

TacSat-1 卫星系统战术应用设计

张敬一 刘志佳 张嘉雷 窦 骄 宁金枝

(航天东方红卫星有限公司,北京,100094)

摘要:介绍了美国国防部武力转型办公室所倡导研制的 TacSat-1 卫星系统在战术应用性能、技术特点、关键产品及系统运行等方面设计情况。简述了在网络中心战背景下该卫星系统所要实现的联合作战战术应用样式。描述了卫星系统在星地网络、电子通信载荷以及光学载荷等方面适应战术应用的设计与技术特点。在此基础上总结出卫星自动化、模块化、通用化设计、联合作战网络化、机器与机器自主化合作以及载荷设计低成本、实用化等战术微小卫星系统研制及应用的相关结论。

关键词:战术应用;传输控制层/网络层协议;以太网;电子通信载荷;光学载荷

中图分类号:V474.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2018)S1-0118-05

Design for Tactical Application of TacSat-1 System

ZHANG Jingyi, LIU Zhijia, ZHANG Jialei, DOU Jiao, NING Jinzhi

(DFH Satellite Co Ltd, Beijing, 100094, China)

Abstract: This paper introduce the design of tacsat-1 satellite system, which is proposed by OFT (Office of Force Transformation) of DoD (the Department of Defense), in terms of tactical application, technical features, key products and systems. This paper briefly describes the combined operational tactics of the satellite system in the context of network centric warfare. This paper introduces the technical characteristics of the satellite system adapting to tactical application design, such as satellite-to-ground network, electronic & communication payload and optical load. Finally, the sum-up for development and application of tactical micro-satellite system is summed up blocking, universal, roboticized design of the satellite, network of joint operations, machine to machine autonomous cooperation, low discount and applied design of payload and so on.

Key words: tactical application; transmission control protocol/internet protocol; ethernet; electronic & communication payload; optical payload

自从二战以来,在军事领域美国在世界范围内一直处于领先地位,在传统海、陆、空三大领域不断发展基础上,又开拓和发展空间和信息两个领域,空间领域简称天,最为著名的是 20 世纪 80 年代里根总统时期提出的“星球大战计划”,在该计划推动下,美军在空间领域得到了长足发展;信息领域简称电,从 20 世纪 80 年代开始,信息技术蓬勃发展,在军民两用方面给人类社会带来了巨大变化。特别是在军事领域,美军在 1991 年海湾

战争诠释了什么叫作海、陆、空、天、电联合的现代化战争,联合作战战术应用在其中得到了很好的作战效果。

之后,美军并没有停止进步的脚步,在全球军事领域始终坚持技术革新和保持竞争优势,正如其美国海军上将 Arthur 的观点,“国防转型首先是一个持续的过程,它没有终点,转型是为了创造或预测未来,转型是为了概念、过程、组织和技术的共同进化。改变这些领域中的任何一个都需要改变所

收稿日期:2018-03-23;修订日期:2018-05-30

通信作者:张敬一,男,硕士,E-mail:zjydeyouxiang@163.com。

引用格式:张敬一,刘志佳,张嘉雷,等. TacSat-1 卫星系统战术应用设计[J]. 南京航空航天大学学报,2018,50(S1):118-122. ZHANG Jingyi, LIU Zhijia, ZHANG Jialei, et al. Design and enlightenment for tactical application of TacSat-1 system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2018,50(S1):118-122.

有领域。变革意味着创造新的竞争领域和新的竞争力,变革旨在识别、利用,甚至为事情的方式创造新的基本原则,变革旨在识别和利用新的权力来源,这些变化的总体目标是在战争中维持美国的竞争优势”^[1]。

在此思想指引下,网络作为进入 21 世纪信息领域核心技术,其成为驱动美军武力转型支柱理论之一,进而提出了网络中心战(Network centric warfare, NCW),也被称为网络中心作战(Network centric operations, NCO),它所展现的是一种在信息时代和组织原则下为国家军队计划和联合的概念,能力和系统的战争理论,即将海、陆、空、天四大作战领域通过电领域的网络进行互联,形成系统联合作战体系。由此,美国国防部武力转型办公室(Office of force transformation, OFT)于 2001 年 10 月 29 日成立,该办公室旨在用美国国防的新概念来挑战现状,以确保压倒性的持续竞争优势。OFT 转型计划包括从下至上通过大量实验改变部队和文化,增加新知识和经验的共享,扩大军事能力,同时减轻风险,在战术应用中充分发挥联合作战效能。TacSat-1 卫星系统正是在此背景下提出并设计的^[2]。

1 TacSat-1 卫星系统

TacSat-1 卫星系统是一个低成本技术演示验证微小卫星任务项目,该项目是一个由美国国防部武力转变办公室和海军研究实验室(Naval research laboratory, NRL)共同发起的联合项目,海军研究实验室提供设计、集成和项目管理。

TacSat-1 卫星使用轨道空间公司的 MicroStar 平台,包括航空电子设备和太阳能电池阵。该平台已在由美国 Orbital Sciences 公司和加拿大 Teleglobe 公司共同提出的 ORBCOMM 系统中在轨应用。卫星由高度自动化平台、模块化有效载荷和通用接口构建,任务分配和数据分发使用可靠互联网协议路由器网络(The secret internet protocol router network, SIPRNet),具有 TCP/IP 寻址能力和低成本、快速响应发射特点。卫星是基于磁原理进行主要测量和控制的三轴稳定(磁强计定姿,磁力矩器控制姿态)飞行器。TacSat-1 平台尺寸为直径 1.05 m,高(或宽)0.5 m,重量 132 kg,设计寿命 1 年,卫星设计图如图 1 所示。卫星轨道为近圆轨道,轨道高度 500 km,倾角 64°,运行示意图如图 2 所示。

TacSat 计划提议始于 2003 年,目标是演示作战响应空间(Operationaly responsive space, OSR)网络化联合作战战术应用实验。技术孵化



图 1 TacSat-1 卫星太阳能电池板打开和对地面向上示意图

Fig. 1 The TacSat-1 spacecraft with solar panels deployed and nadir side facing up

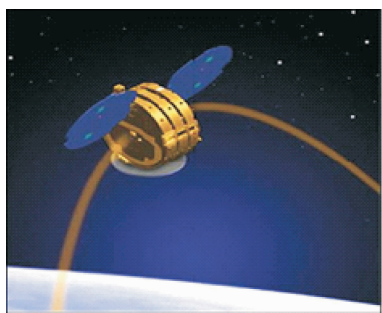


图 2 TacSat-1 运行模拟图

Fig. 2 Illustration of the TacSat-1 spacecraft

成果包括来自海、陆、空三军代表性需求。TacSat-1 卫星系统总体目标是演示验证以下能力^[3-5]:

(1) 适用于基于地理位置的空中与空间平台之间机器与机器合作。

(2) 载荷的战术控制和数据分发通过 SIPR-Net, SIPRNet 是平行于国际互联网广泛部署且在持续扩大的美国国防部内部机密网络。

(3) 特定的传感器辨别能力,能够从战场装备产品正在发射的可测量电子信号中确认和捕捉信息。特别是具有载荷协作能力,卫星通过电子通信载荷侦听无线信号找出舰船位置,然后由光学载荷对舰船进行拍照。

(4) 1 台使用新型热成像仪的红外相机通过 SIPRNet 任务分配和数据分发,该红外相机为非低温学冷却测辐射热仪,因此其尺寸、重量和功耗复杂度显著降低。

(5) 1 台可见光相机主要提供适度分辨率但直观的图像,可满足参与联合作战各方对图像共同需求, SIPRNet 任务分配和数据分发。

TacSat-1 卫星原计划于 2007 年秋由 SpaceX 公司的猎鹰一号(Falcon-1)运载火箭从范登空军基地发射升空,但该项目成为 Falcon-1 长时间延迟发射的牺牲品,任务于 2007 年 8 月被国防部取消。TacSat-2 于 2006 年 12 月 16 日发射成功,

许多 TacSat-1 卫星系统设计的战术应用能力已经在 TacSat-2 卫星系统上得到验证,武力转型办公室看到除非 TacSat-1 载荷更新可能带来的重大意义,已经没有动机去发射 TacSat-1^[6]。但 TacSat-1 卫星作为项目首发星,在联合作战战术应用设计上有很多技术特点值得学习和借鉴。

2 TacSat-1 卫星战术应用技术特点

2.1 星地一体化战术应用网络设计

TacSat-1 卫星系统由卫星、地面段和用户 3 部分组成。TacSat-1 星上使用标准空间到地面站链路分系统频段来支持卫星运行,地面段的卫星运行(监视和控制)功能由海军研究实验所位于拉布拉塔附近的花点地面站提供。此外,地面站与作战用户互联,使用定制版虚拟任务操作中心(Virtual mission operations center, VMOC),提供基于 SIPRNET 的载荷任务分配和数据分发。额外的天线覆盖支持计划由空军卫星控制网络提供。

虚拟任务操作中心是一个基于 IP 的指令和控制系统,能够支持任何基于 IP 的平台或传感器(具备可与用户交互的系统设计)可靠地操作分布式任务。系统拥有 SIPRNet 地址,所以战场指挥官可以通过国防部的机密网络^[7]潜在地接入卫星传感器数据。

VMOC 通信概念之前已由萨瑞卫星技术公司(Surrey satellite technology Ltd, SSTL)的 UK-DCM 卫星(发射于 2003 年 9 月 27)和一个随其在轨的思科路由器在 2004 和 2005 年夏天在轨成功演示验证。在这些演示验证中,操作人员在范登堡军事基地对卫星下达指令,指定对地球的区域进行成像,稍后操作人员收到卫星图像和遥测,并通过指令控制路由器。作战的用户依靠卫星上的移动路由器,通过 NASA/GRC 在克利夫兰的本地客户端访问英特网,而通过支持 SSTL 的地面站连接在轨卫星的思科路由器。VMOC 和路由器测试是一个合作型试验,集中了美国空军、陆军和航天局格伦研究中心,也包括其他组织。

2.2 电子通信载荷设计特点

TacSat-1 所搭载的电子通信载荷执行跨平台基于地理位置的试验,由海军研究实验室开发,目标是发现、识别和追踪脉冲无线电频率信号(对某地区的军事侦察观测研究),其包含 Copperfield-2 系统作为对于卫星载荷的一个基础设施,Copperfield-2 现有的传感器系统已经由全球鹰飞行验证,成为 TacSat-1 电子通信载荷基础设施的基础,为任务提供两项关键功能^[8]:

(1) 它本身是一个传感器系统,接收使人关注

的信号,通过自带的一个战术射频链路提供卫星与飞机(EP-3 和电子侦察机等)间跨平台的机器自主合作如图 3 所示,完成对于目标基于地理位置的测定。

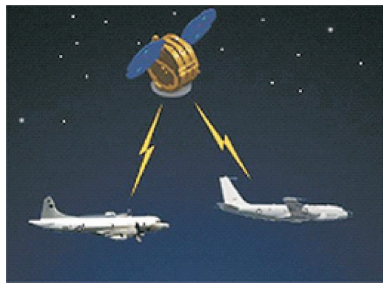


图 3 空间到空中平台合作

Fig. 3 Space-to-air asset collaboration

(2) 它提供通用的计算机系统,提供存储和数据处理服务,一个叫做高速接口(High speed interface, HSI)的模块专门为 TacSat 设计,提供 TCP/IP 载荷通信协议转换为 Orbcomm 平台专用的基于 OX-25 通信协议的功能。几个不同的处理器是 Copperfield-2 的部分载荷,相互之间通信通过以太网使用 TCP/IP 协议如图 4 所示。

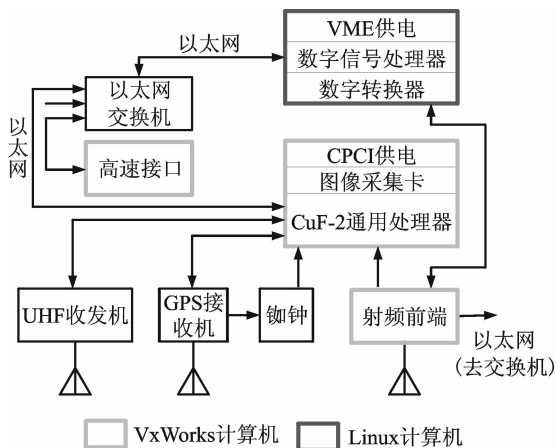


图 4 Copperfield-2 载荷的板级简图

Fig. 4 Block diagram of the Copperfield-2 payload

标准 TCP/IP 通信和基于 linux2.4, VxWorks 操作系统组合设计可为网络连接的板卡提供最大弹性和协同工作能力,如图 5 所示的 Copperfield-2 单机板卡结构图。Copperfield-2 从地面使用设计升级为提供模块化载荷基础设施设计,能够适应需求的变化。这个能力被使用在 TacSat-1 卫星上,可作为可见光相机额外支持硬件,通过 PCI 总线允许通用处理器使用图像采集卡,图像采集卡制造商的驱动被最小改变地使用^[10]。

高速接口模块是被专门设计用来提供基于以太网 TCP/IP 标准架构桥接转换为 OX.25 的模块。高速接口与卫星通信控制器连接,提供 2MB

同步串行总线。高速接口由一个 FPGA 硬件和一个 BSE ip-Engine 通用 PowerPC 823 嵌入式处理器实现。高速接口系统允许具有多种多样处理和由以太网连接的计算机接入发给卫星的数据流。基于 TCP/IP 和通用 Linux 操作系统的大规模使用为一个分布式开发环境提供了特有的机会。开发者能够在设计过程的每一步测试载荷各组件之间的通信,从在标准个人计算机中研制到在最终插入定制硬件之前的通信都需要与总线间进行通信。

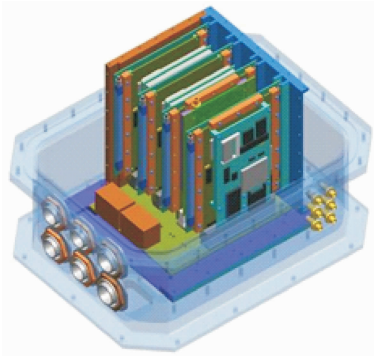


图 5 Copperfield-2 压紧的 PCI 卡序列和底板

Fig. 5 The Copperfield-2 CompactPCI cardset and chassis

2.3 光学载荷设计特点

光学载荷包括两台商业相机:1 台是可见光彩色相机,另 1 台是监视红外相机。为了满足航天器使用,NRL 都对两台相机都进行了加固和防护。这 2 台相机参与演示验证实验提供直观数据通过 SIPRNet 任务分配和数据分发部分^[10]。

可见光彩色相机为 HanVision HVDUO-F7 工业相机,该相机采用可以在每个相元上同时红绿蓝成像的新技术。新技术主要是通过使用以 24 比特数码彩色输出为特点的“Foveon X3™ Pro 10 M” CMOS 彩色成像传感器和 $2268 \times 1152 \times 3$ 光电传感器实现,最终以 3 幅/s 的速度输出 Camera-link 格式图像,并提供实时图像处理功能,图像数据的空间分辨率为 70 m。

infraSPOT Indigo Omega 红外相机如图 6 所示使用了新的热成像技术,即一个微型测辐射热仪,不需要低温学冷却,这样在尺寸、重量和功耗上大大的减少复杂度,相机收集在光谱段范围 $7.5 \sim 12 \mu\text{m}$ 的辐射信息,提供 850 m 分辨率的红外图像。

3 启示与建议

(1) 卫星自动化、模块化、通用化设计

首先,TacSat-1 卫星设计上采用平台在 ORB-COMM 系统 31 颗多轨道面低轨卫星星座中使用,平台运行、控制高度自动化,此外,电子通信载荷与



图 6 欧米茄的红外相机

Fig. 6 The infrared camera of Omega

光学载荷完成自动化协作完成对目标的发现、识别和跟踪,实际上卫星接收战术任务后需要在短时间内对战术区域进行支援,卫星平台与载荷要在整体上高效自动化合作并及时完成任务;其次,卫星各个功能尽量集成设计为单机模块,这样可以对同一模块进行批量化生产、测试和研制,提高产品成熟度与可靠性;各个模块间采用标准化、通用化的数据、电气接口,可以大规模快速组装装备,多种功能模块灵活组合于单星。借鉴 TacSat-1 卫星自动化、模块化和通用化设计,国内应在卫星设计思想、代次规划和标准制定上打开思路转变观念。

(2) 联合作战网络化

TacSat-1 卫星系统展现了多领域、跨平台网络化联合作战,其核心是网络中心战,在国际互联网如此发达的今天,美军拥有平行于国际互联网同样发达的 SIPRNet,试图将海、陆、空、天所能接入的领域平台都接入进来,作战人员只要接入这个网络通过授权即可得到其想要的作战信息。TacSat-1 卫星与其地面段作为一个系统平台单元接入到 SIPRNet,成为网络化联合作战的一员。由于中国在海、陆、空、天各个领域独立发展,建议从顶层设计打破原有独立领域发展现状,加强领域间合作,开展以网络为中心的大系统规划与研究。

(3) 机器与机器自主化合作

TacSat-1 卫星与反潜机或侦察机完成自主化目标测定,对于复杂的战场环境下,单一平台对战场特性的测定有其局限性,对于同一战场特性,是否可通过不同平台获取的信息进行自主化合作综合评估,得到较为精确的信息,这在战术应用中有着重要作用。建议深入理解战场环境,精确把握关键战场特性,之后针对其具体特性需求进行多平台机器与机器间自主合作研究。

(4) 载荷设计低成本实用化

TacSat-1 系统载荷大量采用商业标准产品、器件,商业产品较之宇航级产品在功能密度比快速提升,在作好整体防护设计的情况下,可以满足战术应用微小卫星低成本需求,此外,由于战术卫星

设计背景为联合作战,卫星平台承载能力有限,对于载荷获取信息的能力不是穷极其探测能力,而是适合联合作战实用化信息获取。对于中国来说,微小卫星采用商用产品器件开发,为提高卫星整体性能和水准有着至关重要的意义。

4 结束语

TacSat-1 卫星系统的设计充分展现了美国在军事领域超前的设计与规划能力,代表了美军在网络中心战背景下的联合作战样式发展思想,体现了微小卫星在联合作战中战术应用的可行性。具体到面向联合作战战术应用的卫星系统设计上,整星标准化设计、接入联合网络方式、载荷组合模式、机器间自主合作等方面具有重要借鉴意义。微小卫星技术特点适合战术应用需求,特别是发达的商业产品、标准和器件通过合理设计进入微小卫星,降低卫星成本的同时,提高实用效能,这必将成为提升中国战术应用卫星系统性能的发展方向与趋势。

参考文献:

[1] ARTHUR K C. What is transformation[EB/OL]. (2001). http://www.oft.osd.mil/what_is_transformation.cfm.

[2] ARTHUR K C. Top five goals[EB/OL]. (2001). http://www.oft.osd.mil/top_five_goals.cfm.

- [3] HURLEY M, DUFFEY T, HUFFINE C. Engineering a responsive, low cost, tactical satellite, TacSat-1[C]//Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites. Logan, UT:[s. n.],2004.
- [4] RAYMOND J, GLAROS G, HAUSER J. TacSat-1 and a path to tactical space[C]//AIAA 2nd Responsive Space Conference. Los Angeles, CA:[s. n.], 2004.
- [5] DOYNE T, WEGNER P, RIDDLE R. TacSat and ORS activity[C]//Proceedings of the 4S Symposium:Small Satellite Systems and Services. Chia Laguna Sardinia, Italy:[s. n.],2006.
- [6] BERGER B. Pentagon cancels TacSat-1 mission[EB/OL]. Space News, 2007.
- [7] SINGER J. TacSat ground system designed to be interactive[M]. [S. l.]:Space News, 2006.
- [8] HUFFINE M C. Rapid satellite payload development for TacSat-1[EB/OL]. (2005). [http://www.nrl.navy.mil/content.php? P=04REVIEW212](http://www.nrl.navy.mil/content.php?P=04REVIEW212).
- [9] HUFFINE M C. Linux on a small satellite[EB/OL]. (2005). <http://www.linuxjournal.com/article/7767>.
- [10] HURLEY M. Tactical microsatellite experiment (TacSat-1)[EB/OL]. (2006). [http://www.nrl.navy.mil/content.php? P=04REVIEW207](http://www.nrl.navy.mil/content.php?P=04REVIEW207).

(编辑:刘彦东)