商用器件的空间应用需求、现状及发展前景*

姜秀杰[1,2] 孙辉先[2] 王志华[1] 张 利[1]

[1](清华大学电子工程系 北京 100084)
[2](中国科学院空间科学与应用研究中心)

摘 要 随着微电子技术的飞速发展及空间任务对高性能需求的日益增强，现有的宇航级抗辐射器件和技术已经远远不能满足目前空间飞行器高性能系统的需求，使得高性能商用器件 Commercial-Off-The-Shelf (COTS) 在空间的应用成为可能. 本文就空间任务对商用器件的需求进行了综述，阐述了空间飞行器使用商用器件存在的问题及面临的风险，介绍了国内外空间任务中商用器件应用的现状，以及我国在这一领域的差距，并对商用器件在空间应用中的发展前景进行了展望.

关键词 商用器件; 空间应用

中图法分类号 P412

The Demand, Status and Perspective of COTS Components in Space Application

JIANG Xiujie[1,2] SUN Huixian[2] WANG Zhihua[1] ZHANG Li[1]

[1](*Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing* 100084)
[2](*Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences*)

Abstract With the rush development of the microelectronics technology and the increasing boost of the high-performance need in space mission, present space-level radiation-hardened components and technology cannot meet the high-performance need of spacecraft. That makes it possible to use Commercial-Off-The-Shelf (COTS) components with high-performance in space application. The space requirements to COTS products is summarized in this paper. The advantages of using COTS parts are the increased functionality, the speed of the instrument, less power consuming and lower cost compared to the space-level components. However, not all COTS parts are suitable for utilization in space applications. Most of them are designed to operate in the ordinary earth environment and are not intended to withstand the radiation environments of space. The radiation in space can cause permanent damage in some types of electronic components. This paper also points out the problems and risks associated with the use of COTS parts in spacecraft, and presents the current status and perspective of COTS components in space application.

Key words COTS, Space application

* 国家自然科学基金项目资助 (60372021)
2004-07-29 收到原稿， 2004-11-02 收到修定稿

1 引言

按照国际通用的分类方法，电子元器件等级一般可分为宇航级、 883 B 级、军级、工业级、商业级. 通常所说的商用器件 Commercial-Off-The-Shelf (COTS) 包括工业级和商业级器件. 在空间任务中，器件大多采用宇航级/883 B 级产品，但近年来高性能商用器件正在逐渐广泛地应用于空间任务来满足系统对高性能的需求.

除了能够提高空间系统的性能以外，采用商用器件还可以实现空间飞行器体积小、重量轻、功耗低的特殊要求 [1]，满足空间系统性能不断提高的需求. 但商用器件可靠性和抗辐射能力低，会对空间任务带来一定的风险，这使得商用器件在空间的应用受到极大的限制 [2].

20 世纪 90 年代以来，商用器件的空间应用问题引起了激烈的讨论，目前已经逐渐形成共识，即空间任务可以使用商用器件，但必须加以控制地使用 [3].

商用器件在空间领域有良好的应用前景，具有提高性能降低成本的巨大驱动力. 与宇航级/883 B 级器件相比，商用器件在性能和价格上都具有比较大的优势，从商用器件中筛选出合适的器件应用于空间飞行器中，已经成为空间系统发展的主要方向之一.

一方面，高性能商用器件应用于空间任务，在国际上已经成为一种发展趋势；另一方面，由于西方某些国家在高性能军级以上器件方面对我国实行封锁，在我国未来航天任务，包括军事卫星上使用高性能商用器件，必将有助于提高我国军用航天器和天基信息网的信息安全，更具有特殊的现实意义.

2 不同等级的元器件比较

不同等级的元器件比较见表 1.

从宇航级、 883 B 级、军级器件至工业级、商业级器件，其温度范围、抗辐射能力、可靠性、价格等都由高到低，而性能却由低到高. 与可以用于空间任务的宇航级/883 B 级器件相比，商用器件 (工业级器件和商业级器件) 温度适用范围窄，抗辐射能力低，但其性能高，价格低.

表 1 不同等级的元器件比较

Table 1 Comparison of the components with different grade

质量等级	温度范围	抗辐射能力	可靠性	价格	性能
宇航级	−55°C—+125°C	高	高	高	低
883B 级	−55°C—+125°C				
军级	−55°C—+125°C				
工业级	−40°C—+85°C				
商业级	0°C—+70°C	低	低	低	高

3 商用器件在空间应用中的需求

3.1 商用器件技术先进、性能高，缺少同性能的抗辐射器件

宇航级器件抗辐射能力强，可靠性高，而商用器件可靠性低，抗辐射能力比较差，那么商用器件之所以能够用于空间飞行器中，最主要的原因就是它的高性能. 近年来，随着技术的进步，相对于宇航级/883 B 器件而言，商用器件具有更快的发展速度. 商用器件的性能提高得很快，在高性能方面取得的成果非常显著，而其同类产品或者没有相应的宇航级/883 B 级器件，或者即使有，其性能也远不及商用器件的性能. 一般地讲，宇航级/883 B 级器件性能落后于商用器件的 1—2 代. 现有的宇航级/883 B 级器件以及抗辐射器件和技术已经远远不能满足目前空间任务高性能系统的需求，商用器件逐渐被采用来满足高性能的需求. 因此如果能够把先进的商用器件应用于空间领域，就可以实现空间产品的高性能，在空间应用中具有重要的战略意义.

3.2 宇航级 /883 B 级器件成本高、份额小，越来越难以获得

目前，在空间微电子器件的使用中，主要还是采用宇航级的抗辐射加固器件，其优点是可靠性高，不用担心辐射问题，而且一般可不采用冗余措施；然而面临的问题是由于宇航级抗辐射加固器件价格昂贵，批量小，制造周期长，市场需求量小，大大挫伤了制造商制造和开发宇航级器件的积极性；商用市场电子需求的广泛也减小了制造商开发宇航级/883 B 级器件的兴趣和动力 [7]，不少制造商退出了军品市场，使得宇航级/883 B 级器件的成本不断提高，越来越难以获得.

图 1显示了空间微电子产品相对市场份额变化 *. 军级以上器件占市场份额的比例逐渐减小，在

*Barnes C, Sampson M. Enabling COTS parts insertion in NASA systems: A combined NEPAG (Q, AE)——NEPP Program (AE) Activity. NASA S&MA Directors' Meeting Dryden Flight Research Center, 2002, http://nepp.nasa.gov/index-nasa.cfm/474/

1984 年占市场份额的 7%, 到 1994 年下降到 1%, 而到了 1999 年已经不足 1%, 而且这种趋势仍在进一步发展. 由于军品市场的日益缩小, 高性能航天器的需求, 商业器件质量的提高, 好、快、省的空间要求等使得商用器件用于空间不可避免.

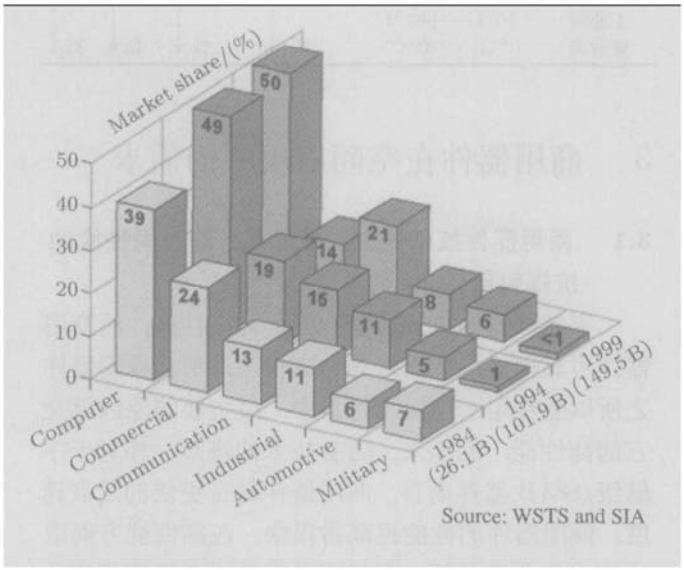

图 1 空间微电子产品相对市场份额变化

Fig.1 Relative size of space market for microelectronics

3.3 宇航级/883 B 级器件采购受到一定的限制

目前, 在我国的空间工程中, 关键器件如微处理器, 几乎完全依赖于进口产品, 而有些国家对中国的航天高技术进行封锁, 特别是神舟五号飞船发射成功以后, 美国又出台了一些新的政策, 限制军品向我国出口, 尤其在微处理器等高性能大规模集成电路方面, 即使能够获得, 出于信息安全的考虑, 也不宜应用到肩负重要使命的军事卫星中. 这种局面已经严重地影响了我国国防工程的进一步发展, 我们不得不探索各种技术途径包括商用器件的采用来发展航空航天电子设备的技术水平, 提高国防系统的性能. 在我国未来航天任务, 甚至军事卫星上使用高性能商用器件更具有特殊的现实意义.

3.4 商用器件在国防应用中的趋势和必然性

随着电子技术的飞速发展, 以及国防工业对航天用微电子器件的投资的下降, 微电子产品在商业领域中的应用越来越广泛, 商业领域对微电子产品的投资也越来越大. 投资比例的变化, 使得半导体工业的技术进步越来越集中于商用器件领域. 如果在军用方面不发展商用器件的空间应用技术, 必然导致在军用方面技术的落后.

近年来我国商用集成电路产业取得了长足的进步, 国内也开始设计和制造商用器件高性能微处理器, 例如中国科学院计算机所开发的具有自主知识产权的高性能通用微处理器 "龙芯一号", 以及 "方舟一号" 嵌入式 CPU, 北大众志 —863 等, 如果能将国产 CPU 应用于航天器上, 不但能够满足航天任务对高性能的需求, 维护我国航天器和天基网的信息安全, 还将为国产 CPU 找到新的应用出口, 必将在很大程度上解除军方对国外芯片安全、可靠性等方面存在的忧虑, 对我国国防军工、航天工程、国家安全等具有重要的战略意义.

4 国内外研究现状分析

4.1 国外研究的现状

国外很早就在探讨使用商用器件在空间技术领域的应用.

NASA 每年有近千万美元支持这方面的研究, 其中许多著名空间机构和公司参加了此项研究, 包括 ARC, GRC, JSC, KSC, LaRC, MSFC, USAF, Aerospace Corp., TRW, APL, NAVSEA, ESA 和 NASDA. NASA 专门推出多个机构参加的器件和封装计划, 即 NEPP 计划, 其目标是评价新上市的商用器件, 新型电子和光电子器件及封装技术的可靠性和辐射敏感度, 为在 NASA 空间项目中采用新型电子器件降低风险而提供技术支持. NASA 并于 2002 年 2 月 26 日发布了商用塑封器件用于空间的使用白皮书 *, 其政策为: "倘若对特定应用的器件在热、机械、辐照方面进行彻底评估确认可以满足任务需求的话, NASA 哥达德航天中心允许在航天器中使用塑封微电子器件 ....."

目前已经有多个项目应用了商用塑封器件 **. 例如, STEREO (Solar Terrestrial Relation Observatory), GLAST (Gamma-ray Large Area Space Telescope), LAT (Large Area Telescope).

美空军在 1994 年发射的 APEX 卫星, 其任务就是进行空间单粒子翻转试验和空间辐射环境测量,

*NEPP-NASA PEMs Policy White Paper——Basis for GSFC Policy on the use of PEMs, 2002, http://nepp.nasa.gov/index-nasa.cfm/692/

**NEPP——Plastic Encapsulated Microcircuits (PEMs). NASA/GSFC PEMs Policy, NASA Privacy Statement, 2003, http://nepp.nasa.gov/index-nasa.cfm/679/

测定商用器件在轨飞行的性能.

Surrey 大学小卫星公司在发射的小卫星中，以采用商用器件为主. 在其发射的卫星 UoSAT-12 中成功地使用了商用 GPS 接收机，取得了大量的关于商用器件应用的数据 [8]. 这些结果为星载计算机研制中采用商用器件奠定了技术基础.

高性能商用微处理器采用最先进的设计技术和工艺，对辐射更加敏感，美国有多家科研机构和商业公司从事商用微处理器的辐射效应的评价的研究. 商用 80386 被成功用于 HST, SAMPEX 及 Surrey 大学小卫星公司的小卫星上，美国空间电子公司 (SEI) 将 RAD-PAKTM 等，用于基于 486 DX2 的商用单板计算机的总剂量防护. 这些研究为商用微处理器的空间应用奠定了基础.

4.2 国内研究的现状

国内北京控制工程研究所首次提出把非抗辐射加固的 386 ex 芯片用于小卫星 [9]，并在 1999 年取得了“实践五号”飞行试验的成功. 2002 年使用 386 ex 芯片的“海洋一号”卫星飞行试验，再次获得成功.

中国科学院空间科学与应用研究中心近年来在载人航天工程和双星计划等航天任务中先后采用了几种商用器件，均已取得了在轨飞行的成功经验.

1999 年 5 月发射的“实践五号”卫星中研制的单粒子检测器 [10]，采用了商用塑封器件 PC104—486 DX33，试验 PC104—486 DX 工业控制机在太阳同步轨道上的工作性能及对空间环境的适应性，该器件成功地完成了空间测试任务.

2002 年 12 月发射的神舟四号飞船中研制的微重力流体电控系统的温度测量板中采用了商用器件热电偶放大器 AD595 C. 该器件性能指标高，军级以上产品中没有相应的达到质量等级要求的器件，相对于完全采用宇航级设计的电路板，由于该商用器件的采用，使得设计的电路板体积小、功耗低、一致性好、精度高，完全满足系统高性能的需求，取得了在轨运行的圆满成功.

2003年12月31日发射的双星探测一号卫星中，中国科学院空间科学与应用研究中心研制的有效载荷数据管理系统载荷配电器采用了商用塑封器件高端电流检测芯片 MAX471 EPA 共 10 片，获得在轨运行的圆满成功. 在双星探测二号卫星中，该设备采用了 MAX471 EPA 共 6 片，探测二号卫星于 2004 年 7 月 25 日发射，目前在轨运行良好.

在月球探测任务中有效载荷系统的设计中采用了商用器件隔离放大器 AD203 SN，目前正处于初样研制阶段.

综上所述，虽然近年来我国商用器件在空间领域的应用方面开展了一些研究，但与国际先进水平相比还具有一定的差距. 随着我国卫星水平的提高以及微电子工业的飞速发展，商用器件在空间产品中的应用技术研究已经成为军事航空航天领域中急需发展的关键技术.

5 空间飞行器中采用商用器件存在的问题和面临的风险及发展方向

商用器件是为了适应地面环境，而不是为适应空间恶劣环境而设计的，并不是拿来就能够用，而是必须加以控制地使用. 商用器件应用于空间飞行器时，不可避免地会遇到许多问题，存在很大的风险. 其中最严峻的两个问题是热环境和辐射环境. 商用器件的温度适用范围小，而空间环境存在温度变化较大以及温度突变的情况. 辐射环境主要有总剂量效应和单粒子效应，商用器件抗辐射能力差，在空间环境中会导致器件不同程度的损坏和失效，这是使用商用器件不可回避的问题. 另外，空间应用中的器件无法返修和置换，对器件可靠性的要求很高，而商用器件的可靠性低. 商用器件的可靠性数据厂家并不提供. 商用器件没有可追溯性. 用户无法知道商用器件工艺过程的更改. 虽然商用器件价格低，但由于要进行附加的筛选、测试、评估或适当的屏蔽加固等，使得采用商用器件的整体费用有很大提高.

针对以上的问题，在使用商用器件时必须采取一定的措施来保证商用器件在空间应用中安全可靠. 这一方面国内外也都有一些解决的办法和对策，诸如使用前进行有针对性的特定的筛选测试、制定相应的筛选测试规范、在电路设计上的特殊考虑等等. 但目前尚没有一个成熟的规范或指导方针可以遵循，仍然需要进一步的研究.

商用器件正逐渐日趋广泛地应用于空间任务来满足系统高性能的需求，而且已经显示出良好的趋势，在空间领域的应用有着广阔的前景. 从商用器件中筛选出合适的器件应用于空间飞行器中，目前已经成为商用器件在空间发展的重要方向之一.

实践证明，并不是所有的商用器件都可用于空间产品，即使经过试验证明可以用于空间任务的商用器件，也必须加以控制的使用. 如何控制，就是进行筛选测试. 然而，目前国内外还没有一套现成的规范或指导方针可以遵循，因此，建立商用器件空间应用的筛选测试规范已经迫在眉睫.

6 结束语

高性能商用器件的空间应用，在国际上已经成为一种发展趋势，具有提高性能减小体积、功耗和成本的巨大潜力. 由于西方一定程度上在高性能军级以上器件方面对我国实行封锁，在我国未来空间任务，甚至军事卫星上使用高性能商用器件更具有特殊的现实意义. 但商用器件在可靠性和抗辐射能力方面存在很大的缺陷，会对空间任务带来一定的风险，使得商用器件的空间应用受到极大的限制. 因此对商用器件空间应用的研究有待进一步深入，任重而道远.

参考文献

[1] Maher M C. Can COTS products be used in radiation environments. *COTS J.*, 2003, **5**

[2] Kayali S. Utilization of COTS electronics in space application, reliability challenges and reality. In: 6th Intern. CMSE Conf., 2002

[3] Teverovsky A, Sahu K. Instructions for plastic encapsulated microcircuit selection, screening and qualification. NASA/TP-2003-212244, Goddard Space Flight Center, 2003

[4] Fremont H, Deletage J Y. How to study delamination in plastic encapsulated devices. *Microelec. Rel.*, 2004, **44**:1311—1316

[5] Schmitt P, Lafontan X. Impact of the space environment conditions on the reliability of a MEMS COTS based system. *Microelec. Rel.*, 2004, **44**:1739—1744

[6] Schmitt P, Pressecq F, Lafontan X, Duong Q H, Pons P, Nicot J M, Oudea C, Esteve D, Fourniols J Y, Camon H. Application of MEMS behavioral simulation to physics of failure modeling. *Microelec. Rel.*, 2003, **43**:1957—1962

[7] Haebel W. A new approach to provide high reliable data systems without using space-qualified electronic components. In: 54th Intern. Astron. Cong., IAC-03-T.2.07, Intern. Astron. Fed., 2003

[8] Unwin M J, Oldfield M K. The design and operation of a COTS space GPS receiver. Advances in the Astronautical Sciences, 2000, **104**:465—473

[9] Hua Gengxin, Wang Guoling, Guo Shuling. Radiation hardening techniques for on-board computers. *Aeros. Cont.*, 2003, **21**(1):10—15. in Chinese (华更新，王国良，郭树玲. 星载计算机抗辐射加固技术. 航天控制, 2003, **21**(1):10—15)

[10] Sun Huixian. The Chinese scientific satellite "Practice-5" payloads, In: 33rd COSPAR Scietific Assembly, 2000