选择合适的嵌入式操作系统平台至关重要,同时也是一件复杂的系统工程。在航天领域中选择嵌入式操作系统除了遵循一般应用领域中的选型原则,还应该着重考虑以下几点。

### (1) 开源性

由于嵌入式操作系统的源码不公开会导致诸如对设备的支持、应用软件的移植等一系列问题,获得渠道与安全性无法确定,考虑到航天工程在军事战略方面的重要性和敏感性,要尽可能在航天领域选用开源嵌入式操作系统。

表1 典型嵌入式实时操作系统的比较

对比项目	VxWorks	RTEMS	eCos	$\mu$ C/OS-II
任务调度机制	优先级抢占式和优先级轮转	优先级抢占式	优先级抢占式	固定优先级抢占式
实时性	很高	很高	很高	很高
配套开发软件包	非常丰富	丰富	丰富	较少
硬件支持程度	能够支持 x86、i960、SPARC、MIPS、PowerPC、Motorola MC68xxx 等型号众多的处理器,同时支持 RISC、DSP 技术	支持 ix86、Power PC、SPARC、MIPS、M68K 等 15 个 CPU 系列,还计划为 NEC 的 V850 和 Texas Instruments 的 C32 处理器提供支持	支持 Motorola 68K、ColdFire、MIPS、PowerPC、X86、ARM、SPARC 等众多的处理器	几乎可移植到所有的 CPU,且许多移植程序可通过网络下载
开发费用	很高	很低	很低	很低
源码是否公开	否	是	是	是
稳定性	极高	高	高	高
内核大小	较大	小	小	小
适用范围	对稳定性、可靠性和实时性要求极高的航空航天、通信等关键领域	广泛用于在航空航天、军工及工控、医疗等领域	适合用在一些商业级或工业级的小型控制系统	适用性较广,尤其适合小系统的开发及实时系统教学

### (2) 稳定性与实时性

实时性能是嵌入式实时操作系统的一个重要指标。由于星载操作系统工作在对实时性要求很高的特殊环境中,这就要求所选的 RTOS 必须是强实时性操作系统。并且卫星一旦开始运行,由于其工作环境的特殊性,人不能过多地干预,因而要求嵌入式操作系统必须具有较高的稳定性。

### (3) 可移植性和硬件平台的支持

当进行嵌入式软件开发时,良好的可移植性是要重点考虑的问题。星载计算机是 RTOS 运行的硬件环境,其 CPU 型号多样,且不属于通用型的 CPU,配套的调试工具少。不同的型号任务、不同的研制单位采用不同的 CPU 型号,因此所选用的 RTOS 必须能直接应用在尽可能多的硬件平台上。若需移植,尽量选用移植工作量小的 RTOS,即要求 RTOS 具有良好的可移植性。

### (4) 固化代码和可裁减性

现在的星载计算机中大多采用 ROM 对操作系统和应用软件进行固化,这就要求星载 RTOS 必须是代码可固化的。

由于卫星系统应用目的的不同以及硬件资源的有限

性,所以星载操作系统必须能够根据不同的应用对操作系统进行不同的配置与裁减,去掉软件多余部分,简化相应的模块,做到量体裁衣。要求所选用操作系统必须具有良好的可裁减性。

### (5) 通信机制

任务间所选操作系统必须提供多任务间的快速且功能强大的通信机制。为了有效地共享不可抢占的资源或临界区,内核也要提供所需的同步机制<sup>[2]</sup>。

## 结 语

VxWorks、RTEMS、eCos、 $\mu$ C/OS-II 都是强实时操作系统,支持多种处理器开发平台,有各自的特点、应用范围。结合选型原则,这里给大家提供一些参考性建议。

源码不开放的商用 VxWorks,由于源码对用户不透明,可裁减性差,安全性也不确定。即使它在卫星控制系统、导弹、国际空间站等重大航天项目中有多次成功应用经历,出于安全性考虑,国内航天领域一般不使用这种商用操作系统。

RTEMS、eCos、 $\mu$ C/OS-II 都是源码公开、性能稳定且非商业应用而无需付费的实时操作系统。①  $\mu$ C/OS-II 虽已通过了美国航空航天局的认证,可用于飞行器、太空站等关键系统的开发。但开发套件和技术支持方面还比较欠缺,软件包的功能还不是特别强大,离实际应用还有很大的差距,有待于进一步的研究。② eCos 目前主要被应用在一些商业级或工业级的小型控制系统中,由于采用微内核结构,具有执行效率高、占用空间小、实时性能优良和可扩展性强、配置灵活等特点,在国内星载计算机上已有初步应用,也证明是比较成功的,有较好的应用前景。③ RTEMS 由于具有开放源代码的优势,以及能与最优秀的商业 RTOS 相媲美的性能,并经过十多年的验证,有多次成功上天应用的经历,代码质量和可靠性都很高,最适合应用到航天领域中。但它也有一定的局限性,RTEMS 是比较复杂的 RTOS,至少需要 60KB 左右的内存空间才能使系统运转起来<sup>[6]</sup>,因此对硬件要求相对苛刻一些。

### 参考文献

- [1] 郭坚,付连芳,武莹,等.基于 8051 单片机的星载软件中断服务程序设计[J].计算机测量与控制,2007,15(8):1093-1095.
- [2] 贺颜博.星载嵌入式实时操作系统的研究和实现[D].上海:同济大学,2008.
- [3] 刑荣欣,叶卫东.几种嵌入式实时操作系统的性能分析[C]//2003 年全国单片机及嵌入式系统学术年会论文集.北京,全国单片机及嵌入式系统学术年会,2003.
- [4] L Gauthier, S Yoo, A Jerreya. Automatic generation and targeting of application-specific operating systems and embed-

- ded system software[J]. IEEE Transactions on Computer - Aided Design of Integrated Circuits and Systems (TCAD), 2001, 20(11): 1293 - 1301.
- [5] 孔祥营, 李轶. RTEMS 研究及工程应用[J]. 指挥控制与仿真, 2006, 28(5): 111 - 114.
- [6] 李飞, 王岩飞. 实时操作系统在星载计算机中的应用[J]. 电子技术应用, 2004(10): 21 - 24.
- [7] 谢浩, 张健. 基于 SPARC V8 的嵌入式星载计算机技术[J]. 微计算机信息, 2008(5): 36 - 38.
- [8] Ahmed Karim Ben Salem, Slim Ben Othman, Hedi Abdelkrim. RTOS SoC embedded control applications [C]// Proc. of 2008 International Conference on Design & Technology of Integrated System in Nanoscale Era, 2008.
- [9] A Dean. Efficient Real - Time Fine - Grained Concurrency on Low - Cost Micro - controllers [J]. IEEE Micro, 2004, 24(4): 10 - 22.
- [10] 王永恒, 廖明宏. 小卫星星载操作系统内核的设计[J]. 计算机工程, 2002, 28(11): 111 - 113.
- [11] 段星辉, 华建文, 代作晓, 等. 一种提高星载软件可靠性的开发方法[J]. 计算机工程, 2009, 35(12): 73 - 75.
- [12] Luis Alejandro Cortés, Petru Eles, Zebo Peng. Quasi - static scheduling for multiprocessor real - time systems with hard and soft tasks [C]// Proc. of International Conference on Real - Time and Embedded Computing Systems and Applications, August 2005: 422 - 428.

朱亚杰(硕士研究生), 主要研究方向为航天遥感信息处理; 王劲强(研究员), 主要研究方向为航天遥感总体技术; 石志成(高级工程师), 主要研究方向为航天遥感电子工程与控制技术; 杨明明(助理工程师), 主要研究方向为航天遥感嵌入式软件设计。

(责任编辑: 高珍 收稿日期: 2013-01-14)

整个系统运行时, 摄像头采集数据发送给 ARM 端, ARM 端通过编解码引擎调用底层通信机制 DSPlink 将原始数据一帧一帧地发送给 DSP 进行 H. 264 编码, 同时也通过视频驱动将原始数据在 LCD 端显示。一帧视频数据编码完成后, DSP 将压缩的帧返还给 ARM, 写入到本地存储器中。

## 结 语

在掌握编解码引擎技术的基础上, 选择 OMAP3730 平台, 利用 DSP 和 ARM 的各自优势进行应用开发, 对提高应用性能和用户体验有很好的帮助。同时, 达芬奇开发套件提供了丰富的应用接口函数和完善的底层通信机制, 能够有效地缩短应用的开发周期。

编者注: 本文为期刊缩略版, 全文见本刊网站 [www.mesnet.com.cn](http://www.mesnet.com.cn)。

## 参考文献

- [1] Texas Instruments Incorporated. xDAIS - DM User Guide, 2007.
- [2] Texas Instruments Incorporated. Codec Engine Application Developer User's Guide(sprue67d), 2007.
- [3] Texas Instruments Incorporated. Codec Engine Server Integrator's Guide, 2006.
- [4] 毕厚杰. 新一代视频压缩编码标准—H. 264/AVC[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.
- [5] Texas Instruments Incorporated. H. 264 Baseline Profile Encoder on DM6446, 2006.

冯柯(硕士研究生)、杨斌(教授), 主要研究方向为单片机与嵌入式系统及其应用。

(责任编辑: 高珍 收稿日期: 2012-01-04)

## ST 扩大基于统一平台的广播机顶盒产品阵容

意法半导体(STMicroelectronics, 简称 ST)推出新的地面、有线、IP、网络视频(OTT)以及卫星高清机顶盒系统级芯片(SoC)。新产品 STiH253 全功能数字视频广播芯片扩大了意法半导体具有互动数字录像(DVR)功能的解决方案组合, 集成一个 DVB - T2 解调器, 让设备厂商能够研发高集成度的地面机顶盒。另一款新增的机顶盒芯片 STiH271EL 特别适用于只需入门级机顶盒功能且不影响视频质量的中低端市场。

意法半导体机顶盒系统级芯片产品线的核心是一颗性能强化的处理器引擎, 该处理器集成丰富的功能, 可提高终端产品的设计效率。这个稳健的处理器引擎让运营商能够使用低成本存储器的同时, 满足最新的低功耗目标。意法半导体的机顶盒芯片可支持全部高清广播和多媒体编解码、多模和 IP 标准, 以及最新的数据安全和内容保护标准。

意法半导体芯片扩大了厂商研发高清机顶盒、PVR、互联网协议(IP)客户端和支持网络电视服务、信息频道和网络视频(OTT)、游戏、回看电视和社交网络的双模高清机顶盒的机会。新产品丰富了意法半导体现有的通用 IP(STiH207)、有线/地面高清(STiH273), 以及卫星高清(STiH237、STiH239)机顶盒系统级芯片的产品阵容。产品引脚和软件全系兼容, 让原始设备厂商能够在多个客户/运营商之间优化设计资源。

中国知名机顶盒厂商九州电器有限公司业务总监黄伟表示: “意法半导体机顶盒系统级芯片全系兼容对于九州是一个重要优势, 这种统一型号的设计缩短了我们的研发周期, 让我们能够同时专注于卫星、有线和地面的多模市场。”