

· 学术聚焦 ·

# 美国向“弹性和分散”军事空间体系转型探析

刘韬

北京空间科技信息研究所, 北京 100086

**摘要** 随着美国内外部环境和空间安全观的转变, 美国军事航天发展战略出现了重大调整, 从注重提升卫星系统功能向注重强对抗条件下如何提升体系的防护能力、保障体系功能转变。本文通过论述美国空间安全观的变化、美国军事航天分散体系转型战略的目的意图、转型途径, 从顶层规划、体系评价指标和面临的主要困难等方面, 对军事航天转型进行了分析, 探讨了现阶段转型战略在美国军用通信、导弹预警、侦察、气象、导航等领域的初步实施情况及其方式和难度。

**关键词** 美国; 军事体系; 空间系统; 战略转型

**中图分类号** E816

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.21.013

## An Analysis of the Transition to Resilient and Disaggregated Military Space Architectures of the US

LIU Tao

Beijing Institute of Space Science and Technology Information, Beijing 100086, China

**Abstract** With the change of the internal and external environments and the space security concept, the US military space strategy undergoes major adjustments, from emphasis on improving the satellite system function to focus on how to improve the protective abilities of the space architectures and how to secure the functions of space architectures under the adverse conditions. This paper traces the change of the US space security concept also the purpose and the method of the strategy transformation to a disaggregated military space architecture. The strategy transformation is analyzed from various aspects such as the top level planning, the evaluation indexes of the architecture and the main difficulties. The implementation statuses, the methods and the difficulties of the strategy transition in the fields of the military communication, the missile warning, the reconnaissance, the meteorology and the navigation satellite systems are analyzed.

**Keywords** US; military architecture; space system; strategy transition

2011年, 美国出台《国家安全空间战略》, 针对空间对抗问题, 提出将“弹性”作为评估军事空间体系的重要指标, 以确保美国空间能力安全<sup>[1-5]</sup>。2013年5月出台的美军《空间作战》联合条令, 提出发展商业和多国合作的空间能力可提升空间体系弹性, 增强对敌威慑力<sup>[6]</sup>。经过近年研究、论证和试验, 美国空军航天司令(AFSPC)部于2013年8月发布《弹性和分散空间体系》白皮书<sup>[7]</sup>, 确定了美国军事航天转型的战略方针, 明确了未来航天系统发展的顶层思路和航天体系转型方向, 将带动美国军用卫星系统转型的深入论证, 促进卫星技术的创新。

《弹性和分散空间体系》白皮书提出, 未来美国将转变当前以大型空间系统为主的发展模式, 通过多种方式将原有系统分散成若干功能更单一、规模更小、成本更低的卫星系统, 组成综合体系提供所需能力, 以提升空间体系的弹性, 即抗毁能力。另外, 建立分散的卫星系统, 并不单纯是一项防御性战略, 在加速空间技术更新、推动卫星采办和设计创新、打破大型航天企业垄断、强健航天工业基础、降低航天系统研发成本、提高经济承受能力等方面, 均具有巨大的潜在效益。

上述战略性文件是美国向内外各方表达的宣言, 尤其是《弹性和分散空间体系》白皮书的发布, 标志着美国空间安全

收稿日期: 2014-05-04; 修回日期: 2014-06-08

作者简介: 刘韬, 博士, 研究方向为国外航天战略和遥感卫星技术, 电子邮箱: ltttaotao@yeah.net

引用格式: 刘韬. 美国向“弹性和分散”军事空间体系转型探析[J]. 科技导报, 2014, 32(21): 76-83.

新战略已开始 在体系和系统层面上付诸实施,意味着未来美国空间体系构成与发展模式将发生重大转变,将对国际空间安全态势、全球航天技术和产业发展产生重大影响。

### 1 美军航天体系转型的背景和战略意图

近几年,美国军事航天面临的内外部环境发生了巨大变化。一方面,军事卫星在战场的应用十分广泛,美军对卫星的依赖性日益增强,同时美国航天预算持续紧缩。另一方面,国际空间安全环境呈现对抗(contested)、空间环境拥挤(congested)、国际竞争(competitive)的“3C”局面<sup>[1]</sup>。首先是“对抗”(Contested)逐步升级,美国现有的部分卫星系统设计可以追溯到“冷战”时,当时的卫星主要用于核攻击预警及维持相互力量均势,对空间系统的攻击被当作是严重挑衅和冲突升级的举动,很可能被解读为核战争的序幕,因此,“冷战”时“相互确保摧毁”(MAD)的核威慑大大降低了卫星遭受攻击的风险<sup>[8]</sup>。这种观念导致卫星的设计是在运载火箭能力允许范围内,尽可能地增大尺寸、质量及每个有效载荷的能力,因此在设计上性能优于防护,这种卫星的适用性严重地依赖于过去战略平衡的时代背景。然而,今天的安全环境与过去相比发生很大变化:1)各类反卫星武器(如动能、激光、共轨等)、通信干扰机、GPS干扰机和网络攻击的出现使空间系统的稳定性降低<sup>[9,10]</sup>;2)空间环境日益拥挤,数量不断增加的卫星和空间碎片、电磁频谱竞争等对卫星系统的危害非常严重;3)国际竞争不断加剧。美国空间安全受到前所未有的威胁。图1<sup>[10]</sup>、图2<sup>[10]</sup>表明“冷战”结束后,美国对空间系统的依赖性逐渐增强,同时,经济环境和传统的卫星系统发展模式已造成卫星技术更新慢、卫星系统研制周期长、系统易受攻

击等问题。这些内外部环境的变化使美国的空间安全观发生了重大转变。

美国认为,不论自己的天战能力多么强大,只要存在空间依赖性的短板,对方必然会发展非对称空间攻击能力,并能给美国致命一击。以前所坚持的利用空间武器来维护空间安全的观念是一种经不起推敲的悖论。美国开始极力规避在空间域中进行破坏性作战,将维持空间的安全和稳定作为美国最大的利益。

此次美国军事航天体系转型的目的是:1)通过构建分散的空间体系提升弹性,增强国家空间威慑力,慑止对空间系统的攻击,进而维持空间安全与稳定。分散能够增加对手决策的难度、降低敌人攻击的胜算,改善威慑态势。美国形成了与传统核威慑独立的空间威慑理论,围绕“惩罚”和“弹性”进行战略布局和体系建设。“惩罚”强调向敌方表达实施空间攻击将会招致无法承受的代价,这种反击涉及政治、经济、外交、军事等多个方面。“弹性”强调利用体系的冗余和强健性提高己方空间系统对敌方攻击的生存能力。“惩罚”和“弹性”共同发挥作用,形成一致的空间威慑效果,从而以不战而屈人之兵的方式达成维持空间安全和稳定之目的;2)通过转变发展模式,提升工业基础能力,降低系统成本,解决日益增长的需求与预算紧缩环境之间的矛盾。在空间系统发展方面,美国从20世纪90年代末开始对其军事航天系统进行大规模的更新换代,但技术跨度和系统规模过大,几乎都出现了成本超支和进度延误问题,一些标志性的项目,如未来成像系统-光学成像卫星(FIA-O)、天基雷达(SR)、转型通信卫星(TSAT)等纷纷中途下马<sup>[11-13]</sup>。另一方面,由于预算紧缩导致新系统采购量减少,航天工业基础存在发展风险。

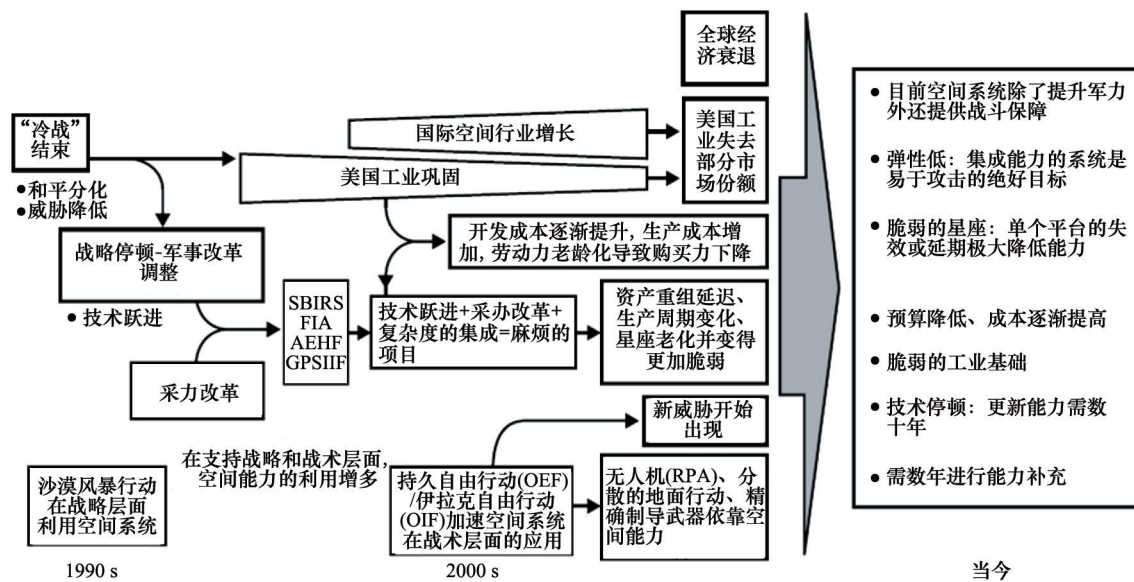


图1 空间安全的变化

Fig. 1 Evolution of space security

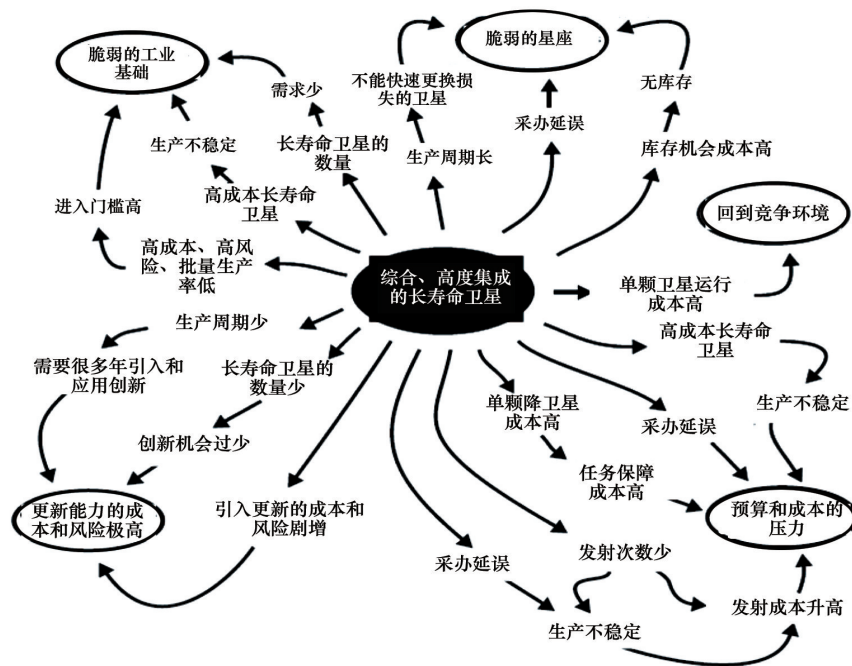


图2 综合、高度集成的长寿命卫星的问题

Fig. 2 Problems of aggregated, highly integrated, long-life satellites

## 2 美军航天体系转型的主要内容

### 2.1 建弹性和分散体系结构,保障空间安全和稳定

在《弹性和分散空间体系》白皮书中,“弹性”被定义为:“一个系统体系在面对系统故障、环境挑战或敌对行动时能够继续提供所需能力的本领。”弹性由海、陆、空、天、网多域能力组成,围绕威胁慑止、体系强健、系统重构、能力恢复等途径开展,以制度化的形式将弹性融入体系研究、需求论证、规划计划、采购和运行管理等各项军事航天活动中。

弹性的思想是将重点从关键系统防护向关键能力保证转变,目的是确保军事航天系统能够在可接受风险下遂行指定任务。

“分散”被定义为:“将天基任务、功能或传感器分散到一个或多个轨道平面、平台、载具或多域的多个系统之中。”分散有5种形式:1)分解(fractionation):是由多个以无线方式相互作用的模块提供单一系统的功能。2)功能分散(functional disaggregation):是将一颗卫星上的多个载荷或多项任务分散到多个卫星上。3)搭载有效载荷(hosted payload):是将有效载荷和任务搭载在其他卫星上。4)多轨道分散(multi-orbit disaggregation):是利用多个轨道平面来提高弹性。5)多域分散(multi-domain disaggregation):是将能力分散于海、陆、空、天、网多域,相互冗余和备份。

从实质上看,美军的体系转型是以空间威慑理论为指导,以提升弹性为目标,以分散为途径,利用信息和网络技术将物理分散的系统连接成为一个高度集成、天地一体的综合体系。

### 2.2 转变航天研制和管理模式,推动技术创新和降低成本

当前传统体系大型综合卫星变动方案的代价巨大,通常

强调设计和方案的稳定性,力图在设计阶段就满足所有需求,这是造成目前系统庞大昂贵的原因之一。现有卫星系统开发周期长,运行寿命长,一旦入轨工作,其硬件更是无法升级更新。在卫星进入开发过程后很难再引入先进技术,这些因素导致技术在很长一段时期内被“锁定”。

分散体系具有“恒久适应性”特点,使得设计者在系统部署后仍能进行功能补充和技术更新,这样在设计和研制阶段可以更好地把握需求基线,避免实施过程中出现偏离,并且能够加速新技术的快速引入。单星设计的简化还有助于缩短研制周期,降低单元成本。

分散体系中,各系统在物理上为分散结构,但卫星系统获取的信息要聚合应用。因此需注重顶层谋划和天地一体化综合体系架构设计,这些转变将对当前研制管理模式产生重要影响。

### 2.3 维持航天任务的稳定性,提升航天工业基础能力

传统大型项目成本高昂,在预算紧缩的背景下,这类项目趋于减少,美国航天工业基础存在风险。分散能够提升卫星研制和发射服务业务稳定性,为航天工业提供更多的市场。分散有助于拆分大型合同,向多个承包商分散,有效发挥激励作用,有利于整个航天工业界的良性发展。分散体系所要求的卫星数量增多,提高了发射的频度,能够改善发射计划的稳定性,降低临时发射任务对总体发射计划的影响。

美国将分散体系作为提升航天工业基础能力的重要举措之一。

### 3 美军航天体系转型的保障措施

#### 3.1 由远及近论证,分步细化落实

本次航天体系转型的方案论证不同于以往在系统层面论证的模式,而是采取从上而下、由远及近的论证方式及三步走的发展策略。首先,从国家层面对整个体系进行分析评估,充分考虑内外部环境和需求,统一思想,明确战略目标和方向。其次,在系统层面研究实施途径和策略,制定体系发展规划。第三,针对特定任务和系统,制定具体方案和计划。这种论证模式也是分散体系结构注重顶层设计的客观要求。

目前美国已经完成第一阶段的论证工作,正在积极推进分散体系转型的步伐,计划在2015财年完成第二步的论证工作<sup>[14]</sup>。美国航天界预计需要20多年的时间才能完全实现体系转型。

#### 3.2 增加评价指标,评估体系架构

美国在弹性和分散体系论证中,体系评价方式不但关注

作战能力指标,而且增加了弹性和经济承受性两个重要的评价指标。作战能力指标包括任务需求、作战要求、确定威胁3个方面;弹性指标包括空间体系在敌对或不利环境下保障任务成功的能力;经济承受性主要包括避免大型项目上马、充分利用民商和国际伙伴的能力等。任何一个指标不佳或者“亮红灯”,都将对体系方案的评估结果产生颠覆性影响(图3、图4)<sup>[15]</sup>。

目前,军事通信卫星系统、导弹预警卫星系统和导航卫星系统等领域已开展的论证都得出优于目前体系及集中式体系的结论。其中在军事通信领域已基本明确,宽带系统和高防护系统向弹性和分散体系转型。导航和导弹预警等系统正在开展进一步论证。导航卫星领域正安排由萨里卫星技术(美国)公司(SST-US)研究小型卫星或小卫星组网方案;预警卫星领域正在研究扫描探测卫星与凝视探测卫星集成、卫星与无人机协同的综合导弹预警与跟踪体系。

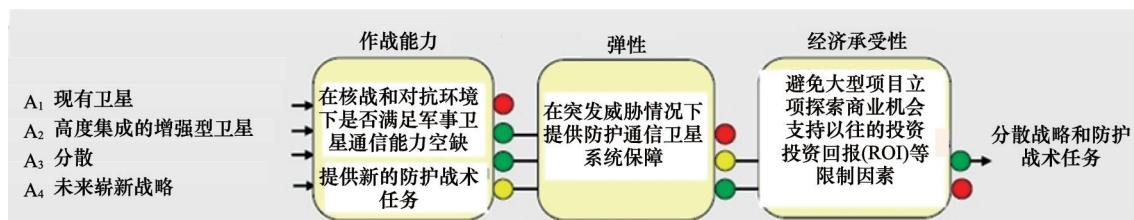


图3 美国军事通信卫星体系评估指标与流程

Fig. 3 Decision analysis tree of US MILSATCOM architecture assessment

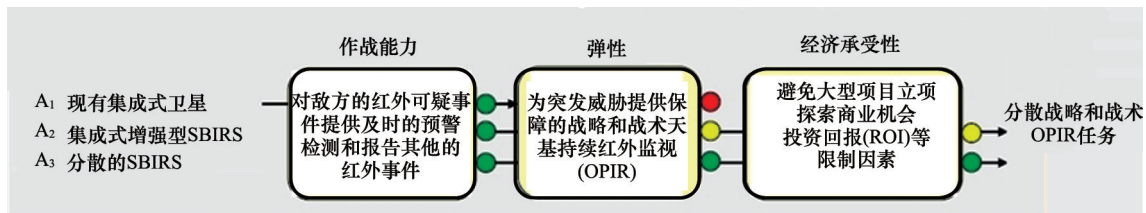


图4 美国导弹预警卫星体系评估指标与流程

Fig. 4 Decision analysis tree of US missile warning satellite architecture assessment

#### 3.3 开展深入研究,注重理论指导

“盲目地改变现有主体系统是愚蠢行为。”<sup>[14]</sup>分散作为一项国家战略,必须对理论和技术进行深入的研究。每种分散方式都有优缺点以及相应的任务适用性,因此分散无万全之策,需要多种方式进行综合。

体系深入论证需要结合具体任务、场景、战术、技术和流程进行分析和评估,多方案比较和优化,选择最佳分散方式。美国军方和工业界均积极参与,提出了多种分析理论和方法,用于指导体系结构设计,目前还处于百家争鸣状态<sup>[16-20]</sup>。

美国空军提出了基于作战流程的分析方法,按照作战行动时序,结合具体系统和任务、作战流程和应用进行详细分析评估,更加贴近实战。波音公司提出了基于威胁评估法<sup>[20]</sup>,

利用威胁与风险场景库,通过多层级模型计算系统或体系的生存概率,从而实现弹性能力的量化评估。弹性是概率统计值,是4个因素的函数,包括对空间系统威胁的规避概率( $R_{AV}$ )、系统鲁棒性( $R_{RO}$ )、遭遇威胁后丧失能力的恢复程度( $R_{RV}$ )、系统能力重构概率( $R_{RC}$ )。其中,系统鲁棒性指在无法规避威胁后系统保留下来的能力。对单一威胁的系统弹性表示为

$$R = R_{AV} + (1 - R_{AV})R_{RO} + (1 - R_{AV})(1 - R_{RO})R_{RV} + (1 - R_{AV})(1 - R_{RO})(1 - R_{RV})R_{RC} \quad (1)$$

其中, $1 - R_{AV}$ 为无法规避威胁的可能性; $(1 - R_{AV})(1 - R_{RO})$ 为未成功规避威胁后的能力丧失部分; $(1 - R_{AV})(1 - R_{RO})(1 - R_{RV})$ 为未成功规避威胁后丧失的能力以及未恢复的能力。对多个威胁的

系统弹性表示为

$$R_s = R_1 - \sum_{n=2}^N (1 - R_n) \quad (2)$$

其中,  $R_s$  为对多种威胁的系统弹性,  $R_n$  为对第  $n$  个威胁的弹性,  $N$  为威胁数量。整个体系的弹性表示为

$$R_{FS} = 1 - \sum_{n=1}^N (1 - R_n) P_n \quad (3)$$

其中,  $R_n$  为对第  $n$  个威胁情况的弹性, 它包括单类威胁或多类威胁。  $P_n$  为对第  $n$  个威胁情况的发生概率。

在分散体系技术方面, 分散所降低的空间段的复杂度有可能会转移到系统其他部分。需要考虑增加地面接入点、地面通信和地面段处理能力, 还要考虑遥测、跟踪和指令操作等需求。运载火箭需要满足新的体系要求。在分散体系中, 卫星将协同工作, 传感器不再由同种平台搭载, 造成数据融合困难, 需要评估新接口和新标准。此外, 需要更加关注数据通信和网络空间安全问题。

## 4 美军航天体系转型的实施

### 4.1 军事通信卫星稳步推进系统升级, 积极探索转型发展途径

目前, 美军新一代军事通信卫星系统正处于部署阶段, 宽带全球卫星通信(WGS)卫星是美军新一代宽带系列卫星, 计划采购 10 颗, 现已部署 6 颗; 移动用户目标系统卫星(MUOS)是美军新一代窄带系列卫星, 整个星座包括 5 颗卫星, 现已部署 2 颗, 计划 2015 年实现全面作战能力; 先进极高频卫星(AEHF)是美军新一代防护系列卫星, 计划采购 6 颗, 现已部署 3 颗, 整个星座将在 2019 年部署完毕。

在弹性和分离空间体系转型的指导下, 美军将对宽带和防护通信卫星系统的发展计划进行调整。2011 年 1 月至 2013 年 9 月, 美军先后向产业界发布了 3 个建议征求书(RFI), 累计售出 20 余项合同, 就宽带和防护卫星通信系统的新概念、新体系和采办策略进行研究, 并开展关键部件演示验证。承担研究合同的产业界公司包括卫星运营商、卫星制造商、地面终端制造商、网络集成商及咨询评估机构等。

目前, 军事卫星通信转型的实施计划还有待进一步论证, 但远期目标是实现分散、多样化和弹性, 宽带和防护卫星系统可能的转型路线包括商业容量的租用或购买、改进商业通信波形以提供抗干扰能力、有效载荷搭载、系统功能拆分、进一步挖掘低轨通信卫星星座潜力等。

对于防护卫星系统, 美军计划将战略和战术任务分离。其中, 战略载荷针对核对抗环境, 着重抗核加固; 战术任务针对常规作战强电磁对抗环境, 着重抗干扰、防侦收、防截获, 从而解耦两种任务的相互制约, 降低两种系统的复杂程度, 进而实现成本降低。

对于宽带卫星系统, 采取更加多样化的能力途径, 以军事专用系统为核心, 通过战区专用卫星、有效载荷搭载、定制型商业通信容量来实现战区覆盖, 满足激增的卫星通信需

求。国际移动卫星公司(Inmarsat)正在研制 3 颗全球快车(Xpress)Ka 频段卫星, 将其定位为补充 WGS。Xpress 卫星同时采用民用和军用 Ka 频段, 与 WGS 卫星可互用无线电频谱, WGS 地面终端在两类卫星之间无缝切换。国际通信卫星公司(Intelsat)正在研制大容量、兼有 Ku 和 C 频段的新型通信卫星, 带宽远超过 WGS 卫星, 其相当部分的容量也将融入美国宽带军事通信业务。

### 4.2 导弹预警卫星正在更新换代, 向多星、多轨道、多域分散

美国已建立静止轨道与大椭圆轨道结合, 扫描与凝视、捕获与跟踪手段相结合的导弹预警系统, 具备全球弹道导弹发射早期预警实战能力。现役的导弹预警卫星系统包括 4 颗第三代国防支援计划(DSP)卫星、2 颗天基红外系统(SBIRS)静止轨道预警卫星、2 个搭载在美国大椭圆轨道保密侦察卫星上的 SBIRS 探测器载荷、2 颗低轨空间跟踪与监视系统(STSS)试验卫星。

SBIRS 预警卫星于 2011 年开始部署, 将在 2015 年前后完全替换 DSP 卫星系统。SBIRS 卫星对导弹的发射反应时间约为 10 s, 发射点定位精度为 1 km, 对战术弹道导弹及主动段较短的新型速燃弹道导弹的预警能力大幅提高。美国已计划再部署 4 颗 SBIRS GEO 卫星和 2 个 SBIRS HEO 载荷<sup>[21-24]</sup>。

在低轨道, 美国已发射 2 颗空间跟踪与监视系统(STSS)卫星, 全面验证了导弹跟踪识别关键技术。STSS 卫星采取捕获和跟踪相结合的探测体制, 在低地球轨道上两两成对立体观测, 不仅能精确探测和跟踪导弹的飞行弹道, 还能区分弹头和诱饵。2013 年 2 月, STSS 卫星首次成功进行了卫星直接引导拦截弹的遥发射试验, 检验了在地面系统还未发现目标的情况下仅靠卫星指示信息进行导弹拦截作战的概念。但 STSS 业务系统需由 20 余颗卫星组成规模庞大的星座才能具备全球导弹跟踪和识别实战能力, 在美国大幅压缩军费的整体环境下, 目前还未做出立项和部署决策。一旦决策部署, 美国可很快形成弹道导弹全程探测和跟踪能力。

美军还实施了商业搭载红外有效载荷(CHIRP)计划<sup>[24]</sup>, 选取了静止轨道全球凝视成像试验载荷作为第一个真正意义上的有效载荷搭载项目, 在商业通信卫星上搭载运行。试验了下一代红外宽视场凝视技术, 验证了通过商业搭载的方式提高系统弹性的可行性。

美军在已有成果的基础上正在论证更加分散的体系结构, 通过单星功能分散、多轨道分散、多域分散提高体系弹性。正在研究将目前 SBIRS 卫星上的凝视载荷拆分出来, 由单独的卫星或采用有效载荷搭载方式实现; 正在发展低轨导弹跟踪和识别卫星技术; 正在发展机载预警系统和地基预警系统, 提升强对抗条件下导弹探测、预警、跟踪和拦截能力。

### 4.3 军事成像侦察卫星系统实现了军民融合发展, 并朝多轨道部署方向发展

美国成像侦察卫星系统综合使用光学和雷达侦察手段, 形成了以军为主、民商为军用的军民融合的卫星侦察监视体

系。美国目前的军用光学侦察卫星技术水平领先其他国家一代,其KH-12卫星的分辨率达到0.1 m,商业光学成像卫星分辨率达到0.41 m,达到其他国家军用光学侦察卫星水平。美国的微波成像技术也居世界领先水平,最高分辨率达0.3 m。

现有光学侦察卫星系统实施“2+2”计划,该计划的实施追溯到1999年,当时美国国家侦察局(NRO)提出新一代侦察卫星计划,即未来成像体系(FIA),用于取代锁眼(KH)系列光学成像侦察卫星和长曲棍球(Lacrosse)系列雷达成像侦察卫星。但因技术跨度大、经费预算猛增、计划进度延迟等问题,导致2005年9月美国取消了FIA项目的光学成像侦察卫星部分。为了消除FIA光学项目取消带来的风险,美国总统奥巴马于2009年4月批准了“2+2”计划。在该计划下,NRO向洛克希德-马丁公司采购2颗KH-12卫星,同时向地球眼(GeoEye)和数字地球(DigitalGlobe)公司采购数十亿美元的商业高分辨率遥感卫星图像。FIA雷达卫星项目得以保留。

美国正在论证静止轨道高分辨率光学成像卫星,可能采用NASA的旗舰项目詹姆斯·韦伯空间望远镜(JWST)所使用的空间分块可展开反射成像技术,也可能采用国防高级研究计划局(DARPA)开展的MOIRE项目所使用的薄膜衍射成像技术。高轨高分辨率光学成像卫星将带来卫星应用模式的转变,使卫星拍摄图片向拍摄视频跃变,并且具备动目标监视能力。未来,现有低轨高分卫星将与高轨高分辨率卫星一起形成低轨详查、高轨区域持续监视的综合体系,并继续坚持军、民、商综合应用的发展方式<sup>[25]</sup>。

#### 4.4 军用气象卫星系统以军民结合、国际合作发展为主,同时朝着分散体系探索

美国军用气象卫星系统形成了以军民结合发展为主的发展方式,军用极轨气象卫星系统以国防气象卫星(DMSP)为主,民用NOAA卫星补充军用,军用静止轨道气象观测数据大部分来自民用的静止轨道环境业务卫星(GOES),并且DMSP、NOAA卫星和GOES都由美国国家海洋和大气管理局运行。

同时,美国军用气象数据部分来源于盟国卫星。美国通过国际合作,在盟国气象卫星上搭载本国气象卫星的同类载荷,不但提高了时间分辨率,而且实现了功能冗余,提升了体系弹性。如美国在欧洲极轨气象业务卫星(METOP)上搭载了多个美国国家海洋和大气管理局研制的载荷,如先进甚高分辨率辐射计(AVHRR)、先进微波探测器(AMSU)等,这些仪器同时也是美国“诺阿”卫星的有效载荷。

美军下一代极轨气象卫星的研制从20世纪90年代开始,当时出于减少重复开发和节约开支的目的,1994年5月,决定整合军用DMSP卫星系统和民用NOAA系统为军民共用的国家极轨业务环境卫星系统(NPOESS)。但在项目执行过程中将多个世界上最先进的环境载荷集中于一颗卫星上,导致一系列技术和管理问题,出现了严重的经费超标和进度延误,最终于2010年被迫终止,重新恢复到军民系统分别设计

和研制的老路上。

在美国航天体系向弹性和分散体系转型论证中,多种功能于一身的复杂大型NPOESS卫星被作为反面案例多次提及。美国空军于2013年与千年空间系统公司签订合同,开展分散式气象卫星探路者项目(DWSP, disaggregation weather satellite pathfinder)<sup>[26,27]</sup>,目的是深入研究军事气象环境卫星系统,通过分散方式使成本降低,使抗毁能力提升。

#### 4.5 美军继续发展增强GPS系统能力,正在论证转型方案

自1999年提出GPS系统现代化计划,2004年12月发布第2个天基定位、导航与授时系统政策以来,美国一直遵循GPS现代化计划,发展GPS系统,增强GPS系统的能力。

目前,GPS系统采用24+3的基线扩展轨位星座,在轨运行并提供服务的卫星31颗,分别为GPS-2A卫星8颗,GPS-2R卫星12颗,GPS-2RM卫星7颗,GPS-2F卫星4颗。其中GPS-2RM和GPS-2F卫星为现代化改造卫星,具有播发M码军用信号、L2C与L5民用信号和星上信号功率增强能力(GPS-2RM只具有播发M码军用信号、L2C民用信号的能力)。新一代GPS-3卫星处于发展阶段,首颗GPS-3A卫星的发射已经推迟至2015年。按计划,2023—2024年GPS现代化计划将初步完成,届时GPS-3卫星系统将具有提供定位精度0.5 m,授时精度1.2 ns的能力。

从GPS-3卫星开始,该系统被提升为美国关键基础设施的组成部分,更为重视系统抗干扰性能。针对导航信号电磁干扰,增加了区域功率增强能力,针对地面站攻击和测控链路干扰,大幅提升了星座自主运行能力,但卫星应对物理攻击等方面能力较弱,且星座总体成本较高。

为适应美国军用卫星系统转型的要求,满足GPS系统可持续、可承受的发展需求,2012年美国空军授权波音公司、ITT公司SST-US公司开展了GPS小卫星的研究。同时,美国空军授予澳大利亚Locata公司1份合同,开展地面无线电区域导航系统(LocataNET)的测试与验证;DARPA开展了全源定位导航(ASPN)研究,旨在发展非天基军事导航技术,在无GPS或GPS受限条件下提供关键能力。

美国空军于2013年4月向美国国会提交《全球定位系统低成本解决方案》报告,针对军事卫星转型与可持续、可承受的发展问题提出了9个候选方案(表1)<sup>[15,28,29]</sup>。

从表1可以看出,相对于目前的GPS系统现代化计划,9个候选方案的变化有:1)最大的卫星方案也比目前的卫星小,并由1箭1星转向采取1箭双星发射;2)在星座中增加GPS小卫星,即NavSat;3)更高轨道的GPS增强卫星有可能采取搭载方式。

同时,也可以发现美国空军的报告坚持星座规模维持在30颗(或以上),保持6个轨道面。

虽然美国空军尚未就GPS系统未来如何发展做出最后的决策,但增强GPS系统的弹性,降低维持与发展成本是其重要的发展方向。

表1 美国空军提出的9个GPS系统候选方案  
Table 1 9 options of GPS system proposed by US airforce

方案	描述	技术风险/计划 风险	2013—2030年成本估算/ 亿元(2012年美元现值)
1	目前GPS-3卫星计划基线	低/低	230
2	目前GPS-3卫星计划全部能力	低/低—中	250
3	一箭双星发射的GPS-3卫星	低—中/低—中	220
4	一箭双星发射的GPS-3卫星,增强全部民用、军用信号的NavSat卫星 <sup>1</sup>	中/中—高	200
5	一箭双星发射的GPS-3卫星,增强部分民用、军用信号的NavSat卫星	中/中—高	180
6	一箭双星发射的GPS-3卫星,在静止轨道卫星上搭载增强载荷	中/高	210
7	一箭双星发射的GPS-3卫星,增加带有增强载荷的专用静止轨道卫星	中/中—高	220
8	全部由NavSat卫星 <sup>1</sup> 组成星座	高/高	130
9	NavSat卫星星座,增加3颗带有增强载荷的专用静止轨道卫星	高/高	140

注:NavSat卫星为正在研究论证的一种小型导航卫星。

## 5 讨论

### 5.1 弹性和低成本成为美军卫星系统体系发展的新目标

美军卫星系统已经具备较强的功能,基本满足作战需求,在这一背景下,弹性和低成本成为下一代美军卫星系统体系发展所追求的目标。美军在以往的体系发展论证中,把作战效能放在首位,在新空间安全观和美国经济紧缩的背景下,美军将弹性和经济承受性纳入体系评价指标。现代战争的作战方式已由单个武器系统的对抗,逐步发展到体系与体系的对抗,此次弹性和分散战略的提出是美国军事思想的又一次转型,将能力提升、对抗环境下保障体系功能和经济承受性一起考虑是卫星体系化建设的关键评估因素。

### 5.2 根据领域特点,分散方式不同,实现难度不同

1)“系统分解”方式短期难以实现。DARPA于2006年提出的F6计划是这种分散形式的典型代表,F6是一种新的卫星架构方式,其设计思路是将系统功能分解到多个不同的功能模块上,如有效载荷模块、电源模块、控制模块、推进模块、测控模块、数管模块等,这些模块物理分离、自由飞行,通过无线网络联系构成一颗虚拟的大卫星,完成特定的任务。虽然分离模块航天器具有诸多优势,但目前该技术仍处于概念阶段,距离工程实现,存在许多难以逾越的技术困难,诸如集群导航、集群控制、无线能源传输、无线通信等,在现在的技术条件下,不具有发展前途。2013年5月,DARPA已经取消了F6计划<sup>[30]</sup>。

2)“功能分散”方式已具备基础。该方式不具备技术障碍。美军目前采取的军、民、商结合发展模式就是一种功能的分散。美国军事成像侦察和军事气象卫星系统已经形成军民结合的发展方式。在军事通信卫星领域,美军正在论证将AEHF的战略和战术功能分散。但功能分散可能会带来单元成本增加的风险,功能分散的颗粒度与大系统复杂度、成本和系统弹性之间的权衡还需要理论和方法的指导。

3)“载荷搭载”方式正在探索。该方式是功能分散的一

种补充形式,美国已在商业通信卫星上进行了导弹预警载荷的搭载试验,取得了一些经验,也暴露了一些问题。为了获得商业卫星搭载机会,美国军方正在对可提供商业搭载的卫星资源和可选择搭载的军事业务进行深入调查和研究。美军认为常态化利用搭载方式提供军事空间能力至少还需要7~10年的时间。

4)“多轨道分散”方式正在实施。当前多轨道分散主要以提高覆盖为主,但美军正在发展的导弹预警系统和成像侦察系统已经具备了一些多轨道分散的特征。导弹预警系统高轨预警探测卫星与低轨跟踪识别卫星组成综合体系,侦察系统低轨高分辨率成像卫星与高轨区域持续监视卫星组成综合体系,部分功能交叉冗余,具备一定的抗毁弹性。

5)“多域分散”方式正在执行。美国国防部已要求今后所有的空间系统立项都要增加空间能力降低或丧失后的应对方案,包括陆、海、空、网域的备份和替代手段。大力发展“伪卫星”技术、全源导航技术、隐身无人机技术等,与天基系统互为备份,形成能力的多域分散。

### 5.3 美军体系转型战略从战略方针、战术、技术和法律层面对中国提出新的挑战

美国的官方文件已经清晰地描述了其对未来空间安全环境的战略判断、未来军事航天发展的战略方向,其中进一步印证了美国战略东移的企图。

美军体系结构转型是军事航天发展的新阶段,已开始摆脱单纯追求性能的发展阶段,孕育体系结构的变革。新战略的战略方针到战术、技术和法律等多个层面都对中国提出了更加严峻的挑战。

在战略层面,美国的惩罚手段和体系弹性横跨多域、多手段。在战术层面,难以选择最佳的攻击目标,且在军民商、敌我混淆的环境下,如何侦查和判断敌方体系节点和重心提出更高的要求。在技术层面,要对抗多系统、多轨道和多域分散的空间体系,对攻防技术提出了更高和更迫切的要

求。在法律层面,美国努力构建空间军事同盟,捆绑盟国和商业组织利益,混淆军民商系统性质,从而使攻防行动更加复杂。

总之,美军弹性和分散体系转型是美军在军用卫星体系结构完整、性能优越基础上的进一步发展,是军用卫星更高的发展阶段。中国一方面应积极补足体系中仍处于空白的系统,但应该提高敏感性,避免走美国某些项目失败的老路;另一方面应学习国外的创新思维,用新的思维另辟蹊径,解决我们面临的问题,这是从大国向强国转变的关键。

#### 参考文献(References)

- [1] Department of Defense and Office of the Director of National Intelligence. National security space strategy[EB/OL]. [2010-06-28]. [http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/national\\_space\\_policy\\_6-28-10.pdf](http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/national_space_policy_6-28-10.pdf).
- [2] Department of Defense. Resilience of space capabilities[EB/OL]. [2013-11-15]. <http://www.defense.gov/home/features/2011/0111nsss/docs/DoD%20Fact%20Sheet%20-%20Resilience.pdf>.
- [3] 王力波. 美国空间对抗新思维与装备技术发展新动向[J]. 航天电子对抗, 2012, 28(5):13-16.  
Wang Libo. New development of US counterspace strategy and technologies[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2012, 28(5):13-16
- [4] 周润松, 关雷. 美国《国家安全空间战略》初步分析[J]. 国际太空, 2011(4):1-6.  
Zhou Runsong, Guan Lei. Primary analysis on US national security space strategy[J]. Space International, 2011(4): 1-6.
- [5] 王杰华. 体系对抗条件下的攻防对抗新发展[J]. 中国航天, 2012(10): 25-28.  
Wang Jiehua. New development of the attack and defense under the condition of system counterattack[J]. Aerospace China, 2012(10): 25-28.
- [6] Joint Chiefs of Staff. Space operations [EB/OL]. [2013-05-30]. [http://www.fas.org/irp/doddir/dod/jp3\\_14.pdf](http://www.fas.org/irp/doddir/dod/jp3_14.pdf).
- [7] Air Force Space Command. Resiliency and disaggregated space architectures[EB/OL]. [2013-08-30]. <http://www.afspc.af.mil/shared/media/document/AFD-130821-034.pdf>.
- [8] Forrest E. Morgan. Deterrence and first-strike stability in space[R]. Santa Monica, CA: RAND, 2010.
- [9] Ellen Pawlikowski, Doug Loverro, Tom Cristler. Space: Disruptive challenges, new opportunities, and new strategies[J]. Strategic Studies Quarterly Spring, 2012(1): 27-54.
- [10] James P. Finch, Shawn Steene. Finding space in deterrence toward a general framework for "Space Deterrence" [J]. Strategic Studies Quarterly, 2011(4): 10-17.
- [11] GAO. Space acquisitions DoD faces challenges in fully realizing benefits of satellite acquisition improvements [EB/OL]. [2013-08-30]. <http://www.gao.gov/assets/590/589487.pdf>.
- [12] Vanderpoorten J, Cohen J, Moody J, et al. Transformational satellite communications system (TSAT) lessons learned: Perspectives from TSAT program leaders[C]//Military Communications Conference, MILCOM. IEEE, 2012: 1-6.
- [13] Burch R. The case for disaggregation of US MILSATCOM[C]//Military Communications Conference, MILCOM. IEEE, 2011: 2286-2291.
- [14] Titus Ledbetter. Air force decision on disaggregation not expected until 2015[EB/OL]. [2013-11-15]. <http://www.spacenews.com/article/military-space/32405air-force-decision-on-disaggregation-not-expected-until-2015>.
- [15] David Davis. Future space systems enterprise architectures to meet emerging affordability challenges[R]. 2012.
- [16] Marc J. Berkowitzl, Anders A. Kelsey, Gregg Swietek, et al. Space mission resilience[R]. AIAA San Diego CA, 2013.
- [17] Northrop Grumman Aerospace Systems. Military space resiliency: Definition, measurement and application[EB/OL]. [2013-11-15]. [http://www.ndia.org/Divisions/Divisions/Space/Documentsspace\\_NGAS\\_Resiliency\\_White\\_Paper\\_13-1828\\_091613.pdf](http://www.ndia.org/Divisions/Divisions/Space/Documentsspace_NGAS_Resiliency_White_Paper_13-1828_091613.pdf).
- [18] Lockheed Martin Corporation. Resilience space resiliency study[EB/OL]. [2013-08-14][http://www.ndia.org/Divisions/Divisions/Space/Documents/Space\\_forum\\_LM-Resiliency-Study-Final.pdf](http://www.ndia.org/Divisions/Divisions/Space/Documents/Space_forum_LM-Resiliency-Study-Final.pdf).
- [19] Kurt Neuman. Resiliency and disaggregation[EB/OL]. [2013-08-14]. [http://www.ndia.org/Divisions/Divisions/Space/Documents/Space\\_forum-NDIA-Resiliency-Brief-A8XS.pdf](http://www.ndia.org/Divisions/Divisions/Space/Documents/Space_forum-NDIA-Resiliency-Brief-A8XS.pdf).
- [20] Burch R. Measures of resilience for space systems[EB/OL]. [2013-08-14]. [http://www.ndia.org/Divisions/Divisions/Space/Documents/Space\\_forum-Boeing-NDIA-Resilience-Forum-081413-RevA.pdf](http://www.ndia.org/Divisions/Divisions/Space/Documents/Space_forum-Boeing-NDIA-Resilience-Forum-081413-RevA.pdf).
- [21] Spacedaily. SBIRS GEO-2 launches, improves space-based capabilities [EB/OL]. [2013-10-20]. [http://www.spacedaily.com/reports/SBIRS\\_GEO\\_2\\_launches\\_improves\\_space\\_based\\_capabilities\\_999.html](http://www.spacedaily.com/reports/SBIRS_GEO_2_launches_improves_space_based_capabilities_999.html).
- [22] Defense Industry Daily. Despite problems, SBIRS-high moves ahead[EB/OL]. [2013-10-20]. <http://www.defenseindustrydaily.com/date/2013/02/21>.
- [23] Space Based Infrared System. Jane's Space Systems and Industry[R]. 2013.
- [24] Carl F. Schueler. FD-CHIRP: Hosted payload system engineering lessons[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8516: 1-10.
- [25] Matthew Daniels. Quantitative analysis of satellite architecture choices: A geosynchronous imaging satellite example[EB/OL]. [2014-05-30]. [http://spacesymposium.org/sites/default/files/downloads/M.Daniels30th\\_Space\\_Symposium\\_Tech\\_Track.pdf](http://spacesymposium.org/sites/default/files/downloads/M.Daniels30th_Space_Symposium_Tech_Track.pdf).
- [26] Millennium Space Systems. Air force selects millennium to study disaggregated weather satellite system[EB/OL]. [2013-10-20]. <http://millennium-space.com/uploads/docs/MillenniumSpaceWSFAPressReleaseFinal.pdf>.
- [27] Millennium Space. Millennium space completes air force weather satellite design[EB/OL]. [2014-04-28]. <http://www.millennium-space.com/pressreleases/PRDWSPStudyDone.pdf>.
- [28] Jeffrey Hill. AFRL selects exelis to research GPS alternatives[EB/OL]. [2014-05-30]. <http://www.satellitetoday.com/uncategorized/2013/01/23/afrl-selects-exelis-to-research-gps-alternatives>.
- [29] Howard F Marx. Navsat to GPS: The rocky path to success[C]//46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 7-10 January, 2008.
- [30] Warren Ferster. DARPA cancels formation-flying satellite demo[EB/OL]. [2013-10-20]. <http://www.spacenews.com/article/military-space/35375darpa-cancels-formation-flying-satellite-demo>.

(责任编辑 陈广仁)