

光学遥感微纳卫星在轨实时信息处理系统

李琳¹ 岳文振¹ 葛礼晖¹ 陈亮²

(1. 北京市遥感信息研究所, 北京, 100192; 2. 北京理工大学信息与电子学院, 北京, 100081)

摘要:总结了在轨实时信息处理技术的发展现状,分析了光学遥感微纳卫星在轨实时信息处理的迫切需求,进而阐述了光学遥感微纳卫星在轨实时信息处理技术应用限制条件,在此基础上提出了光学遥感微纳卫星在轨实时处理系统设计思路。面向几类典型应用探讨了光学遥感微纳卫星在轨实时信息处理系统设计方案,为光学遥感微纳卫星在轨实时信息处理技术应用提供参考。

关键词:在轨实时信息处理;微纳卫星;光学;遥感

中图分类号:V11 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2018)S1-0108-04

In-orbit Real-Time Information Processing System for Optical Remote Sensing Micro/Nano Satellites

LI Lin¹, YUE Wenzhen¹, GE Lihui¹, CHEN Liang²

(1. Beijing Institute of Remote Sensing Information, Beijing, 100192, China;

2. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, China)

Abstract: The authors summarize the development of the in-orbit real-time information processing (IORTIP) technique, and analyze the imperious demand of this technique for the optical micro/nano satellite used for remote sensing. The restriction conditions when the IORTIP technique is applied into the real optical micro/nano satellite system are also discussed, and a general system design frame is proposed. Furthermore, the paper discusses several design schemes for the IORTIP system in optical micro/nano satellites under some typical application scenarios, which can provide references for the prospective applications of the IORTIP technique in optical micro/nano satellites.

Key words: in-orbit real-time information processing (IORTIP); micro/nano satellite; optics; remote sensing

从 2013 年开始,全球小卫星发展呈现出爆发式增长,涵盖了通信广播、对地观测、深空探测以及科学与技术试验等多个领域。2017 年,全球共发射质量小于 500 kg 的小卫星 310 颗,其中质量在十、百公斤量级的微纳卫星 297 颗^[1-4],占同期入轨航天器总数的 67.5%。微纳卫星正以其独特的优势在导航、通信、遥感、测绘及海事等领域发挥重要

作用^[3-4]。同时,中国光学微纳卫星以其较为成熟的技术、较低的制造成本和广泛的应用取得快速发展。

随着光学微纳卫星在多个领域的应用,光学微纳卫星星上处理技术也受到日益重视^[5-7]。光学微纳卫星星上处理技术应用需求主要包括:(1)降低全系统运行成本,随着技术发展微纳卫星业务能力增

基金项目:国家自然科学基金(91638301)资助项目。

收稿日期:2018-03-23;**修订日期:**2018-05-30

通信作者:李琳,女,研究员,E-mail: thisisll@sina.com。

引用格式:李琳,岳文振,葛礼晖,等.光学遥感微纳卫星在轨实时信息处理系统[J].南京航空航天大学学报,2018,50(S1):108-111. LI Lin, YUE Wenzhen, GE Lihui, et al. In-orbit real-time information processing system for optical remote sensing micro/nano satellites[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(S1): 108-111.

强,时间和空间分辨率显著提升,通过在光学微纳卫星上采用实时信息处理技术可以显著降低数传速率,减小星地传输处理系统实现难度和成本,促进产业化发展;(2)提升最终用户应用体验,微纳卫星功能往往比较单一,通过在轨实时信息处理技术可以在星地数传系统中仅传输用户关心的有用数据,可缩短卫星信息应用回路时间,促进数据与信息产品的广泛应用;(3)提高卫星在轨使用效益,通过在轨实时信息处理技术可以减少星上无效数据,在有限存储容量约束下延长载荷工作时间、提高卫星载荷利用率。由于微纳卫星的处理资源、系统设计等方面与传统大卫星有着显著的区别,其对星上处理技术也提出了特殊要求。本文阐述了光学遥感微纳卫星在轨实时信息处理技术发展现状及特点,然后对其关键技术及应用模式进行详细的阐述。

1 发展现状分析

自 2000 年以来,以图像压缩、变化检测、特定目标检测以及目标分类等为代表的在轨实时处理系统已在美、欧、新等多个国家的卫星中应用,代表了光学遥感卫星重要的发展方向^[8-9]。同时,近年来各航天大国都在关注快速响应空间系统,以成本低廉、性能良好以及应用灵活的小卫星为手段,以较低成本实现对突发事件迅速反应,执行已开展或将开展的空间军事任务,满足各种任务需求。

星上处理器是在轨实时处理的核心,目前包括 DSP, FPGA, 专用 SoC, SPARC 以及 PowerPC 等高性能处理器以及在在轨处理中得到应用。例如:2007 年由美国 NASA、美国空军和海军联合开发了基于 Xilinx 系列 FPGA 的紧凑型、高性能的星上通用数据处理 & 控制 SpaceCube 系统,以满足高性能、通用化和小型化星上处理需求。同时,多核处理器是星上处理器新的方向发展,在 2010 年,美国 NASA 针对未来航天发展进行了研究发展规划,认为多核结构在实现可扩展计算上具有很大的潜力^[10]。

面对多种任务类型遥感数据在轨处理要求及设备小型化需求,在轨处理核心处理器的发展呈现多元化、多核并行化发展的趋势。同时,国外正在开展高性能商用器件抗辐照设计的研究,满足在轨实时信息处理系统对体积、重量和功耗的要求,不断提升单位功耗下在轨核心处理器的处理能力^[11]。

国外对在轨实时处理技术的研究已超过 20 年。其中,欧空局于 20 世纪 90 年代就开展了星上

实时处理技术的研究,于 1992 完成了芯片级产品开发,1995 年进行了板卡级开发,1999 年研制了星上实时处理系统(TOPAS 系统)。国外的军用设备生产商也开发了众多的星上实时信号处理平台。SEAKR 公司于 2002 年推出了其宇航级 CPCI/VME 系统平台;2006 年推出了 V4-RCC Virtex-4 FPGA 的宇航级信号处理平台。近年来,为了满足多源数据多任务处理需求,国外星上处理平台采用了模块化、可扩展设计,目前针对高性能在轨实时处理平台标准由最初的 VME 发展到 cPCI,最新国外提出了 SpaceVPX 标准。cPCI 是应用较广的在轨处理平台标准。

2 系统设计

星上处理与地面处理相比最大的难度在于在轨处理资源受限,而微纳卫星受限于其整体体积、质量、能源和成本,对星上处理技术应用提出了更加严苛的限制条件。所以微纳卫星星上处理技术更加注重需求与任务的分析,围绕微纳卫星的核心任务和有限目标,对在轨处理资源进行量化分析,建立从应用需求到在轨处理资源的映射关系。现有的典型光学遥感微纳卫星以可见光成像为主,其在轨应用限制主要体现在以下方面:

(1)质量、功耗和体积。有限的空间、质量、能源会限制处理系统形态的功耗和工作时间,进而约束系统的计算资源和存储资源。一般希望完成单一任务的在轨光学图像实时处理系统质量小于 10 kg,功耗小于 100 W,体积根据整星情况需要较好地适应性。

(2)计算资源。有限的计算能力会限制成像处理、AOI 区域检测、目标检测和目标识别等处理的准确性、时效性和复杂度。

(3)存储资源。存储资源会限制先验信息库的建立和更新,从而可能影响目标识别和信息生成能力。

光学微纳卫星在轨遥感数据实时处理面临处理量大、实时性强以及算法复杂,体积、质量和功耗严格约束,高低温、震动、热真空环境苛刻,为实现光学遥感微纳卫星在轨实时处理系统,需要从算法、处理器件/平台和算法高效实现 3 个方面进行设计,也需要从上述 3 个方面开展研究工作,给出技术途径,如图 1 所示。

2.1 在轨光学遥感图像实时处理算法设计

星上遥感信息实时处理算法设计主要包括 4 方面技术要点:(1)星上遥感数据处理算法复杂,普

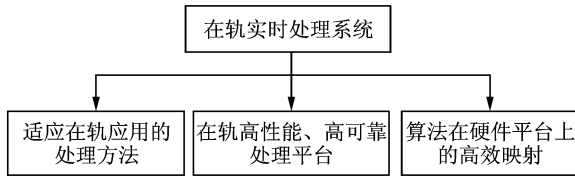


图1 在轨实时处理系统设计

Fig. 1 Design of in-orbit real-time information processing system

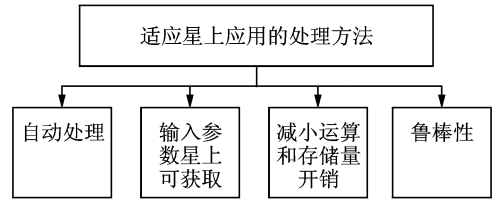


图2 在轨实时处理算法应考虑的因素

Fig. 2 Factors designing in-orbit real-time processing algorithms

遍基于像素级二维运算。从遥感数据处理算法角度,遥感信息处理算法复杂而且众多,许多算法都具有针对性,而不具有普遍性。因此,系统并行架构要充分考虑到上述星上遥感数据处理特点,以任务并行的方式,适应多种算法的复杂流程。(2)航天遥感信息处理算法具有数据有限相关性。所谓数据有限相关性是指数据处理过程中对于一段数据处理只需要依赖此数据相临的一些数据,而不是卫星一次下传的所有数据。特别是对于遥感图像处理都可以分景处理。这里的分景是指按照一定的规则对数据进行的分块处理,每一块数据可以称为一景。星上遥感信息处理算法普遍具有数据有限相关性是对星上遥感数据并行处理系统架构设计的重要依据。它使得处理系统可以将数据分块进行并行处理。(3)算法精度和星上处理适应性研究。即在已有的算法基础上充分考虑算法的实用化和工程化,与星上处理的应用紧密结合提高算法可用性。另外,对于需要人工干预的算法,进行自动流程设计,适用于星上自主运行。(4)针对星上处理资源受限的特殊需求,在保证算法精度的情况下,对已有的算法进行适应性改造。考虑系统需要兼容多种处理算法,因此要充分考虑算法的运算模块的共用性。

针对上述对在轨处理约束条件的分析,对算法应考虑的因素如图2所示。

目前可见光图像在轨实时处理算法应用成熟度分析如表1所示。

表1 在轨处理算法可行性分析

Tab. 1 Feasibility analysis of in-orbit processing algorithms

序号	处理内容	算法成熟度
1	全色船只检测	成熟
2	全色船只识别	基本成熟
3	红外舰只检测	基本成熟
4	大型建筑物检测	成熟
5	滑坡灾害检测	基本成熟

2.2 在轨环境约束下高性能、高可靠处理平台设计

在轨体积、重量和功耗等约束下,如何构建高性能、高可靠处理平台是需要解决的核心问题,也是可行性论证的关键。其中在轨处理平台需要考虑的因素有标准化、通用化、高效并行以及抗辐照等。

2.3 核心处理器选择与设计

目前包括 DSP, FPGA, 专用 SoC, SPARC 以及 PowerPC 等高性能处理器以及在在轨处理中得到应用。表2,3分别给出了国外典型抗辐照 DSP, FPGA 处理器发展情况。

国内在宇航级高性能处理器研究上,一方面在开展通用宇航级 DSP, FPGA 处理器的研发,另一方面针对在轨特殊应用正在开展高性能 SoC 处理器的研制。

表2 典型抗辐照 DSP 处理器

Tab. 2 Typical radio-resistant DSP processors

DSP 处理器	SMJ320 C40	ADSP 2106x	SMV320 C6701	SMV320 C6727	Tile64
生产商	TI	ADI	TI	TI	Tilera
处理能力	60Mflops	120Mflops	1Gflops	1.8Gflops	192BOPS
片内 SRAM	512 Kb	4 Mb	1 Mb	4 Mb	512 Mb
寻址空间	4 GB	1 GB	8 GB	15 GB	16 GB
功耗	1 W	1.5 W	2 W	4 W	15 W

表 3 典型抗辐照 FPGA 芯片(Xilinx 公司)

Tab. 3 Typical radio-resistant FPGA processors (Xilinx Corp)

型号	XQR2V3000	XQR4V5X55	XQR5VFX130
工艺	180 nm	90 nm	65 nm
规模(Gates)	3 M	5.6 M	13 M
片内 SRAM	1 728 Kb	4 176 Kb	10 728 Kb

在通用宇航级处理器研制方面,国内已经完成部分高速 DSP 和 FPGA 产品开发,但与现有的国内宇航级通用器件普遍性能较低,与国外相比差距还较大。

2.4 算法在硬件平台上的映射可行性

针对 4 种较为成熟的可见光在轨处理算法,以一幅 $M \times N$ 的大图为例,按照卫星 1 m 分辨率、15 km 幅宽观测能力, M 为 15 K, N 可取 4 K/s,估算所需的运算、存储量如表 4 所示。

表 4 各种算法运算存储量测算列表

Tab. 4 Computation and storage demand of various algorithms

序号	算法	操作次数/ (Gflops)	存储粒度/ GB
1	全色图像船只检测	4.5	0.5
2	全色图像船只识别	0.5	0.5
3	红外图像船只检测	5	2
4	全色图像大型建筑物检测	6	1
5	全色图像滑坡灾害信息提取	1.38	0.36

假设采用前典型 FPGA V6(315T) + DSP TS201 处理平台,计算上述典型应用下系统的规模如表 5 所示。

表 5 光学图像典型在轨处理资源分析

Tab. 5 Analysis of in-orbit processing resources for typical optical images

在轨处理功能	最小存储能力需求/GB	FPGA V6(315T)+ DSP TS201 处理节点数/个
全色图像机场检测	1	2
全色图像船只检测	0.5	2
红外图像船只检测	2	2
全色图像大型建筑物检测	0.5	1
全色图像滑坡灾害信息提取	0.5	1

通过设计,基于现有高性能处理器,针对典型载荷指标,完成光学目标处理系统功耗在 50 W,5 kg,满足一般可见光微纳卫星在轨处理的资源要求。

3 结束语

光学遥感微纳卫星发展迅速,在国土资源调查、减灾以及海事等多个领域均有广泛应用前景,也催生出各种各样的定制式应用需求,而在轨实时处理技术发展,特别是微电子技术、算法智能化技

术的发展,使得数据在轨实时处理成为可能,通过构建在轨实时处理系统,可大大提升遥感应用的时效性、便利性,进而促进遥感微纳卫星的广泛应用。

参考文献:

- [1] 石荣,李潇,邓科.微纳卫星发展现状及在光学成像侦察中的应用[J].航天电子对抗,2016,32(1):8-13. SHI Rong, LI Xiao, DENG Ke. Development situation of micro-nano satellite and its application in optical reconnaissance[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2016,32(1):8-13.
- [2] 马定坤,匡银,杨新权.微纳卫星发展现状与趋势[J].空间电子技术,2017,14(3):42-45. MA Dingkun, KUANG Yin, YANG Xinquan. Development actual state and trends of nano-satellite[J]. Space Electronic Technology, 2017,14(3):42-45.
- [3] KRAMER H J, CRACKNELL A P. An overview of small satellites in remote sensing[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008,29(15):4285-4337.
- [4] NOVOTNY L, HECHT B. Principles of nano-optics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [5] 张风丽,张磊,吴炳方.欧盟船舶遥感探测技术与系统研究的进展[J].遥感学报,2007,11(4):552-562. ZHANG Fengli, ZHANG Lei, WU Bingfang. Progress of ship detection technology and system based on remote sensing technology in European union[J]. Journal of Remote Sensing, 2007,11(4):552-562.
- [6] 毕福昆,高立宁,龙腾,等.结合视觉显著性引导与分类器融合的遥感目标检测[J].红外与激光工程,2011,40(10):2058-2064. BI Fukun, GAO Lining, LONG Teng. Remote sensing target detection based on visual saliency guidance and classifier fusion[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011,40(10):2058-2064.
- [7] CRISP D J. The state-of-the-art in ship detection in Synthetic Aperture Radar imagery[J]. Organic Letters, 2004,35(42):2165-2168.
- [8] BARNHART D J, VLADIMIROVA T, SWEETING M N. Very-small-satellite design for distributed space missions[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2007,44(6):1294-1306.
- [9] UNDERWOOD C I, RICHARDSON G U Y, SAVIGNOL J. In-orbit results from the SNAP-1 nanosatellite and its future potential[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences, 2003,361(1802):199-203.
- [10] BOUWMEESTER J, GUO J. Survey of worldwide pico-and nanosatellite missions, distributions and subsystem technology[J]. Acta Astronautica, 2010,67(7/8):854-862.
- [11] YOKOYAMA R, SHIRASAWA M, PIKE R J. Visualizing topography by openness: A new application of image processing to digital elevation models[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2002,68(3):257-266.