

引用格式:王卫东,邱海涛,张伟栋,等. IMA2G 技术研究与实现[J]. 电光与控制, 2019, 26(12):80-83. WANG W D, DI H T, ZHANG W D, et al. Research and implementation of IMA2G techniques[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(12):80-83.

## IMA2G 技术研究与实现

王卫东<sup>1,2</sup>, 邱海涛<sup>1</sup>, 张伟栋<sup>1</sup>, 范超<sup>1</sup>

(1. 航空工业西安航空计算技术研究所, 西安 710065; 2. 机载弹载计算机航空科技重点实验室, 西安 710065)

**摘要:** IMA1G 已经广泛应用于军民航空电系统, IMA2G 时代即将到来。与 IMA1G 相比, IMA2G 在功能、功耗、体积、重量以及成本各方面都有绝对的优势, IMA2G 技术已引起国内外学术界和产业界的高度重视, 相关研究领域也已取得了许多研究进展, 但仍然存在许多挑战性的课题。首先深入论述了国外 IMA2G 相关关键技术领域发展, 然后介绍了笔者的 IMA2G 研究方案、研究成果以及测试验证情况, 最后指出了下一步的研究工作。

**关键词:** 航空电子系统; IMA1G; IMA2G; 多核处理机; 时间关键; 重构技术

**中图分类号:** V243 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.12.016

## Research and Implementation of IMA2G Techniques

WANG Wei-dong<sup>1,2</sup>, DI Hai-tao<sup>1</sup>, ZHANG Wei-dong<sup>1</sup>, FAN Chao<sup>1</sup>

(1. Xi'an Aeronautics Computing Technique Research Institute, AVIC, Xi'an 710065, China;

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Airborne and Missile-borne Computer, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** IMA1G has been widely applied in military and civil avionics systems, and the era of IMA2G will come soon. IMA2G has overwhelming superiority over IMA1G in such aspects as function, power consumption, volume, weight and cost. The academia and industry at home and abroad attach great importance to IMA2G. Considerable progress has been made in relative research areas, but there are still many challenging issues. This paper gives a detailed illustration of the progress of IMA2G in key technology fields in foreign countries, and then introduces our research scheme, achievement, test and validation on the IMA2G. Finally, further research directions are given.

**Key words:** avionics system; IMA1G; IMA2G; multi-core processor; time-critical function; reconfiguration technique

### 0 引言

作为第一代综合化航电系统 IMA1G 标志的 F35 航电系统诞生已经 16 年, 随后采用 IMA1G 技术的空客 A380、波音 B787 以及军用运输机 A400 等飞机相继投入运营, 标志着 IMA1G 技术已经获得广泛应用。其间航空技术发展的需求, 以及相关学科如软件技术、网络技术、处理器技术以及基础理论的发展, 持续推动了 IMA 技术的发展, 并逐步促成了 IMA2G 诞生。目前, UIUC、伯克利和 CMU 等国外著名大学, Honeywell, Lockheed Martin, Rockwell Collins, Wind River, THALES 以及中国航空工业集团有限公司等国内外大公司围绕 IMA2G 相

关技术都开展了深入研究工作, 取得了一系列的研究成果, 其中, 美国 ARINC 公司完成了 ARINC 653 标准修订<sup>[1]</sup>, 美国 Wind River 公司开发了操作系统 Wind River 653 3. X<sup>[2]</sup>, 我国研发了自主知识产权操作系统天脉 2 多核版本, 支持多核处理器在 IMA2G 系统中的应用。欧盟在第七框架计划中安排的 SCARLETT 项目<sup>[3-4]</sup>, 对 IMA2G 技术领域进行了全面深入研究。本文重点分析了国外 IMA2G 方面的研究工作, 特别是欧洲 SCARLETT 项目的研究工作, 简述了笔者在 IMA2G 方面的研究方案、部分工作进展, 并介绍了所开发的 IMA2G 系统实际运行情况和评测结果, 最后指出了需进一步开展的研究工作。软件支撑工具是 IMA2G 技术发展的基石, 限于篇幅, 另文论述。

### 1 国外技术发展

#### 1.1 欧洲 SCARLETT 项目简述

SCARLETT 是欧盟在第七框架计划中安排的面向

收稿日期: 2018-09-25

修回日期: 2019-02-19

基金项目: 中国航空工业集团公司联合创新基金(6141B05060703)

作者简介: 王卫东(1964—), 男, 安徽太和人, 博士, 研究员, 研究方向为机载核心处理系统和网络技术。

下一代综合化航电系统的研究项目,参加单位包括达索、空客、THALES 等几乎所有欧洲主流的航空制造商、部分大学以及 Wind River, Green Hill 等著名美国公司,该项目的目标是攻克 IMA2G 技术,达到如下目的:增加航空电子设备客户满意度、提高航空飞行器研发、生产和维护过程中的效费比、提供等级不断增长的可靠性和信息安全性以及减轻航空运输过程中的环境污染。

SCARLETT 技术创新<sup>[3-9]</sup>包括如下内容。1) 提出了分布式模块化电子设备(Distributed Modular Electronics, DME)概念,将航电系统输入输出和航电应用处理相分离,减少通用模块类型,实现分布式安装,提高航电设备对飞机机体安装空间的适应性,减轻航电设备和连接电缆重量。2) 支持不断发展的高性能处理器应用。基于多核处理器的高性能通用处理模块应达到与单核处理器同样的实时确定性,支持安全关键航电应用的综合。3) 提供平台级服务的抽象。IMA1G 实现了应用与平台之间的相互独立,但还不能满足不同域的配置。SCARLETT 以现有标准为基础和起点,在标准平台 API 中增加新功能、改进现有配置形式,以便反映不同的角色,简化增量式认证。4) 提供重构机制。该机制是 SCARLETT 的核心创新点,通过备份资源管理实现资源在航电系统平台级的动态分配而不是在子系统级的静态分配。该机制可达到使用最小数量的备份资源使飞行器达到最大的可用性。其研究工作包括:地面重构和空中重构;预先验证的重构和基于算法的重构的比较;监管下的重构和自动重构的比较;备份模块在多功能间的共享;功能的平稳降级。5) 综合过程和工具。研究内容包括:通用的软件开发和调试工具;平台仿真工具;应用预确认工具;平台配置和重构工具;平台动态行为分析工具;自动化测试工具。6) 封装技术选择。实现面向多种飞机的可复用通用模块。7) 制订相关标准。

## 1.2 时间关键航电应用在 IMA 中的综合

在现代飞行器航电系统中,飞行器制动、转向、飞控、高升力、客舱压力等为典型的时间关键(Time Critical, TC)功能,这类任务的主要特点是周期短、速率高、延迟短、最大动态响应时间短。如何将这类任务综合到 IMA 系统中,SCARLETT 对此提出 3 种方案,研究了 3 种方案的结构复杂性、动态响应特性、可靠性和容错能力。在 SCARLETT 项目中,波兰热舒夫工业大学基于 AFDX 体系架构<sup>[6]</sup>,采用 CPM(Core Processing Module) + REU(Remote Electronics Unit)体系结构,验证在 CPM 和 REU 间分配控制算法,实现俯仰舵面控制,调度框架实现了 200 Hz 的调度速率,可以满足飞行控制任务需求。应当指出,SCARLETT 项目中飞行器主干网络为第一代

AFDX,采用基于网络的综合方法,这种综合方法简单,易于实现复杂分布式网络航电系统综合。如果采用基于任务的综合方法,上述调度速率可进一步提高,但是综合方法相对较复杂。另外,如果主干网络采用千兆 AFDX,仍采用上述综合方法,调度速率也可进一步提高。总之,基于 AFDX 架构可以实现时间关键航电应用在 IMA 系统中的综合。

## 1.3 多核处理器在 IMA 中的应用

IMA1G 的理论基础是分区计算理论,基本假设是一个分区内的航电应用软件修改、运行和故障都不会影响另一分区内的航电应用运行。多核处理器由于多个核并行运行,核间干扰使分区计算理论基本假设不再成立,经典的强分区计算理论必须发展以便适应多核处理器以及众核处理器技术的发展。多核应用模式包括 AMP(Asymmetrical Multi-Processing),BMP(Bound Multi-Processing)和 SMP(Symmetrical Multi-Processing)<sup>[7-9]</sup>,目前商用多核操作系统对上述 3 种模式都提供支持,且这 3 种运行模式在航电产品中都曾应用。但多核应用的难点是如何克服多核处理器应用中存在的干扰,包括访问共享存储器的冲突、存储器带宽共享的干扰、共享 cache 的竞争以及 IO 资源的冲突。为消除或抑制上述干扰,使得航电应用的 WCET(Worst Case Execution Time)保持基本恒定,同时使 ACET(Average Case Execution Time)接近 WCET,使每个核特性等价于独立运行的单个处理器。目前,多核模型的研究十分深入,但由于多核处理共享资源维度增加、多核处理器多样性以及 IMA 实时应用的复杂性,许多模型以及解决方法都有特定限制条件和应用假设,使得获得广泛认可的多核实时计算理论研究成果尚不多。因此,多核模型的正确性和适应性、基于多核的 IMA 调度设计和实时响应分析、基于多核的 IMA 综合方法和支撑工具技术以及多核处理平台验证与确认等都需进一步研究,这些是目前的研究热点。此外,目前多核处理器在 IMA 中应用的许多研究工作都是基于 COST 处理器,美国伯克利大学面向多核实时应用开发了专用 DDR 控制器,减小多核访存干扰的研究方案值得借鉴,目前以 IP 为基础开发面向特殊应用的专用处理器已经不是十分困难,F-22 航电系统的处理器曾经采用这种研制路线。

## 1.4 软件架构技术

一般飞机机载系统都拥有各自独立的开发需求和特定的供应商,这种开发模式存在很多缺陷:交货周期长、改进过程复杂、飞机平台间缺乏软硬件重用、开发成本高、对处理器新技术适应能力差等。由于任务设备和电子系统日益复杂,在向飞机系统中集成新的软

硬件时,所需的成本和时间也随之爆炸式增长,再加上额外测试与适航认证需求,这些都直接影响飞机新能力的部署。这些问题在美 F-35 研制过程中得到充分体现。

当今几乎没有一个军用标准是专门针对软件组件可重用性、可移植性提出的,而现有的商用软件通用运行环境(Common Operating Environment, COE)标准也不能完全适用于军机机载系统的开发要求。为此,未来机载能力环境(Future Airborne Capability Environment, FACE)<sup>[10]</sup>思想应运而生,它针对软件通用运行环境提出了一个统一的技术标准,用于推动机载软件可移植性与可重用性的发展,进而指导打造一个能够涵盖整个军用飞机制造行业的软件产品线。FACE思想的宗旨是在硬件计算平台上创建一个通用的软件运行环境,使应用软件(由FACE组件组成)在只受到很小影响的情况下实现在不同平台上的部署。

目前,FACE标准在欧洲A400军用运输机、Wind River VxWorks653 3.X商用操作系统等一系列国外机载产品中获得应用,相信将会成为一个强制性工业标准。在深入研究的基础上<sup>[11]</sup>,国内航电设备厂家也在逐步应用该技术标准。

### 1.5 动态重构技术

在IMA1G系统中,系统容错重构技术采用基于静态配置动态执行的重构模式,重构范围一般在子系统级,重构模式空间较小,配置易实现且易于验证。F-35以及F-22都采用该机制,欧洲相关标准也是采用该思想。在IMA2G中,要求实现整个航电平台级的重构,实现整个系统功能缓慢降级,达到免维修或推迟维修。由于重构模式空间大,其配置分析和验证工作量极大,比较适合采用基于算法的配置分析和验证操作,从而实现动态重构,这也是SCARLETT项目容错技术研究的主要内容<sup>[3-4]</sup>。目前,SCARLETT项目的动态重构技术研究完成了基于算法的动态重构以及基于ARINC653的程序与数据动态加载的验证工作,为在IMA2G航电系统中应用动态重构技术打下坚实基础。

### 1.6 DIMA 工程化技术

由于多核处理技术发展,目前一个多核处理器芯片可完成过去一台计算机整机完成的处理工作,这样采用DIMA(Distributed Integrated Modular Avionics)结构,即直接安装LRM(Line Replacable Module)成为可能,SCARLETT项目对DIMA LRM的要求是达到飞机间LRM模块互用。美国ARINC公司为支持DIMA安装方式制订了ARINC836<sup>[12]</sup>标准,该标准规定了下一代航空电子系统的安装方法、连接器以及环境适应性要求,用于代替现行ARINC600标准。相对于ARINC600,该标

准可使航电设备重量/体积减少40%,这对于飞行器设计具有重要意义。目前,ARINC836已经获得了世界主流航电厂家的大力支持,开发了系列结构件产品和连接器产品。

DIMA采用以LRM为基础的安装方式,LRM空间适应性极好,机体内空间利用率极高,该技术将会在航空、航天、兵器等嵌入式领域获得应用。但该结构自然散热效率较差,不适合工作环境温度高、高热流密度的电子设备。

## 2 部分研究工作简述

在航空基金支持下,笔者对面向IMA2G应用的综合核心处理技术进行了初步研究,主要研究工作包括:采用多核处理器,研制成功了面向IMA2G应用的综合核心处理机(Integrated Core Processor, ICP)平台;采用FACE架构,开发成功了IMA2G平台软件、应用软件和支撑工具以及天脉2操作系统多核版本;采用ARINC836标准,研制成功了新一代LRM结构体和安装框架,攻克了DIMA电气、散热、振动冲击以及结构与安装等DIMA工程化技术。

ICP处理节点体系架构如图1所示。

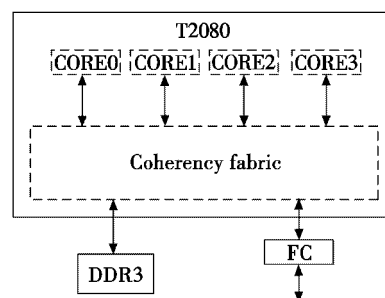


图1 处理节点体系架构

Fig. 1 Architecture of processing nodes

采用多核处理器T2080,最高主频为1.8 GHz,该处理器包含AltiVec unit,可完成计算密集型的数据处理、信号处理和图像处理。T2080处理器芯片包含4个E6500核,E6500核为双线程处理器,这样一片T2080处理器包含8个虚拟核。该处理器内核E6500向下兼容E600,在E600内核上开发的航电应用软件可无需修改直接重编译即可重用。考虑到双线程处理器在实时计算应用中的复杂性,为简化航电应用软件调度分析,重用已经开发的航电应用软件,本项目每个E6500内核仅使用一个虚拟核。处理节点输入输出接口采用冗余FC网络接口,FC网络具有宽优先级机制和高精度时间服务,支持强实时计算模型的实现以及航电系统综合化。

图1处理节点配置了8 GiB DDR3存储器,FC接口采用Xilinx A7 FPGA实现。

处理节点采用了优化的等价单核虚拟机模型。在存储器分配、存储器访问带宽管理以及高速缓冲存储器分配操作中,为提高信息安全性、支持强分区模型实现以及减小处理器核间干扰,存储器空间分配采用按属性分配机制,存储器带宽管理采取警管机制,高速缓冲存储器管理采取颜色—锁机制。

### 3 测试和验证

在借鉴国外多核系统验证工作的基础上<sup>[13-14]</sup>,采用可重用航电应用软件,对比测试同一航电应用在两个平台上的运行情况,实现本系统性能测试和验证。原航电处理平台处理器内核为 E600,主频为 1 GHz,FC 接口通信速率为 1 Gibit/s,操作系统为 Wind River VxWorks653 2.3。验证航电处理平台处理器内核为 E6500,主频为 1.6 GHz,FC 接口通信速率为 4 Gibit/s,操作系统为天脉 2 多核版本,由于该处理器内核 E6500 向下兼容 E600,所以不需修改航电应用软件,只需重新编译应用软件。可以将运行在原航电处理平台 4 个 E600 处理器核上的应用软件直接移植到本处理平台中,采用一个 CPU 一个核的移植方法,利用原系统的调度框架,处理能力尚有 0.75 的裕量,该指标已经接近处理性能理论计算值。近两年的运行表明,本系统稳定可靠,模型设计正确。

### 4 结束语

本文论述了国内外 IMA2G 技术发展以及笔者的研究工作,正像国外对 SCARLETT 项目评价那样,该项目“目标远大、富有挑战、道路可行、前景光明”,该评价同样适用于目前的研究工作。由于多核处理共享资源维度增加、多核处理器多样性以及 IMA 实时应用的复杂性,多核实时模型的正确性和适应性、基于多核的 IMA 调度设计和实时响应分析、基于多核的 IMA 综合方法和支撑工具技术以及多核处理平台验证与确认等都需进一步研究,这些是下一步的工作内容。

#### 参考文献

- [1] ARINC Specification 653P1-3. Avionics application software standard interface—Part1:required services[S]. Maryland: Aeronautical Radio, Inc., 2010.
- [2] VxWorks 653 3.0 multi-core edition[EB/OL]. [2019-10-10]. <http://www.windriver.com/products/product-overviews/VxWorks-653-product-overview-multi-core>.
- [3] FUCHSEN R. IMA NextGen: a new technology for the Scarlett program[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2010, 25(10):10-16.
- [4] BIEBER P, BRUNEL J, NOULARD E, et al. Preliminary design of future reconfigurable IMA platforms—safety assessment[C]//Proceedings of the 27th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2010:1-10.
- [5] HALLE M, THIELECKE F. Next generation IMA configuration engineering—from architecture to application[C]//Proceedings of the 34th Digital Avionics Systems Conference, 2015:6B2-1-6B2-13.
- [6] ROGALSKI T, SAMOLEJ S, TOMCZYK A. ARINC 653 based time-critical application for European SCARLETT project[C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2011:1-14.
- [7] AGROU H, SAINRAT P, GATTI M, et al. A design approach for predictable and efficient multi-core processor for avionics[C]//Proceedings of the IEEE/AIAA 30th Digital Avionics Systems Conference, 2011:7D3-1-7D3-11.
- [8] GATTI M, JEAN X, PAUTET L, et al. Ensuring robust partitioning in multicore platforms for IMA systems[C]//Proceedings of the IEEE/AIAA 31st Digital Avionics Systems Conference, 2012:7A4-1-7A4-9.
- [9] HAN S, JIN H W. Full virtualization based ARINC 653 partitioning[C]//Proceedings of the IEEE/AIAA 30th Digital Avionics Systems Conference, 2011:6C5-1-6C5-9.
- [10] The Open Group. Future Airborne Capability Environment (FACE™), Edition 2.1[S]. Burlington:The Open Group, 2014.
- [11] 陈峭东,邹杰,刘波,等. 从航空火力控制系统的发展看信息时代的火力控制[J]. 电光与控制, 2015, 22(2):1-6.
- [12] ARINC 836-2012. Cabin standard enclosures-Modular Rack Principle(MRP)[S]. Maryland: Aeronautical Radio, Inc., 2012.
- [13] FUCHSEN R. How to address certification for multi-core based IMA platforms: current status and potential solutions[C]//Proceedings of the IEEE/AIAA 29th Digital Avionics Systems Conference, 2010:3E3-1-3E3-11.
- [14] EFKEMANN C, PELESKA J. Model-based testing for the second generation of integrated modular avionics[C]//IEEE 4th International Conference on Software Testing, Verification and Validation Workshops, 2011:55-62.