

doi: 10.7690/bgzdh.2018.06.001

美国红外预警卫星系统发展概述

张万层, 陈 津, 高 原

(中国电子科学研究院战略预警研究所, 北京 100041)

摘要: 为了深入理解红外预警卫星的发展过程及建设水平, 以美国为例, 对红外预警系统进行研究。红外预警卫星系统作为美国反导预警系统重要组成部分之一, 其预警能力直接影响美国反导体系作战效能。从总体上概述美国红外预警卫星系统的发展历程, 重点介绍国防支援计划、天基红外系统、空间跟踪与监视系统研制情况、工作特点、目标探测能力, 进一步基于卫星工具包 (satellite tool kit, STK) 仿真软件分析卫星的部署情况。在此基础上, 总结美国红外预警卫星系统的发展启示。该研究可为我国预警卫星的发展与研究提供参考。

关键词: 红外; 预警卫星; 导弹; STK

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

Development Overview for Systems of US Infrared Early Warning Satellites

Zhang Wanceng, Chen Jin, Gao Yuan

(Institute of Strategic Warning, China Academy of Electronics & Information Technology, Beijing 100041, China)

Abstract: In order to understand the development process and the construction level of the infrared early warning satellites (IEWS), the system of US infrared early warning satellite is researched. The system of IEWS is one part of US anti-missile warning system, and the warning ability directly influences the efficiency of US anti-missile system. The development history of the systems of US IEWS is summarized. The research situation, working feature and ability of object detection of defense support program (DSP), space-based infrared system (SBIRS) and space tracking and surveillance system (STSS) are mainly introduced. Furthermore, the deployment situation of the satellites is analyzed based on satellite tool kit (STK). Based on that, the development enlightenment of US IEWS is summarized. The research can support the domestic early warning satellite development and research with reference.

Keywords: infrared; early warning satellite; missile; STK

0 引言

导弹的飞行过程分为主动段、中段和再入段, 导弹防御系统是通过各型预警装备完成目标飞行过程的协同探测, 为武器系统提供目标预警信息。早期预警是导弹防御的重要环节, 主要由红外预警卫星实现。红外预警卫星通过轨道部署, 覆盖范围广, 能克服地面雷达电波信号沿直线传播受地球曲率的影响, 利用红外探测设备, 探测接收导弹在飞行过程中的红外辐射特征, 发现并跟踪目标, 为远程预警雷达或跟踪制导雷达的搜索提供指引。红外预警卫星对导弹的预警能力是衡量导弹防御系统作战效能的关键指标之一, 直接影响后续的武器系统拦截作战。

预警卫星通常运行在静止轨道或大椭圆轨道上, 部分在低轨轨道, 一般由多颗卫星组成探测网, 可昼夜对地面进行监视, 为国家安全防御提供支持。战时, 可监测发现导弹的发射与运行情况, 及时分

析对方作战意图, 为反导防御系统提供预警支援信息; 平时, 用于监视世界各国的导弹发射实验和航天发射活动, 了解战略武器的发展动向, 便于适时采取相应对策^[1], 同时可以收集各国发射目标特征数据。当今世界各军事强国, 特别是美国尤为重视预警卫星的发展, 建立了较为完善的红外预警卫星系统。

红外预警卫星的载荷及部署直接影响着其预警探测能力。笔者针对美国红外预警卫星系统的发展情况进行概述, 对重点阶段的系统研制状态进行介绍, 并结合 STK 仿真工具分析各阶段卫星部署状态, 为我国预警卫星的发展与研究提供参考。

1 发展概况

美国作为全球军事力量最强大的国家, 一直追求在军事安全领域做到对未知风险的绝对防御。在弹道导弹防御领域, 美国有国家弹道导弹防御

收稿日期: 2018-02-17; 修回日期: 2018-03-25

基金项目: 电子信息装备体系研究国防科技重点实验室基础研究项目 (DXZT-JC-ZZ-2011-015)

作者简介: 张万层(1987—), 男, 河北人, 博士, 工程师, 从事遥感图像目标解译、信息技术研究。

(NMD)系统和战区导弹防御(TMD)系统,部署从近程导弹、中程导弹,一直到远程导弹和洲际导弹的防御。为了弥补陆海基大型雷达受地球曲率影响,进一步提高对导弹目标探测覆盖范围与时效性,美国极力发展天基导弹防御系统,研制部署天基红外预警卫星。

美国自 20 世纪 60 年代开始发射试验型导弹预警卫星,1970 年开始部署工作型预警卫星。经过 50 余年的发展,其导弹预警卫星系统先后经历了“米达斯”(missile defense alarm system, MIDAS)、国防支援计划(defense support program, DSP)和天基红外系统(space-based infrared system, SBIRS)。其中:SBIRS 由高轨道天基红外系统(SBIRS-High)和低轨道天基红外系统(SBIRS-Low)组成;SBIRS-High 包括同步轨道天基红外卫星(SBIRS-GEO)和大椭圆轨道预警卫星(SBIRS-HEO),SBIRS-Low 后来被更名为空间跟踪与监视系统(space tracking and surveillance system, STSS)。美国预警卫星系统发展路线如图 1 所示。

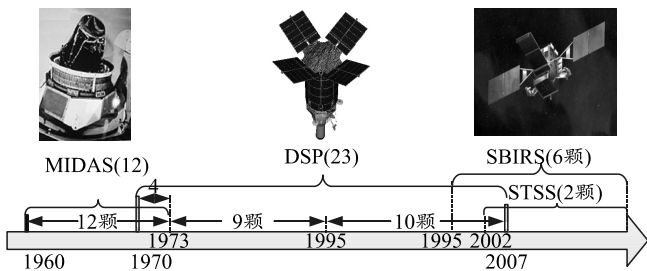


图 1 美国预警卫星系统发展路线

美国实施“米达斯”计划过程中,于 1960 年首次发射预警卫星,并在 1970—1973 年发射了 3 颗“647”卫星,部署在高度为 3 200 km 极地轨道上,主要用于探测前苏联的导弹发射,为拦截作战提供预警信息,后期由于技术水平限制而宣告失败,现主要用于新体制、新模式的试验和探索,为后续的预警卫星提供技术积累。1970 年之后,DSP 逐步代替“米达斯”计划,于 20 世纪 80 年代投入预警任务,并在 1991 年的海湾战争中首次使用。随后,美国为了进一步提升反导作战预警能力,于 1995 年开始提出研制使命任务更多、性能更高的 SBIRS 计划,对 DSP 计划进行改进、代替、升级。

2 国防支援计划(DSP)

DSP 计划是 20 世纪 70 年代初,由美国和加拿大双边签署北美空中防御计划(NORAD)之一。美国 DSP 预警卫星的主要任务是利用红外检测器监视前

苏联等国的地下核试验、弹道导弹与航天器发射活动,重点探测导弹发射主动段的火焰,以及时发现导弹目标和告警,系统主要由预警卫星与地面接收站组成。

DSP 预警卫星自 1970 年发射第一颗预警卫星至 2007 年,共发射了 23 颗卫星,历经 3 代,发射场地均为卡纳维拉尔角空军站。第一代到 1973 年 6 月共发射了 4 颗,第二代到 1987 年 11 月共发射了 9 颗,第三代到 2007 年 11 月共发射 10 颗,各卫星发射时间及运载器如表 1 所示,其中第 1 和第 19 颗因故发射失效。DSP 目前在轨运行 5 颗,其中 3 颗为工作星,2 颗为备用星^[2],运行在地球同步轨道,分别部署在太平洋中部、非洲中部和印度洋上空,几乎形成对低纬度地区的完全覆盖,可重点监视美国周边相关海域潜射弹道导弹发射,以及亚洲与海湾地区相关海域和陆基弹道导弹发射情况(如图 2 所示)。DSP 地面站包括一个位于澳大利亚的海外地面站、一个位于欧洲的地面站,以及美国本土地面站(CGS)和移动地面站(MGT)。

表 1 DSP 发射卫星一览表^[3-4]

| DSP 卫星 | 发射时间 | 运载器 | DSP 卫星 | 发射时间 | 运载器 |
|--------|---------|---------|--------|---------|---------|
| F1 | 1970.11 | 大力神 3C | F13 | 1987.11 | 大力神 34D |
| F2 | 1971.5 | 大力神 3C | F14 | 1989.6 | 大力神 4 |
| F3 | 1972.3 | 大力神 3C | F15 | 1990.11 | 大力神 4 |
| F4 | 1973.6 | 大力神 3C | F16 | 1991.11 | 航天飞机 44 |
| F5 | 1975.12 | 大力神 3C | F17 | 1994.12 | 大力神 4 |
| F6 | 1976.6 | 大力神 3C | F18 | 1997.2 | 大力神 4 |
| F7 | 1977.2 | 大力神 3C | F19 | 1999 | — |
| F8 | 1979.6 | 大力神 3C | F20 | 2000.5 | 大力神 4 |
| F9 | 1981.3 | 大力神 3C | F21 | 2001.8 | 大力神 4 |
| F10 | 1982.3 | 大力神 3C | F22 | 2004.2 | 大力神 4 |
| F11 | 1984.5 | 大力神 34D | F23 | 2007.11 | Delta4 |
| F12 | 1984.12 | 大力神 34D | | | |

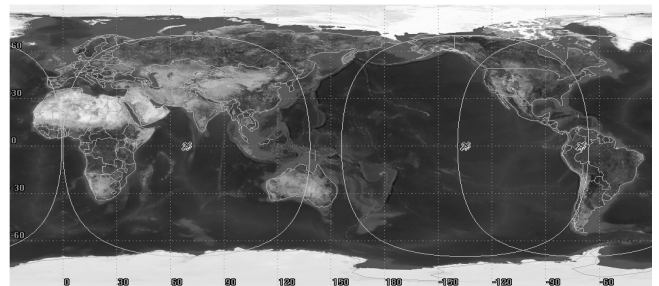


图 2 DSP 分布仿真

DSP 预警卫星工作时采用自旋转的方式,卫星主轴保持对地定向,其红外望远镜轴线与卫星主轴成 7.5°,随着卫星自旋形成圆锥状扫描方式,构成一个立体视角场,自转速度为 6 r/min,其工作方式如图 3 所示。DSP 预警卫星采用双模式探测,主要

探测设备有 2 种：1) 红外望远镜，它每隔 10 s 左右就可对地面 1/3 的区域重复扫描一次，可在导弹发射后 90 s 内探测到红外辐射信号，并发送至地面接收站，然后转送至指挥中心，全程需 3 min；2) 可见光电视摄像机，平时，摄像机每 30 s 可向地面站发送一次图像信息，在红外望远镜发现目标后，转入 1~2 帧/s 的传输模式，为地面站提供导弹火焰图像的运动轨迹。

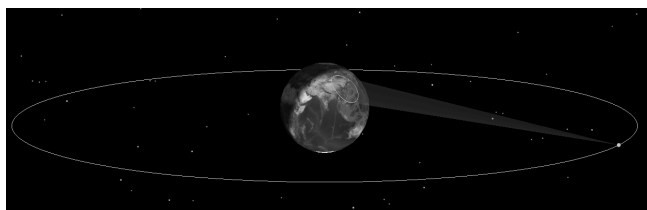


图 3 DSP 扫描模式工作仿真

DSP 预警卫星系统经过多年的发展，在美国弹道导弹防御中发挥了重要作用，可对洲际弹道导弹提供 20 min 以上预警时间。海湾战争中，实现了对“飞毛腿”导弹的探测、跟踪，为作战赢得了时间，是当前唯一在战争中使用的预警卫星系统；此外，美国通过 DSP 收集了大量各国发射飞行器信息。随着技术的发展，DSP 在使用过程中也暴露出问题，DSP 预警卫星部署在静止轨道，探测器对地分辨率不高，目标探测虚警率高，定位能力有限；难以跟踪中段飞行的弹道导弹；针对助推段较短的战术导弹目标发现能力不足；地球两极存在导弹目标覆盖盲区^[5]。针对 DSP 存在的问题，美国不断改进 DSP 系统，增加了地面、海基移动接收站，同时决定进一步研制新的预警卫星系统，并于 1995 年提出天基红外系统方案。

3 天基红外系统 (SBIRS)

作为美国空军研制的新一代天基红外探测与跟踪系统，SBIRS 预警系统主要任务是导弹预警、导弹防御、技术情报获取和空战描述，不仅能够对弹道导弹进行全程监视，而且能对飞行在中段的导弹进行探测识别、跟踪，为反导系统提供目标指示和战场空间态势等信息^[6]。SBIRS 系统主要由天基段和地基段 2 部分组成。天基段分为高轨卫星 (含 SBIRS-GEO 与 SBIRS-HEO) 与低轨卫星 (SBIRS-LEO)，高轨卫星主要用于主动段的侦察与监视，低轨卫星主要用于搜索和跟踪导弹目标中段飞行时的发热弹体和冷再入弹头。SBIRS 系统通过高轨卫星与低轨卫星组网，可实现对战术和战略导弹发射的助推段、中段飞行阶段、再入阶段的全程

探测与跟踪，并达到对目标的全球覆盖。

SBIRS 系统高轨道星座卫星最初预算包括 2 颗大椭圆轨道卫星 (SBIRS-HEO) 和 4 颗静止轨道卫星 (SBIRS-GEO)，主要用于接替 DSP 卫星实现关键战略、战术弹道导弹发射和助推段飞行目标的探测任务，后期根据需要增加了预算与部署。高轨部分发射卫星情况如表 2 所示。

表 2 SBIRS 部署卫星一览表

| SBIRS 卫星 | 发射时间 | 运载器 | 状态 |
|----------|-----------|---------|------|
| HEO-1 | 2006.6.28 | Delta-4 | 服役 |
| HEO-2 | 2008.3.13 | Atlas-V | 服役 |
| HEO-3 | 2014 | — | 完成校验 |
| HEO-4 | 未知 | — | 完成研制 |
| GEO-1 | 2011.5.7 | Atlas-V | 服役 |
| GEO-2 | 2013.3.19 | Atlas-V | 服役 |
| GEO-3 | 2017.1.20 | Atlas-V | 完成发射 |
| GEO-4 | 2018.1.20 | Atlas-V | 完成发射 |
| GEO-5 | 2021 (预计) | — | 研制中 |
| GEO-6 | 2022 (预计) | — | 研制中 |

SBIRS-GEO 目前已经发射 3 颗，其中 GEO-1 于 2011 年 5 月发射并于 2012 年 2 月开始服役，GEO-2 于 2013 年 3 月发射并已开始服役，GEO-3 于 2017 年 1 月 21 日发射成功，目前 GEO-1/2 2 颗卫星分别定位在东经 89° 和东经 21°，重点监视亚欧和非洲^[7]。如图 4 与图 5 所示。美国计划未来几年内再发射 3 颗同步轨道卫星，完成其静止轨道卫星星座构建。SBIRS-GEO 载有高速扫描红外探测器与高分辨率凝视型红外探测器，探测波段均覆盖近红外、中红外和地面可见光。工作时，扫描型红外探测器对早期发射的导弹尾焰进行探测，获取目标后交接至凝视型红外探测器，对目标进行凝视跟踪，实现目标的精确探测。

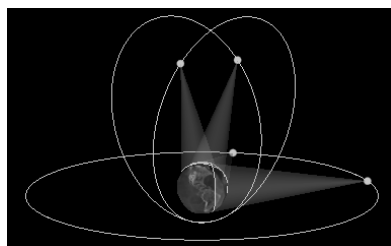


图 4 SBIRS 部分在轨运行卫星 3 维仿真

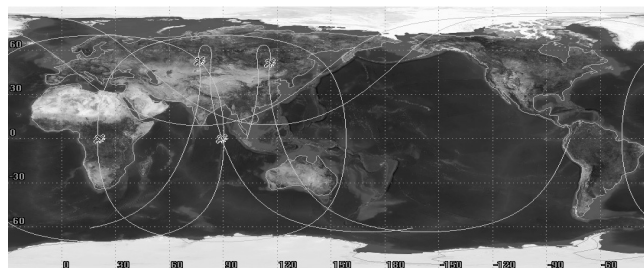


图 5 SBIRS 部分在轨运行卫星覆盖 2 维仿真

SBIRS-HEO 目前已经发射 3 颗:HEO-1 于 2006 年 6 月发射并于 2008 年 11 月开始服役,HEO-2 于 2008 年 3 月发射并于 2009 年 7 月开始服役,HEO-3 于 2014 年搭载卫星神秘发射。HEO 主要负责 GEO 覆盖盲区。据资料显示^[8-9],HEO 采用闪电型轨道(molniya orbit),扩展了 GEO 在地球两极的覆盖能力,轨道远地点位于北半球,增加了 SBIRS 对北半球高纬度地区如俄罗斯本土和中国北部,尤其是北极附近区域洲际导弹和潜射导弹发射的监视时间;另外,每颗 HEO 卫星可观察北极地区时间不小于 12 h,通过 2 颗高轨道卫星的交替工作,可实现对北半球高纬度地区的全天 24 h 持续监视。HEO-1/2 空间分布与覆盖如图 4 与图 5 所示,在远地点附近卫星探测范围几乎覆盖我国全境,威胁较大。

通过静止轨道卫星与大椭圆轨道卫星的协同工作,SBIRS 系统相对于 DSP 系统实现了目标的全球覆盖;在探测装备方面,SBIRS 卫星系统红外探测器的扫描速度和灵敏度提高了 10 倍以上,同时具备“See-to-Ground”探测能力,可穿越云层发现目标,能在导弹发射 10~20 s 内将预警信息快速传送至地面控制系统(DSP 系统需要 60~90 s)。

SBIRS 系统除天基卫星之外,还包括一系列地面站设施:主要有美国本土的地面控制站(MCS)、备份任务控制站(MCSB)、抗毁任务控制站(SMCS);海外中继地面站(RGS)、抗毁中继地面站(SRGS);多任务移动处理系统(M3P)以及相关通信链路;训练、发射和支持性基础设施;重要地面站设立在伯克利空军基地^[10]。美国地面站建设过程大致可分为 3 个阶段:1)以 DSP 数据接收处理和使用为主,并将对战区的攻击和发射早期报告地面站联合为一个本土任务控制站;2)保留 DSP 卫星所要求功能,以满足 SBIRS 系统高轨卫星信息处理的战略要求为重点,开展相关软件与硬件的改造升级;3)重点开展 SBIRS 系统低轨道卫星信息接收与处理功能研制部署。

4 空间跟踪与监视系统(STSS)

空间跟踪与监视系统(STSS),即原来的“SBIRS-Low”计划,2001年由美国空军转交至国家导弹防御局并于 2002 年重新命名,该系统最早源于美国“慧眼”(brilliant eyes)计划,已于 2009 年发射了轨道高度为 1 350 km 的 2 颗验证卫星(STSS-Demo),预计部署卫星 24 颗。STSS 系统主

要定位于执行对弹道导弹飞行中段的精确跟踪任务,同时具备弹头、诱饵、碎片的识别能力,为拦截武器提供目标引导信息,通过与高轨道部分的协同探测,可实现全球范围内导弹目标的跟踪监视,拓展了对飞行目标的覆盖范围。目前,STSS 项目受研制经费与技术条件限制,后续计划尚未被美军正式采办。

STSS 系统工作过程中,通过装载宽视场扫描探测器(捕获模式)和窄视场凝视探测器(凝视模式)发现跟踪目标。宽视场扫描探测器主要用于快速发现地平面以下的弹道导弹尾焰,随后将探测结果发送至地面站与高轨道卫星,并传递至窄视场凝视探测器继续跟踪;窄视场凝视探测器使用窄视场、大口径望远镜,具有多光谱与可见光探测能力,可以对助推器燃尽后的母舱弹头等冷目标进行探测,实现导弹中段与再入段的跟踪监视;此外,窄视场凝视探测器具有辨弹头、弹头母舱、轻重光学雷达诱饵的能力,利用探测目标的面积与温度,可支撑对目标的弹头、碎片识别。STSS 系统在对目标跟踪过程中,利用 4 颗卫星协同探测,可实现对目标的精确定位,通过与 SBIRS 系统配合,可到达对目标飞行全过程的跟踪监视,并将目标坐标位置快速传送至陆海基雷达探测系统,为作战提供充分的时间,提高拦截效果。

在轨道部署方面,现公开资料多认为 STSS 系统卫星轨道可部署在 1 600 km 左右太阳同步轨道^[11-12],卫星星座结构极可能采用 Walker 星座类型,该星座由高度相同的圆轨道卫星构成。根据资料分析^[11],STSS 星座采用 Walker 星座构型,轨道倾角为 102.49°,部署 24 颗卫星时,最可能分布于 3 个不同的轨道面内^[13],基于以上参数,通过 STK 仿真其轨道运行如图 6 与图 7 所示,通过低轨卫星组网可实现对全球的覆盖,达到目标发射即发现的目的。

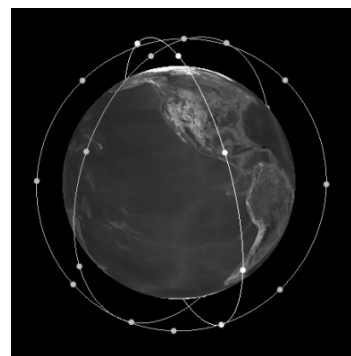


图 6 STSS 系统 Walker 星座 3 轨道平面 3 维仿真

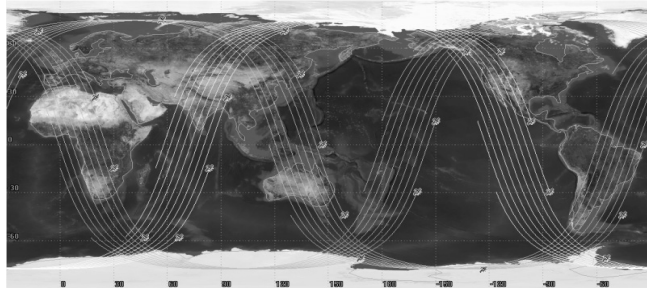


图 7 STSS 系统 Walker 星座 3 轨道平面 2 维仿真

5 发展启示

美国红外预警卫星系统经过近 60 a 迭代发展，其系统发展过程主要呈现以下特点。

1) 高低轨有序发展，并以高轨为主。根据系统能力由弱到强，美国优先发展高轨卫星，统筹部署静止轨道与大椭圆轨道卫星，积极研制低轨卫星并设计卫星组网探测；卫星部署位置由高轨至低轨，目标探测过程由助推段探测逐步形成全程监视，空间覆盖范围由低纬度发展至高纬度与全球区域，目标探测能力由发现监视至跟踪与识别。

2) 统筹天基段与地基段协同发展。美国红外预警卫星迭代发展提升能力，瞄准实现全球覆盖，同时统筹地面段本土与海外建设，根据不同阶段卫星能力需求，开展地面站软件、硬件更新升级，逐步实现数据的接入与管理，为作战提供支撑。

3) 探测模式多样化。在探测手段上，美国红外预警卫星通常载有搜索模式探测器与凝视模式探测器：搜索模式探测器可实现目标的快速发现，具有覆盖范围广的特点，并可引导凝视模式探测器对目标跟踪监视；凝视模式探测器具有窄视场、高分辨率的特点，具备目标的精确跟踪与识别能力，可提供目标指示信息。

6 结束语

笔者对美国红外预警卫星的发展历程进行了介绍，重点分析了不同时期红外预警系统的研制情况、

部署状态和工作特点。美国通过高低轨卫星系统协同工作，传感器探测能力逐步迭代升级，天基与地基协调推进，最终实现对导弹目标的全程、高性能监视。我国预警卫星系统的发展相对于美国还有差距，但通过吸取美国红外预警系统发展的经验与教训，结合国内系统建设特点，发挥自身空间探测优势力量，循序渐进，就可构建符合我国发展需求的天基红外预警系统，并可积极发展反卫星技术提升对空间目标的威慑能力。

参考文献：

- [1] 张乐伟, 陈桂明, 薛东林. 导弹预警卫星概述[J]. 战术导弹技术, 2011, 7(4): 117-121.
- [2] 赵秋艳. 国外的预警卫星系统[J]. 航天返回与遥感, 1998, 18(4): 26-29.
- [3] 刘兴, 梁维泰, 赵敏. 一体化空天防御系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 41-43.
- [4] 浦甲伦, 崔乃刚, 郭继峰. 天基红外预警卫星系统及其探测能力分析[J]. 现代防御技术, 2008, 36(4): 68-61.
- [5] 王群. 美国新一代导弹预警卫星系统及其能力分析[J]. 国防科技, 2012, 33(2): 7-12.
- [6] 付伟. 美国天基红外预警系统的发展现状之二[J]. 兵工自动化, 2002, 21(1): 21.
- [7] 李悦, 李健良, 房莹. 2015 美军军用卫星现状和发展特点浅析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(6): 667-674.
- [8] 胡磊, 闫世强, 刘辉, 等. 美国 HEO 预警卫星覆盖性能分析[J]. 装备学院学报, 2013, 24(3): 76-80.
- [9] 毛艺帆, 张多林, 王路. 美国 SBIRS-HEO 卫星预警能力分析[J]. 红外技术, 2014, 36(6): 467-470.
- [10] 邢强. 美国天基红外导弹预警卫星的 8 个问题[EB]. <http://dy.163.com/v2/article/detail/CCPTUDK605179FQK.html>.
- [11] 余二永, 徐学文. STSS 星座空间覆盖性能分析方法研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(6): 103-106.
- [12] 郭松, 贾成龙, 陈杰. 美国 STSS 卫星有效载荷主要指标探讨[J]. 上海航天, 2012, 39(3): 28-41.
- [13] 宋伟, 邵立, 汪亚夫. 空间跟踪与监视系统卫星星座设计研究[J]. 战术导弹技术, 2012, 3(2): 31-35.