

美国天基信息系统发展现状分析

缪中宇^{1,2}, 侯晓庚^{1,2}, 郑寒雨^{1,2}, 郝媛媛^{1,2}

(1. 中国空间技术研究院通信与导航卫星总体部, 北京 100094;)

(2. 国家航天局卫星通信系统创新中心, 北京 100094)

摘要: 天基信息系统具有战场绝对高位优势、不受区域边界限制且不依赖制空制海权, 具有全面提供战场信息支援, 打破地理限制实现各军种、多种武器终端的广域互联的战略优势, 已成为作战不可或缺的重要元素。针对未来全域作战对天基信息网络的能力需求, 聚焦美国天基信息系统建设前沿, 分析下一代过顶持续红外项目、天基Link 16、“黑杰克”项目、商业增强空间互联网络作战等典型系统的研究进展, 总结美国智能天基信息系统建设概貌及发展趋势, 提出对我国天基信息系统建设的启示及思考。

关键词: 天基信息系统; 分布式网络; 智能信息处理

中图分类号: TP927

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022024

Discussion on the Development of Space-Based Information Systems of America

MIAO Zhongyu^{1,2}, HOU Xiaogeng^{1,2}, ZHENG Hanyu^{1,2}, HAO Yuanyuan^{1,2}

1. Institute of Telecommunications and Navigation Satellites, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

2. Innovation Center of Satellite Communication System, China National Space Administration, Beijing 100094, China

Abstract: Space-based information system has the absolute high-level advantage of the battlefield, is not limited by regional boundaries and does not rely on air and sea domination. It has the strategic advantage of comprehensively providing battlefield information support, breaking geographical restrictions and realizing the wide area interconnection of various services and weapons. It has become an indispensable element of the future battlefield. In view of the capability requirements of future global operations for space-based information networks, the forefront of America was focused on. The research progress of space-based information system construction and reported the research progress of typical systems such as the next generation of overhead persistent infrared program (Next-Gen OPIR), the space link-16 program, the Blackjack program, and the commercial augmented space inter-networked operations (CASINO) program were analyzed. The prospective development tendency of space-based information systems of America was summarized, after which some suggestions were put forward for the construction of space-based information system of our country.

Keywords: space-based information system, distributed networks, intelligent information processing

0 引言

近年来, 美国瞄准天基信息网络站位高、覆盖广、通联性强的优势, 不断强调天基信息网络在未来国防安全中的关键作用, 使得天基信息网络的外延与内涵得到了极大的扩充。同时, 其紧跟时代技术前沿, 推动以大

数据、云计算、人工智能为核心的新型技术在天基信息系统能力建设中的深度应用, 促进未来天基信息系统向“智能化”“自主化”“去中心化”等形态不断迈进, 以更加灵活、自主、高效的方式进行信息的获取与整合。可以预见, 未来的天基信息系统将跳脱单纯的数据

收稿日期: 2022-02-28; **修回日期:** 2022-05-09

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2019YFB1803100)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2019YFB1803100)

流供给，更加强调将各种来源的大量数据转变为“可操作的情报”^[1]。

在技术创新的引领与战略需求的快速牵引下，世界范围内已形成了智能天基网络探索与建设的热潮。天基信息在美国重大空间战略项目“黑杰克”“先进战斗管理系统”等中都占有重要地位。美国等国家一方面不断加强智能空间信息系统建设，持续补充强化现有空间监视与态势感知系统的密度与强度，争取信息上的不对称优势；另一方面在积极开展先期技术与演示实验论证，增强技术储备，加强远期建设。准确掌握其天基信息系统的发展态势，对于我国分析周边威胁，制定空间发展政策，维护国家空间安全和发展利益具有重要参考意义；明晰天基信息系统的能力需求与前沿使能技术，对于规划我国智能天基信息系统的建设目标与技术路线具有重要意义。

1 美国天基信息系统发展现状

为了提升未来智能天基信息系统的信息感知、传递、处理、应用能力，支持多域通联、情报感知、指挥控制决策等应用，美国已在各个方面开展了相关布局，由国防太空架构进行全局技术能力规划与网络部署，整合容纳多类型天基信息网络的建设项目，提升天基信息系统的总体能力。国防太空架构规划有7层，分为传输层、跟踪层、监管层、威慑层、导航层、作战管理层和支持层。每层各司其职，为整个空间信息体系提供数据传输、态势感知、信息处理、智能应用、快速服务响应等完整功能架构。美国目前已开展了传输层、跟踪层、监管层的相关研究与建设，并计划在2024年具备初步作战能力。其中传输层作为提供全天候数据传输通道的基础功能层，其建设走在其他各层之前。在传输层0期的建设中，美军计划发射20颗卫星^[2]，而传输层1期美军计划发射144颗卫星^[3]，用以组成包含星间链路的网状通信网络。为此美军开展了一系列关键技术与原型演示验证项目，包括著名的“黑杰克”项目、天基Link 16数据链实验卫星XVI及激光互联和网络通信系统（LINCS）等。在跟踪层，美军计划发射8颗宽视场（WFOV）卫星用以跟踪超高声速武器，预计在跟踪层1期发射约42颗卫星，并已开发了原型红外有效载荷（PIRPL），用于支撑下一代过顶持续红外系统建设。在监管层方面，美太空发展局研制了原型在轨验证试验台（POET），将用于验证在轨数据融合应用程序。同时，美军在积极发展地面段支撑装备与系统，如商业增强空间互联网络作战等典型系统（CASINO）项目等。美国天基信息系统主要项目与发展计划见表1。

表1 美国天基信息系统主要项目与发展计划

项目		所属层	发射进展与计划
实验与原型系统	“黑杰克”	传输层	2021年发射两颗卫星，2022年计划发射8颗卫星
	LINCS	传输层	2021年发射两颗卫星
	XVI卫星	传输层	预计2022年发射
	PIRPL	跟踪层	2021年搭载发射
	POET	监管层	2021年搭载发射
地面段	CASINO	—	预计2024年建成
0期建设	传输层	—	预计2023年完成20颗卫星发射
	跟踪层	—	计划2023年完成8颗WFOV卫星发射
1期规划	传输层	—	计划发射144颗卫星，其中18颗用于演示验证 ^[1]
	跟踪层	—	预计发射约42颗卫星 ^[2]

可以看到，智能天基信息系统的建设不是一个单点增强的过程，而是多线并行，空间段与地面段互补结合，信息感知、传递、处理、应用能力并重，全方位发展，共同形成智能化的天基信息体系。

1.1 传输层

1.1.1 天基Link 16项目

（1）项目概述

美国当前正致力于将Link 16集成到太空传输层中，利用天基网络的高站位提供超视距、全球性的多域互联，并将其明确地纳入7层体系架构的传输层中，支撑跟踪层和监管层形成时敏目标解决方案。传输层0期规定Link 16需具有的技术指标为^[4]：

- 传输层卫星应接收地面提供的Link 16信息（可通过L频段Link 16网络）并将其发送给各种用户（如海上、地面、空中、导弹防御系统等）；
- 传输层卫星可通过L频段Link 16网络从不同用户处接收和发送Link 16信息至任务运行中心；
- 传输层卫星应通过Ka频段向地面站发送、接收、存储和中继Link 16信息，并通过Link 16波形向多个用户发送、接收、存储和中继Link 16信息；
- 传输层卫星应与Link 16网络同步，并在直径为100海里（1海里=1.852 km）的地面覆盖范围内传输（L频段）；
- 传输层卫星应能够进入、同步并传输到Link 16网络；
- 传输层卫星应通过传输层网络（通过星座中的多个航天器）传输高通量/低时延的Link 16数据。

（2）研究进展

卫讯公司研制了名为XVI的低轨小卫星用于搭载Link 16终端，该卫星将使用蓝色峡谷公司（BCT）的12单元立方体卫星平台，最大限度地提高有效载荷体积，其设

计概念如图1所示^[5]。天线部分采用美国Roccor公司研制的可展开式L频段Link 16卫星天线，使卫星能够接收和传输Link 16信号。

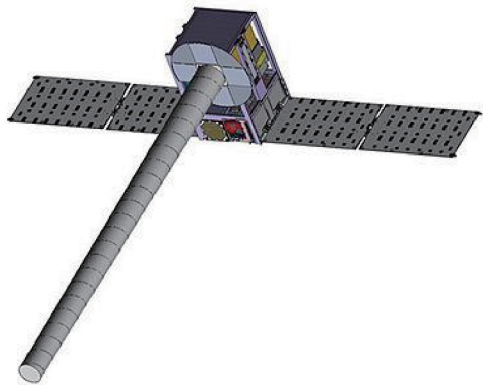


图1 XVI卫星设计概念

①高度集成化的卫星平台

在平台选型方面，XVI卫星将采用223的12U立方体平台设计，配备BCT的XB1总线产品，使用控制卫星的高性能姿态控制（XACT）模块对立方体卫星进行姿态轨道控制。XACT模块采用多点参考框架，可在任何位置实现精确的3轴姿态控制，且采用微型的封装，体积仅为0.5个单元。同时，XB1也采用了集成的设计，将各模块功能进行整合，相比于传统离散型的设计大大提升了有效载荷的空间。XB1设计结构如图2所示^[5]，可以看出XB1的体积为1×1×1，即一个单元，比传统设计体积缩小1/2，因此可以容纳更大、更多、具备更强功能的有效载荷，显著提升卫星能力。

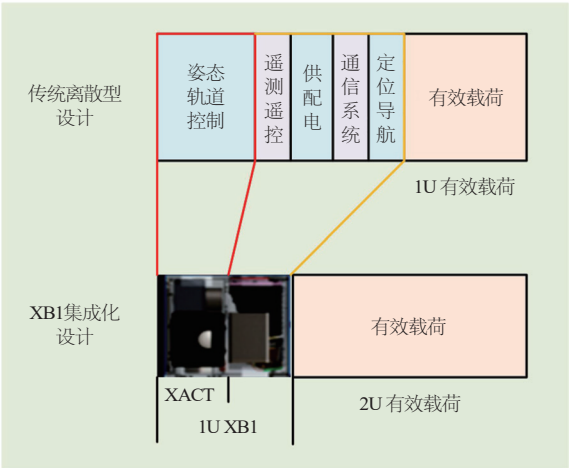


图2 XB1设计结构

②卫星天线

XVI的卫星天线将采用Roccor公司的L频段天线，

该天线为螺旋体，有2 m可展开的射频孔径。之所以设计成这种结构，是考虑到搭载该天线的卫星没有足够的空间展开天线——由于采用了裂隙管式合成吊杆技术，可搭载于尺寸为2U的立方体卫星上，并在卫星发射后在轨展开。

③加密模块

为了保持Link 16的安全性，卫讯公司将内联网络加密机（INE）也集成到XVI卫星中，使XVI卫星具备通信安全及增强的网络安全能力，未来的发展预计将同时保护用户数据，遥测、跟踪和指挥管理，以及多个安全级别的卫星间通信。在加密机选型上，卫讯公司选用了KG-259XS加密机，它在Viasat公司的加密产品系列中具有最小的尺寸、重量和功率，具备超过100 Mbit/s（聚合）的非对称吞吐量。KG-259XS主要性能参数见表2^[6]，由此也可以预见XVI卫星的加密性能。

表2 KG-259XS加密机主要性能参数

性能	项目	功能与参数
通信安全特性	算法	符合ACC标准，AES-EFF算法或IPMEIR算法
	密钥接口	通过USB的DS-101
	灵活键控	非机密/机密设备生成的共享钥匙（DGSK）
物理特性	尺寸（宽×高×深）	3.73 in×1.05 in×3.06 in（1in=2.54 cm）
	重量	0.65磅（1磅约为1.45 kg）
	功率特性	典型值为5 W；直流电压12~28 V；MIL-STD-1275D标准
可靠性	预测平均无故障时间	1 400 000 h
	预测平均修复时间	15 min
	电磁干扰/电磁兼容	MIL-STD-461E标准
网络接口与协议支持	网络接口	电气/机械IEEE 802.3；10/100 Mbit/s铜质RJ-45密文数据接口-以太网接口适配器
	支持的协议	TCP、UDP、IPv4/IPv6双栈、ICMP、IGMP、ARP、DHCP
	网络功能	动态IP地址，动态密钥管理
	管理	基于SNMPv3和HTTPS浏览器的管理，VINE Manager软件
	服务质量（QoS）	支持八类QoS级别

（3）能力分析

将终端部署到卫星是Link 16数据链发展过程中的一次重要创新。作战人员和决策者可以通过天基Link 16分发的分布式情报、监视和侦察数据支持态势感知、指示和警告（I&W）、部队保护、目标跟踪以及瞄准/交战。星载终端可使传统Link 16具备超视距连接能力，使天基信息网络能够与更广泛的信息域在作战域通联，使得天基信息网络的数据传输与分发能力获得飞跃发展。

1.1.2 “黑杰克”项目

(1) 项目概述

“黑杰克”项目于2018年由美国国防部高级研究计划局（DARPA）提出，旨在寻求在近地轨道上组网的、有弹性的、持久性强的军用有效载荷，形成全球高速网络，以提供无限的传感及通信能力。该项目将从民用卫星供应商处采购卫星平台，并将军用传感器搭载至这些平台上。“黑杰克”项目将研发并验证一些低轨卫星组网中关键的支撑技术。该项目的重点是民用卫星平台和低成本、可互换、设计周期短、技术更新频繁的军用有效载荷，并对有效载荷进行优化，使其适用于多个平台。该项目的目标有3个：

- 开发有效载荷和任务级自主软件，演示自主轨道操作，包括在轨分布式决策处理器；
- 开发和实施军用有效载荷和航天器平台的先进商业制造模式；
- 演示搭载于低轨卫星的各类有效载荷。

(2) 项目进展

①卫星平台

目前卫星平台主要由BCT与通信卫星公司（Telesat）负责研制，其中BCT主要负责卫星平台的设计。在2020年12月的关键设计审查中BCT给出了基于其X-SAT小卫星平台中的土星系列（X-SAT Saturn）产品的平台设计方案，证明该平台的技术成熟性及性能，并于2021年8月开始生产第一批用于有效载荷集成的两个卫星平台。X-SAT Saturn平台的主要性能参数见表3^[7]。

表3 X-SAT Saturn平台主要性能参数

性能指标	X-SAT Saturn性能参数
运载火箭	24 in运载火箭接口（可选15 in）
指向精度	±0.002°，3轴，2个追踪器
指向稳定性	1弧秒/秒
太阳翼峰值功率	单面板：256 W 双面板：512 W 三面板：768 W
能量存储	20.4~40.8 Ah
载荷容量	标准：30 cm×30 cm×40 cm，可视运载火箭整流罩及具体发射任务扩容
在轨寿命	LEO≥5年 GEO≥2年 深空探测≥2年
机动速度	标准：5°/s
数据接口	串行、LVDS、航天电缆、HDL C、I2C或SPI
星上数据存储	128 GB（1 TB可选）
系统总线电压	9~36 V
频率	UHF、S、X频段
上行链路速率	100 kbit/s
下行链路速率	150 Mbit/s

②自主任务管理系统（Pit Boss）

Pit Boss是一个安装在“黑杰克”卫星上的航电设备和计算节点，配备有高速处理器和加密设备，可用作通用网络和电气接口，提供任务层面的自主能力，实现在轨边缘计算。它能够使“黑杰克”的星座节点在不需 要人为操作的情况下长期协同运作。其设计开发的关键技术包括：人工智能控制的自主运行软件、大规模分布式计算、高精度定时、高可信度网络方案、空间加密方法、卫星资源管理、星座管理等^[8]。Pit Boss系统的研制与开发主要由SEAKR公司负责，目前该公司已经研制发射了曼德拉1号与两颗曼德拉2号试验卫星。曼德拉1号是一个立方体卫星，将携带超级计算机处理芯片，主要用于辐射缓解和处理器性能验证。曼德拉2号是一对小型卫星，将携带宽带数据的卫星间光链路，构成未来LEO光学网状网的基础。

曼德拉1号于2020年秋季发射，其搭载的有效载荷包括高性能多核高级RISC机器（ARM）处理器和多个图形处理单元（GPU）。目前已成功实施了一项战术海上实验，展示任务自主、OTA更新、无质量有效载荷部署以及传感器边缘处理和利用。其中部署及利用的关键技术包括：模数转换器（ADC）和数模转换器（DAC）技术、基于现场可编程门阵列（FPGA）的处理技术以及基于专用独立电路（ASIC）的处理技术。

曼德拉2号卫星有两颗，于2021年6月30日成功发射，并于POET搭载有效载荷原型，在与运载火箭分离后，两颗曼德拉2号卫星逐渐分离，最终能够支持在2 400 km的范围内进行试验。曼德拉2号的任务是为包括DARPA、美国太空发展局、美空军研究实验室在内的政府或军队证明先进激光通信技术的可行性，具体实验任务主要为收集低轨卫星上的光通信终端（OCT）性能数据，与POET有效载荷一起演示在轨数据融合，证明未来发展所需的核心能力。在进入轨道后，POET将演示第三方多智能（multi-INT）数据融合软件应用程序在卫星模块化和可升级任务软件套件中的集成应用。同时，美军将在曼德拉2号上评估验证OCT建立和维护高速通信链路的瞄准、捕获和跟踪算法。

(3) 能力分析

“黑杰克”项目通过先进性的设计理念，在提出时就获得了广泛的关注。它瞄准低成本、分布式、弹性抗毁低轨卫星星座构建，对卫星平台、各种传感器载荷与自主任务管理系统进行了重点研发。在卫星平台方面，突出小型化与通用化特点，尤其是通用化的设计打破了当下各设备厂商间设备无法互联互通的尴尬局面，使得卫星平台可以搭载任何符合标准的传感器及任务载荷，

一方面可以快速扩展网络规模；另一方面可以通过搭载不同类型与不同功能的载荷，使得网络具备更加丰富、全面的信息获取、传递与处理能力，从而使未来天基信息网络在规模与功能上具备更高的灵活性。在传感器载荷方面，通过部署和搭载不同类型的载荷，能够灵活、快速地收集、处理和分配信息，可同时监测多个地理区域并且能够覆盖全球，全方位提升了网络在信息获取、传递方面的能力。自主任务管理系统Pit Boss则集中代表了网络的智能核心，赋予网络将原始数据向决策信息的转化能力，对美国未来的军事行动提供强有力的战略支撑。

1.2 跟踪层

在跟踪层方面，美国将大力发展空间态势感知与技术情报探测能力，并计划在跟踪层1期发射约42颗卫星。美军研发的PIRPL已于2021年搭载天鹅座货运飞船发射，并将在未来大力支持下一代过顶持续红外系统（Next-Gen（NG）-OPIR）建设。

1.2.1 NG-OPIR项目概述

NG-OPIR计划将接替天基红外系统（SBIRS），并将提供性能更好的导弹预警、防御、作战空间感知和技术情报收集能力。该项目将在两个区块（区块0和区块1）内发射地球同步轨道和高椭圆轨道上的卫星，并建设模块化、可扩展、网络强化的地面段系统用以对天基任务数据进行灵活操作，提供企业级的识别、规划、管理和集成能力^[9]。

1.2.2 研究现状

（1）空间段NG-OPIR卫星

下一代OPIR星座空间段第一阶段区块0将包括5颗卫星，其中3颗为地球同步轨道卫星，2颗为极轨卫星，并于2021年1月新增购置3颗高轨卫星，因此在目前NG-OPIR计划内共包括6颗GEO卫星与2颗极轨卫星。区块0阶段的3颗GEO卫星主要由洛克希德·马丁公司承担，其将搭载2颗传感器有效载荷，分别由雷神公司、诺斯罗普·格鲁曼公司和鲍尔航空航天公司负责研制。2021年8月，上述公司均已通过了有效载荷设计的关键设计审查（CDR）。

平台方面，3颗GEO卫星将使用LM2100卫星平台。洛克希德·马丁公司对LM2100卫星平台进行了增强，在多个子系统中插入现代电子设备，增强其弹性功能，使其更适用于NG-OPIR任务。表4为LM2100卫星平台的典型参数^[10-11]，由此可见未来NG-OPIR GEO卫星的基础性能情况。

载荷方面，有效载荷的设计主要使用了数字工程方法，包括任务场景模拟、载荷能力模拟，预测它们在

表4 LM2100平台典型参数

典型有效载荷性能特征	
有效载荷质量限制	1 000 kg
有效载荷功率	12 000 W
有效载荷热耗散	6 000 W
有效负载容量（连续）	3.5 m³
姿态控制（包括位置保持）	
姿态控制系统	三轴稳定，零动量偏置
总指向精度	0.10°横滚/偏航/俯仰（每个轴可选0.03°）
加速环境（抖动）	小于20 mili-g，带可选隔振装置
任务参数	
轨道	GEO:35 786 km/圆形，经度/倾角保持±0.05°
寿命	15年
成功概率	大于15年任务80%
命令和数据处理接口	
主数据总线	MIL-STD-1553 B数据总线
备用串行总线接口	RS-422衍生双向串行总线
脉冲命令	-32 V，28 V
热力系统	
内部温度环境	在轨温度范围-24℃~+61℃
	转移轨道温度范围-24℃~+30℃
部件热设计标准	最大平均基板温度45℃；±15℃最大日间摆动
可靠性/生存能力/电磁兼容性	
辐射耐受性	20~100 Si
有效载荷模块屏蔽效能	大于20分贝（200~40 000 MHz）

轨道上的工作方式，可视化地管理评估从设计到发射再到交付后支持的整个任务流程，对有效载荷的能力升级进行建模，以满足未来的威胁和任务需求。雷神公司正基于该方法推进机组风险降低活动、飞行硬件制造、测试、组装和有效载荷交付，并在数字环境中完成大部分测试^[12]。

（2）地面段FORGE系统

FORGE系统的首要特点强调通用性与互操作，因此被视为美国空军实现其所有卫星“通用”指挥与控制网络这一宏伟目标的第一步。2020年1月，雷声公司在竞标中获胜取得了FORGE系统授权合同。与以往只能够收集和利用特定类型卫星或传感器数据的卫星地面控制系统不同，FORGE将建造为一个开放式的系统，能够从几乎任何类型的卫星或传感器收集数据，然后帮助操作员快速理解这些数据。FORGE将建设为一个像智能手机操作系统一样的平台，美军将开放该系统，使得政府、私营企业和大学可以开发新的应用程序，因而FORGE将能处理来自民用传感器的数据，以更充分地利用数据。该系统预计2024年投入运营。

1.2.3 能力分析

NG-OPIR是一套天地联合的智能数据感知与处理系统。在空间，通过发展先进的红外传感光学和电子技术、星载计算机与星载处理算法进行红外及超高声速武

器的探测处理,获得比历代监视卫星系统更强的探测跟踪信息。在数据探测和感知方面,进行大幅能力增强,在数据收集、传递、处理、决策的信息链条中对数据产生的源头进行强化,将更加丰富、准确的数据注入信息网络。地面段FORGE系统则与空间段遥相呼应,以开放的体系架构进行设计开发,广泛融合包括国防支持计划、SBIRS高椭圆轨道、SBIRS地球扫描仪等各系统在内的数据源,对数据进行综合处理分析,大大扩展战场空间感知与技术情报获取能力。NG-OPIR将通过天地联合的完整系统实现信息收集、处理、融合、数据传播、算法开发、网络连接等一系列操作链条,实现广域数据的融合汇聚与智能应用。

1.3 地面段

由于地面设备具备卫星难以企及的计算与存储能力,地面段成为美国建设空间信息网络智能能力的主要发力点,其中最具代表性的即为商业增强空间互联网络作战(CASINO)计划。

1.3.1 CASINO项目

CASINO计划由美国空军空间和导弹系统中心(SMC)主导,是先进作战管理系统(ABMS)的重要地面段组成部分,旨在解决数据处理与分析能力无法匹配快速增强的情报、监视和侦察(ISR)数据收集能力这一问题。其首要目标为利用商业技术,处理和分发来自大量卫星的数据,实现海量ISR数据的智能高效处理。该项目由微软和鲍尔航天工程(BEA)公司共同执行,两家公司将共同构建一个智能地面数据处理系统,使BEA公司的相控阵天线接收卫星数据下行并直接下发至微软数据中心进行处理,演示目标为利用智能算法快速处理来自大型分布式小卫星星座的全球同步数据流。该原型系统初始将演示对不少于20颗卫星数据的收集和处理,并有可能将这一数字扩展到数百颗。

1.3.2 研究进展

微软与BAE公司合作开发了CASINO的系统原型,面向LEO卫星数量的不断增加以及日益分布式的任务环境,利用CASINO平台提供大型数据集所需的处理能力和分析能力。2021年5月,该项目进行了一次演示实验,通过Telesat卫星模拟过顶持续红外数据,相控阵天线接收后将卫星捕捉到的环境图像同时传输到Azure的云数据中心与装备有Azure边缘设备的战术车辆。Azure使用机器学习算法处理图像并识别可能的活动或特征,识别的结论将被转换为消息并传播到多个节点。Azure可快速构建多个卫星流,分析不同类型的卫星图像。这次演示验证实验证明了CASINO系统在数据处理时效方面的巨大

飞跃,作战人员不论位于战术边缘车辆还是位于指挥中心,都可以准确、快速、安全地获得必要的环境信息。

1.3.3 能力分析

CASINO项目通过云系统与人工智能算法的部署实现了快速、灵活、可扩展的地面处理能力,一方面它通过在作战指挥中心部署云处理中心,通过地面云系统强大的计算能力,支撑陆、海、空、天的海量数据高速处理。另一方面,CASINO通过部署边缘计算能力,使得网络边缘具备实时计算处理能力。CASINO的智能云边缘能力将极大弥补星上处理能力受限、无法部署复杂算法的限制,通过地面的强大算力汇聚多域海量数据,完成对数据的智能挖掘与应用。

2 美国天基信息系统发展趋势

目前,美国正在积极推动智能天基信息网络的发展,通过天基Link 16、下一代过顶持续红外项目、“黑杰克”项目等一系列项目试图构建一个规模庞大、链条完整的智能天基信息网络系统,全面提升网络的数据采集(感知与侦查)、传输(多域通联与分发)、处理(态势感知与情报挖掘)、应用(指挥与控制决策)能力。从几个主要项目的建设情况来看,美国天基信息系统发展的趋势具有如下特点。

(1) 重在系统整体能力构建,空间段信息处理应用能力有待提升

从现有的情况来看,美国天基信息网络仍处于前期的能力演示验证与基础设施搭建阶段,几大系统或通过弹性分散的体系架构,或通过通用化的平台设计,或通过搭载增强的侦查、监视、通信载荷使天基网络具备能够应对未来威胁挑战的强态势感知、安全多域通信的能力,在数据信息的采集和跨域传输方面获得了极大进步,去中心化的弹性架构也使得系统具有更强的灵活性与抗毁能力。同时各系统相互借力,相互补充,能够形成各作战域间完整通畅的信息通道。但在空间段,对于信息数据的处理应用能力仍然较弱,囿于星上处理能力的限制,数据的挖掘与应用难以完全由星上实现。为此,美国正在搭建地面段的支持系统,通过地面强大的算力融合多个系统数据,开展大数据下的情报分析与行动决策的工作。

(2) 大力发展激光星间链路,促成星间高速通信网络

从各项目卫星的搭载载荷来看,激光星间链路载荷已成为未来卫星的标配能力,不论哪一层面、何种功能的卫星,都需要将自身收集到或处理过的信息数据最终下发到各个作战域的指战人员手中。此外,卫星间的信息交互也是实现星间智能协同、分布式计算的基础。因此,不论

是以侦查监测能力为主的下一代过顶持续红外系统，还是以中继或通信为主的传输层卫星都将搭载星间光通信载荷，在最近发布的7层体系架构的传输层1期的招标中明确将光通信终端作为重点采购对象。

(3) 注重各系统互操作能力，空间段与地面段系统向通用化发展

从美国对未来卫星平台、载荷及地面系统的要求来看，平台及系统通用化，系统间具备互操作性已成为其重要关注点之一。为了强化天基信息网络去中心化、弹性抗毁的能力，需要打破各系统、各运营商自成体系，互不兼容的局面，建立相关软硬件标准，使得来自任意厂商、任意功能的载荷都能快速集成到卫星平台中。在具体实施方面，美国太空发展局已经明确定义了激光星间链路与光通信终端的标准，各厂商需据此提供硬件设备，由此实现相互兼容联通。地面系统更是以开放式的架构进行设计，如FORGE，将能够接收来自不同系统的数据源，进行汇聚处理，甚至还将向企业提供通用接口，通过扩展数据域获取更加全面的情报信息，通过大数据分析及人工智能算法，将数据向可用情报及作战信息转化，实现数据的智能应用。

(4) 借助商用力量，加快国防太空架构发展

近年来，美国商业航天高速发展，卫星制造成本与发射周期不断优化，同时Starlink、OneWeb等公司打造的巨型低轨星座展现出的低时延通信能力也为战区外远程发射、武器末端制导及无人机数据交换提供了可能。美军已突破传统的观念开始借力商用卫星系统，2019年美国航天发展局明确表示将从SpaceX、OneWeb等公司实施采购服务。

3 启示与建议

(1) 升级系统设计理念，强化天基信息网络去中心化特性

去中心化是近年来各个作战领域争相发展的核心能力之一，其思想在于将昂贵的大型装备功能分解到大量小型平台上，通过自主、协同等技术达到相同或更高的作战能力，具有成本低、风险小、灵活性高、对抗性强等优势。去中心化的作战概念在近年已成为指导美军装备发展的重要思想，在提升装备体系弹性和防护能力的同时，也将增强武器装备的攻击能力。未来发展高性能的武器平台已不再是战胜对手的唯一途径，而应发展灵活的体系技术方法。因此，在未来的智能天基信息网络设计中，应广泛吸纳先进的武器装备系统发展思想与设计理念，大力提升网络的去中心化特性，才能有效应对国际威胁。

(2) 加快推进平台与关键载荷标准化定义，开展通用化设计

为卫星平台、载荷制定统一的接口与参数标准，对于加快卫星系统建设，构建卫星系统快速重构能力具有重要意义。统一的标准也有助于打破各卫星系统无法互联、各自为战的局面，能够更高效地整合太空资源，利用扩展的监视与跟踪域进行更加精确、广域的情报感知。未来，可联合卫星平台、载荷的主要生产单位，积极参与CCSA的制定工作，或参考3GPP的工作流程，对不同功能的卫星系统、卫星平台、不同类型的卫星载荷及相关器件或设备的接口、性能进行广泛的标准化讨论，加快通用化的卫星平台研制、模块化载荷型谱梳理和标准化接口规范制定，同时建立高效合理的设计、制造、发射和使用流程，逐步建成可快速响应作战需求的智能天基信息系统。

(3) 增强星载计算能力，发展提升卫星智能化水平

未来智能天基信息网络中星间分布式协作、星上自主管理已成为功能构建的必然趋势，这一趋势要求高性能卫星具备强大的算力，统一对星上各分系统的健康状态进行检测，分析星上可用资源，规划飞行任务，或与邻近卫星高效交互，共同完成决策计算。星载计算平台是实现上述功能的物理基础，受限于宇航级芯片的能力，目前在世界范围内星上都难以达到理想的智能能力。在未来，需要从软件与硬件两方面共同入手，攻克高性能星载计算机与星上通用处理平台软件架构的技术难题。一方面，需要广泛对现有芯片进行功能比对分析，找准差距，提升底层硬件能力；另一方面，着力卫星自主技术的发展与应用，使卫星具备自主完成不同模式之间的切换与衔接、目标识别和跟踪处理，及星间智能协作能力。

4 结束语

随着时代的发展与技术的演进，天基信息系统的建设已引起世界各国的高度重视。本文聚焦美国天基信息系统的建设与发展现状，选取具有代表性的重大项目，调研最新进展，分析其在信息采集-传输-处理-应用链条中的地位与作用，并进一步挖掘美国天基信息系统能力现状与发展趋势；最后，对我国天基信息系统的规划提出建议。

参考文献：

- [1] 刘欣, 张占月, 雍鑫. 空中进攻作战天基信息“云”支援体系建设研究[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(3): 79-85, 91.
- LIU X, ZHANG Z Y, YONG X. Research on air offensive operation under space-based information 'cloud' support system[J]. Fire

- Control & Command Control, 2021, 46(3): 79-85, 91.
- [2] Space Development Agency. Delivering capabilities: briefing to smallsat conference[Z]. 2021.
- [3] Space Development Agency. National defense space architecture tranche 1 transport layer proposal instructions[Z]. 2021.
- [4] Space Development Agency. Statement of work (SOW): space transport layer tranche 0[Z].
- [5] Blue Canyon Technologies. BCT data sheet: XB1: enabling a new realm of CubeSat[EB].
- [6] Viasat. KG-250XS: ultra-compact 100 Mbit/s IP network encryptor for TS/SCI[EB].
- [7] Blue Canyon Technologies. BCT datasheet: X-SAT saturn[EB].
- [8] LAURENCE R. DARPA the blackjack constellation program gains speed, raising the bar for space domain awareness[J]. Global Military Communications Magazine, 2021: 26-27.
- [9] Department of defense fiscal year (FY) 2022 budget estimates air force justification book[Z]. 2021.
- [10] Lockheed Martin. LM 2100 payload accommodation[EB].

- [11] Lockheed Martin. LM2100 proven & powerful[EB].
- [12] United States Government Accountability Office. Report to congressional committees MISSILE WARNING SATELLITES-comprehensive cost and schedule information would enhance congressional oversight[EB]. 2021.

[作者简介]



缪中宇 (1992-), 博士, 中国空间技术研究院工程师, 主要研究方向为卫星通信网络。

侯晓庚 (1993-), 硕士, 中国空间技术研究院工程师, 主要研究方向为卫星通信系统仿真。

郑寒雨 (1990-), 博士, 中国空间技术研究院工程师, 主要研究方向为卫星通信网络。

郝媛媛 (1995-), 博士, 中国空间技术研究院工程师, 主要研究方向为卫星通信网络。