

# 美国“下一代过顶持续红外”(OPIR)预警卫星研究进展\*

王久龙,王潇逸,胡海飞,蔡盛

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

**摘要:**美国天基预警卫星系统是导弹防御系统的重要组成部分,对其发展现状和能力的研究具有重要意义。为了支撑我国天基光学预警相关领域的基础研究和工程研制,在分析了美国国防支援计划(defense support program, DSP)和天基红外系统(space-based infrared system, SBIRS) 2代天基预警卫星的发展历程、系统构成以及主要问题的基础上,综述了美国“下一代过顶持续红外”(overhead persistent infrared, OPIR)预警卫星的若干研究进展和成果,详细总结了其在星座规划、传感器有效载荷研制、地面数据处理系统以及数据标准规范4个方面的研究现状,并建议从构建目标红外图像数据集、研制宽视场任务数据处理算法、发展搜索跟踪一体化大面阵载荷技术、加强卫星近场感知防御等方面给予重点研究。

**关键词:**预警卫星;天基红外系统;过顶持续红外;传感器有效载荷;地面系统;数据标准

doi:10.3969/j.issn.1009-086x.2022.02.003

中图分类号:V474.2;TJ01 文献标志码:A 文章编号:1009-086X(2022)-02-0018-08

## Research Progress of the US "Next Generation Overhead Persistent Infrared" (OPIR) Early Warning Satellite

WANG Jiu-long, WANG Xiao-yi, HU Hai-fei, CAI Sheng

(Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Jiling Changchun 130033, China)

**Abstract:** The U.S. space-based early warning satellite system is an important part of the missile defense system, and the research on its development status and capabilities is of great significance. In order to support China's fundamental research and engineering development on space-based optical early warning, the research progress and achievements of the US "next generation overhead persistent infrared" (OPIR) early warning satellite are reviewed based on the analysis of the development history, system composition and main issues of the two generations of space-based early warning satellites of the US defense support program (DSP) and space-based infrared system (SBIRS). The research status of constellation planning, sensor payloads development, ground data processing system, OPIR data standardization is summarized in detail. It is suggested that the research should focus on building the target infrared image data set, developing wide-field of view (WFOV) data processing algorithms, developing search and tracking integrated large area array payload technology, strengthening satellite near-field perception and defense.

**Keywords:** early warning satellite; space-based infrared system; overhead persistent infrared; sensor payloads; ground system; data standard

\* 收稿日期:2021-08-18;修回日期:2021-10-08

基金项目:中国科学院青年创新促进会会员资助项目(2019226);吉林省自然科学基金(20200201170JC)

第一作者简介:王久龙(1990-),男,山东临沂人。博士生,主要从事光电对抗系统仿真与评估、空天预警等研究。

通信地址:130033 吉林省长春市南关区东南湖大路3888号 E-mail:wangjiulong@ciomp.ac.cn

## 0 引言

由静止轨道、大椭圆高轨道、低轨道卫星以及组成的天基预警平台,因理论上具备覆盖全球范围的目标探测能力,成为美国、俄罗斯和中国等竞相发展的新一代预警技术<sup>[1-3]</sup>。预警卫星作为监视、探测、发现和跟踪敌方战略导弹的重要手段,在战略防御系统中起到重要的作用<sup>[4]</sup>。美国预警卫星系统研制开始于20世纪50年代,为了能够探测到苏联弹道导弹的发射,美国研制并部署了国防支援计划(defense support program, DSP)预警卫星<sup>[5]</sup>,即美国的第1代天基预警卫星,卫星部署在地球同步轨道。截止到2007年,DSP卫星经历了5个发展阶段,先后发射23颗卫星,目前仍有2颗在轨服役。DSP主要问题包括:①不能跟踪中段飞行的导弹;②卫星的数据处理对国外设站的依赖性大;③星上的红外探测器扫描速率低、频段少、虚警率高;④扫描速度慢,对战区导弹无法有效预警;⑤探测器的灵敏度和分辨率较低;⑥没有凝视相机,无法对弹道导弹目标进行高精度跟踪。为解决DSP暴露的问题,美国于1992年开始了天基红外系统(space-based infrared system, SBIRS)<sup>[6]</sup>的研制。SBIRS卫星装有扫描型和凝视型2种探测器,扫描型探测器负责快速搜索卫星覆盖区域内特定红外特征目标,发现目标后,扫描型探测器与凝视型探测器进行任务交接,由凝视型探测器进行红外目标的精跟踪,获取详细信息<sup>[7]</sup>。SBIRS系统问题包括:①系统弹性和抗毁能力不足,不具备对各种软硬杀伤手段的防御能力;②不适应新型空天威胁目标的发展,不能满足未来导弹防御作战的需要;③系统昂贵,建造耗时,转型困难;④采用“线阵扫描+小面阵跟踪”的技术,不能有效适应实现多域多目标预警跟踪。

为瞄准未来太空作战,以应对新出现的和预期的威胁,美国空军提出了“下一代过顶持续红外”(next-generation overhead persistent infrared, NG-OPIR)预警卫星计划,通过“采用成熟的卫星平台+重点关注传感器技术”的方式,有效降低导弹预警卫星的作战目标价值,从而获得更高的生存概率<sup>[8]</sup>。此外,“相对简单廉价”的预警卫星,在战时也能够大量制造和快速部署,补充和维持天基导弹预警能力,增强导弹预警卫星的体系弹性。

## 1 OPIR概述

### 1.1 星座构成

美国空军在2018年启动了“下一代过顶持续红外”预警卫星项目,是美国在继DSP,SBIRS之后规划的新一代高轨预警卫星系统,由美国情报机构和国防部共同负责运营,其主要作用是为美国及其盟国提供洲际弹道导弹发射、潜射弹道发射和战术导弹发射的预警能力,并通过改进导弹预警能力,实现对新出现威胁的探测和跟踪。OPIR由天基传感器和地面数据处理站组成,它们协同组网工作,可持续或近乎连续地收集来自太空的可见光、近红外、短波红外和中波红外的能量,并将之处理后产生红外图像,支持导弹预警、导弹防御、技术情报和战场空间感知等领域任务<sup>[9]</sup>。

2019财年预算提案要求取消SBIRS-GEO7和GEO8的研制计划,并将相关经费投入到OPIR星座建设中,星座规划了5颗卫星,3颗在地球同步轨道上,2颗在极地轨道,如表1所示。

表1 OPIR星座组成  
Table 1 OPIR constellation

卫星编号	年份	轨道
OPIR-GEO 1(NGG 1)	2025	地球同步轨道(GEO)
OPIR-GEO 2(NGG 2)	202x	地球同步轨道(GEO)
OPIR-GEO 3(NGG 3)	20xx	地球同步轨道(GEO)
OPIR-Polar 4(NGP 4)	2027	大椭圆轨道(HEO)
OPIR-Polar 5(NGP 5)	20xx	大椭圆轨道(HEO)

### 1.2 研制计划

2018年美国空军选择洛克希德·马丁公司和诺斯罗普·格鲁曼公司作为OPIR项目的主要承包商<sup>[10]</sup>。其中,洛克希德·马丁公司获得了超过30亿美元的独家承包合同,用于研发和生产3颗GEO卫星,首颗卫星预计2025年发射;诺斯罗普·格鲁曼获得23亿美元合同,用于研发和生产2颗HEO卫星,首颗卫星预计2027年发射。2029年完成5颗卫星组网,补充现役SBIRS系统,为美国及其盟友提供弹道导弹及战术导弹的早期预警功能。OPIR预警系统由高轨卫星、极轨卫星以及地面系统共同组成,如图1所示。

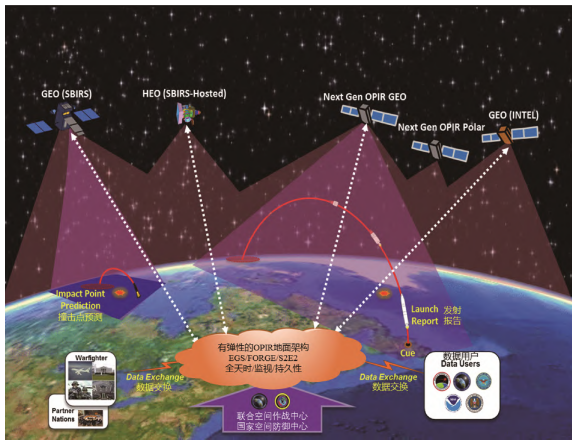


图1 OPIR预警系统示意图

Fig.1 OPIR early warning system schematic diagram

在 OPIR 的 Block-1 阶段,美国积极寻求基于创新技术构建新体系,旨在提升体系抗毁能力,并力争 2030 年完成业务星部署。OPIR 主要在以下几个方面增强系统能力:①利用大面阵技术实现多域多目标预警跟踪能力;②将预警对象扩展到高超武器;③增强全球红外事件的感知能力;④利用轨道设计增加燃料携带,增强系统的机动能力。OPIR 完成部署并投入实战应用中后(如图 2 所示),将直接在战略和战术层面支持反导作战,将对“导弹中心战”带来极大的影响。

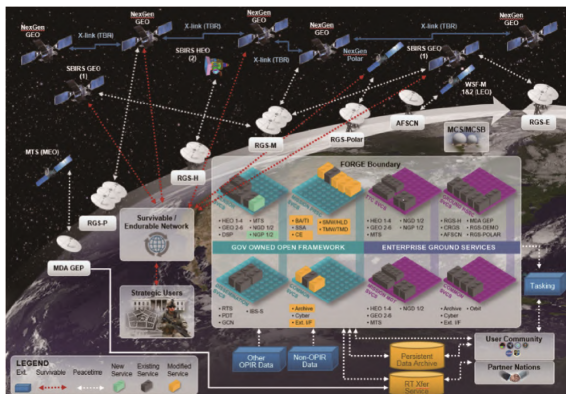


图2 OPIR完整的体系架构

Fig.2 OPIR complete system architecture

## 2 有效载荷研制

### 2.1 整体进展

OPIR 采用超大面阵多波段红外阵焦平面探测器,不仅能探测跟踪大型弹道导弹的发射,还能探测和跟踪小型地空导弹、助推滑翔及吸气式高超声速武器,甚至空空导弹的发射。美国空军要求洛克

希德·马丁公司和诺斯罗普·格鲁曼公司竞争性地研制下一代 OPIR 卫星传感器载荷,以减轻 2025 年首次发射地球同步轨道卫星面临的时间表问题。在 Block 0 阶段 NGG 卫星的有效载荷研制由 Raytheon Intelligence & Space 和 Northrop Grumman-Ball Aerospace 2 家公司承包<sup>[11]</sup>,分别设计、制造、组装、集成和交付 1 台任务载荷,用于前 2 颗地球同步轨道预警卫星。截止到 2020 年 5 月,2 个候选载荷已经完成初步设计审查,并到达空军的指标要求,预计 2023 年研制完成。2021 年 5 月,美国太空与导弹系统中心(space and missile systems center, SMC)与雷神公司、千禧空间系统公司(millennium space systems)签订了导弹跟踪托管原型(MTCP)设计数字模型合同,使政府能够在数字环境中自动化整合和连接多个承包商的模型,从而在建造下一代 OPIR 预警卫星之前,用数字模型测试传感器载荷的设计是否满足导弹预警的需求<sup>[12]</sup>。

### 2.2 WFOV 项目

为了保障 OPIR 预警卫星星座的建设,太空与导弹系统中心启动了 WFOV(wide-field of view)<sup>[13]</sup>卫星的研制。WFOV 只是一颗试验卫星,不属于导弹预警卫星星座的一部分,主要任务是评估 OPIR 广域 6°凝视传感器的技术状态,为空军太空司令部降低下一代导弹预警卫星的研制风险。传感器载荷由 L3 哈里斯(L3 Harris technologies)公司根据单独合同研制,安装在千禧空间系统公司提供的卫星总线上,WFOV 重约 1 000 kg,大概相当于 SBIRS 卫星的 1/4,原计划 2021 年通过美国空军 USSF-12 任务发射至地球同步轨道,但据最新资料表明,执行 USSF-12 任务的 Atlas-5 型运载火箭将于 2022 年第 1 季度发射。

### 2.3 SBIR 项目

2016 年,美国国防部在 SBIR 网站发布 WFOV 任务数据处理算法研发项目<sup>[14]</sup>,旨在开发和测试用于“下一代过顶持续红外”的 WFOV 任务数据处理算法,实时处理来自 GEO 轨道上的帧率低于 10 Hz 的 4 k×4 k 的大面阵数据。该项目分为 3 个阶段实施:第 1 阶段完成算法原型设计,进行算法平铺和加窗、噪声抑制、抖动抑制、杂波抑制、阈值和缓冲设计;第 2 阶段基于载荷的实时 WFOV 数据进行测试,并根据结果更改和调整算法;第 3 阶段是 2021 年完



成算法认证,并将其转换到WFOV任务控制系统中。同时,早在2011年第1个用于过顶持续红外的商业载荷<sup>[15-16]</sup>搭载演示验证星发射到地球同步轨道,用于验证基于商业载荷构建和集成大视场传感器的能力,并以此了解WFOV凝视载荷红外原理及量化WFOV的性能水平。

### 3 地面数据处理系统

SBIRS团队和雷神公司针对OPIR地面数据处理系统的建设分别提出了不同的方案。

#### 3.1 SBIRS团队方案

为了适应战场空间态势感知快速变化的挑战,2016年,SBIRS团队提出了一种基于开放系统架构(open system architecture, OSA)的模块化、层次化、自适应的OPIR地面应用开发框架<sup>[17]</sup>,支撑多任务、多传感器的战场态势感知任务。SBIRS团队认为OPIR的任务领域不断扩大,对OPIR数据的扩张性需求和战场空间态势感知任务的动态特性正在推动地面处理系统进行重大变革,图3展示了OPIR支持的导弹警告和不断演变的任务域。



图3 OPIR任务领域

Fig.3 OPIR mission area

传统框架下,不同的组件之间需要设计特定的接口,通过开发、测试后再集成到大系统中;而OSA框架采用开放的、标准的统一编程接口,不需要开发特定组件接口,具有可移植性和可剪裁性特点,可便于快速部署新业务。基于OSA的框架不仅能够加强导弹防御和预警,还能够快速响应作战需求的变化,可高效部署业务系统进行数据处理。

#### 3.2 雷神公司方案

2020年1月28日,雷神公司获得美国空军为期

5年的1.97亿美元合同,用于设计OPIR地面数据处理系统,该项目被称为“未来作战弹性地面演进计划”(future operationally resilient ground evolution, FORGE)<sup>[18]</sup>,取代SBIRS地面数据处理系统,计划在2024财年投入运营。FORGE本质上是一个开放的架构,具有可扩展、可伸缩以及灵活的特点,可基于该平台开发特定的应用程序,其主要任务是向五角大楼和国家指挥机构发出导弹警告,也支持民用应用开发,如图4所示。

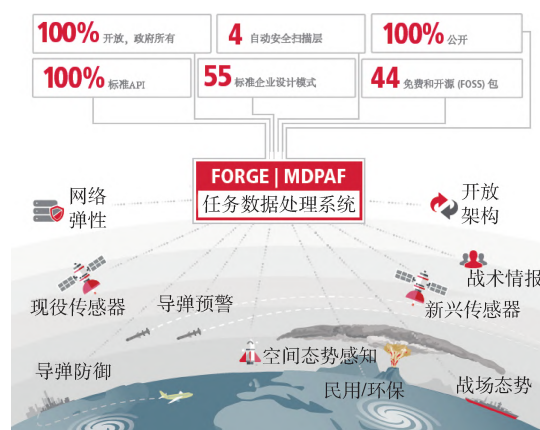


图4 FORGE开放的任务数据处理系统

Fig.4 ORGE open task data processing system

FORGE分为指挥与控制、任务数据处理和中继地面站3部分,原型系统包括非机密数据处理平台、机密数据处理平台、可扩展性测试平台。美国太空与导弹系统中心(SMC)表示将采用“敏捷方式”开发FORGE地面系统,以迭代、循序渐进的方式跟踪进度,可对开发过程中出现的任务问题进行调整和处理,降低项目失败的风险,确保FORGE成为未来以及下一代OPIR地面处理系统的最佳解决方案<sup>[19]</sup>。SMC正在使用2个开放框架架构改进国防部的OPIR数据处理,分别是系统框架(system architecture)和任务框架(mission architecture),开放架构使SMC能够:①更加高效地增加载荷和航天器;②快速且低成本地集成新功能;③支持作战人员不断变化的需求,确保作战的连续性。图5是FORGE原型系统架构。

### 4 数据标准规范

为制定预警卫星数据标准规范,美国战略司令部、联合部队太空组成部队指挥官和国家地理空间

情报局联合成立“过顶持续红外专业组”，负责制定开放的 OPIR 数据标准<sup>[20]</sup>，以支持导弹预警、导弹防御、作战环境感知、技术情报以及民用/环境任务等领域。OPIR 数据处理级别分为 5 级，0 级表示原始

传感器数据，5 级表示技术情报产品。其中，3 级数据(图 6)。表示原始 OPIR 数据被部分处理，但不是最终情报产品或二次可利用的产品。3 级数据典型返回值(rep return)包含概念数据模型、逻辑数据模

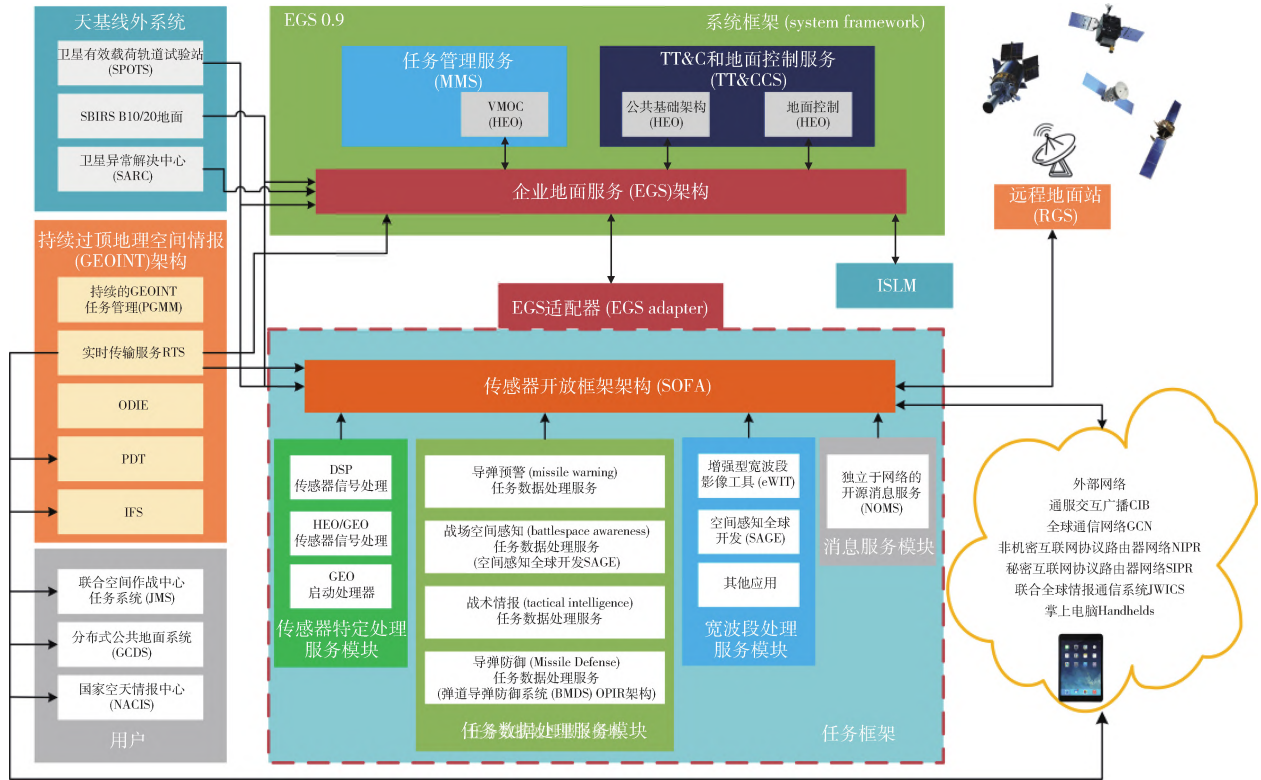


图 5 FORGE 原型系统架构  
Fig.5 FORGE prototype system architecture

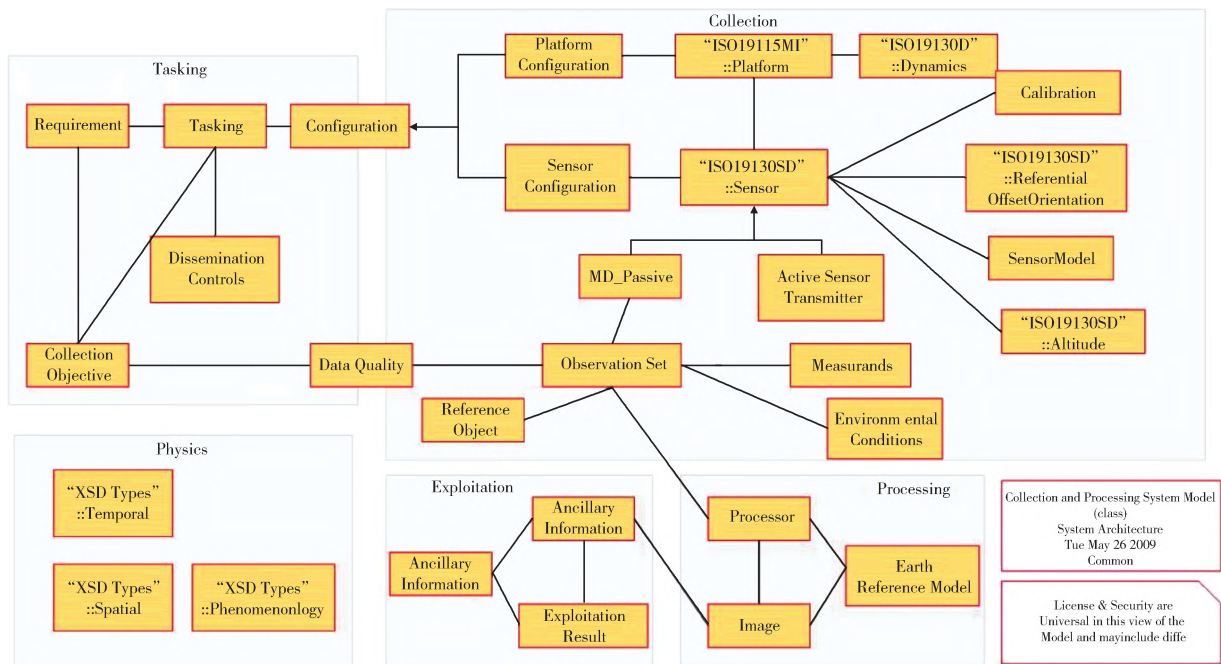


图 6 OPIR 概念数据模型  
Fig.6 OPIR conceptual data model

型和相关数据字典定义。逻辑数据模型有许多实体,用于描述 OPIR 平台和传感器属性,包括视场、视轴以及从传感器收集和处理的的数据。数据字典描述了每个实体中包含的属性和值的单位。

述了 OPIR 3 级数据的逻辑模型,包括实体、属性和关系,用以完整描述典型返回值的标准规范,该模型正在扩展以支持 1 级和 4 级数据,称为联合 OPIR 数据模型。

图 6 描述了 OPIR 3 级数据的概念模型,图 7 描

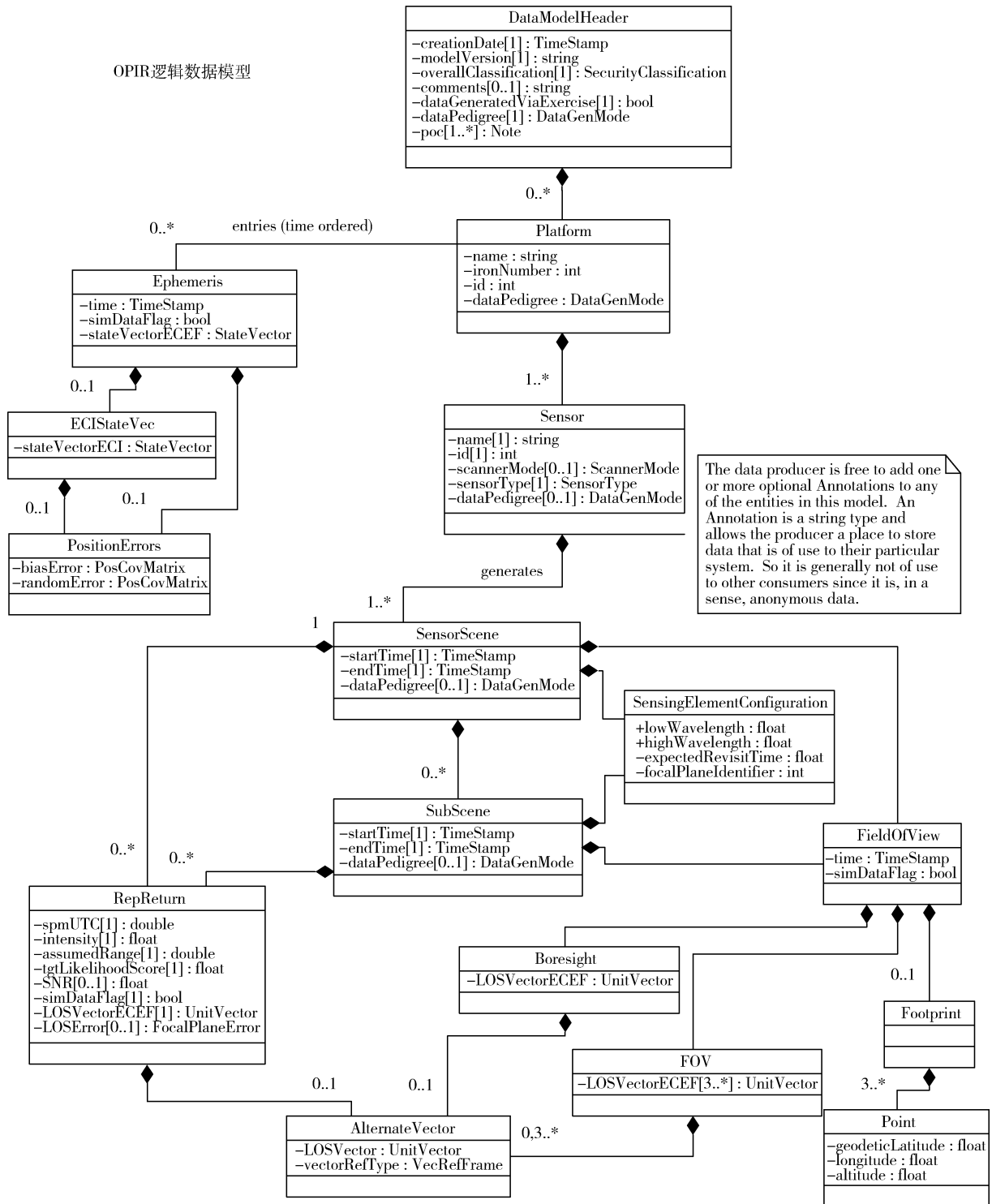


图 7 OPIR 逻辑数据模型  
Fig.7 OPIR logical data model



## 5 总结与建议

美国“下一代过顶持续红外”预警卫星强化了高轨红外探测能力,将导弹预警扩展到全域的导弹、高超武器等“从生到死”的探测、跟踪和威胁评估,可快速应对全世界各地出现的新威胁。轨道由最初的地球静止轨道到结合大椭圆轨道再到高低轨组网配合的方向发展;探测方式也由单一的“线阵扫描”向“扫描+凝视”以及未来的“超大面阵凝视”方向发展;研制方式也由最初的费用高、研制周期长的单个大卫星方式转向低成本、模块化的小卫星研制方式发展。

对未来我国导弹预警卫星的研制与规划来说,首先,必须构建弹性和分散化的太空体系结构,采用高、低轨结合的部署方式,在 GEO 和 HEO 高轨道部署大型卫星,低轨方面充分利用商业卫星发展成果,构建大规模、低成本的小卫星星座;其次,重点发展搜索、跟踪一体化大面阵载荷技术,研究宽视场任务数据高性能处理算法,构建高质量、可扩展的目标红外图像数据集,提高强对抗条件下星上数据处理的有效性,实现发现即跟踪,应对新的威胁;最后,为提升高轨预警卫星战时生存能力,应积极发展卫星近场感知与机动规避等防御技术。总之,在建设预警系统时应该着眼于具体需求,力图构建兼顾战略战术要求,以战术应用为主的天基预警系统。

### 参考文献:

- [ 1 ] 刘尊洋,陈天宇. 临近空间高超声速飞行器预警探测系统探索[J]. 现代防御技术, 2020,48(6):89-95.  
LIU Zun-yang, CHEN Tian-yu. Exploration of Early Warning System for Near Space Hypersonic Vehicle [J]. Modern Defence Technology, 2020, 48 ( 6 ) : 89-95.
- [ 2 ] 范晋祥. 美国弹道导弹防御系统的红外系统与技术的发展[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(5): 536-540, 550.  
FAN Jin-xiang. Status Quo and Trend of Infrared System and Technologies for America's Ballistic Missile Defense System [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(5): 536-540, 550.
- [ 3 ] 肉孜麦麦提,刘辉,王树文,等. 分析俄罗斯导弹预警卫星工作状态[J]. 现代防御技术, 2019, 47(5): 29-35, 142.
- [ 4 ] ROUZI Maimaiti, LIU Hui, WANG Shu-wen, et al. Analyze the Working Status of Russian Missile Early Warning Satellite [J]. Modern Defence Technology, 2019, 47(5): 29-35, 142.
- [ 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): 68-72.  
PU Jia-lun, CUI Nai-gang, GUO Ji-feng. Space-Based Infrared System and the Analysis of Its Detecting Capability [J]. Modern Defence Technology, 2008, 36 ( 4 ) : 68-72.
- [ 5 ] 叶庆,汪亚夫,邵立,等. DSP预警卫星探测能力评估[J]. 光电工程, 2010, 37(6): 65-72.  
YE Qing, WANG Ya-fu, SHAO Li, et al. Detectability Evaluation of DSP Early-Warning Satellite [J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(6): 65-72.
- [ 6 ] ANDREAS N S. Space-Based Infrared System (SBIRS) System of Systems[C]// IEEE Aerospace Conference Proceedings 4, 1997, 4: 429-438.
- [ 7 ] 李小将,金山,廖海玲,等. 美军 SBIRS GEO-1 预警卫星探测预警能力分析[J]. 激光与红外, 2013, 43(1): 3-8.  
LI Xiao-jiang, JIN Shan, LIAO Hai-ling, et al. Analysis on Infrared Detecting and Early Warning Capabilities of America's SBIRS GEO-1 Satellite [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(1): 3-8.
- [ 8 ] 王云萍. 美国天基红外导弹预警技术分析[J]. 光电技术应用, 2019, 34(3): 1-7.  
WANG Yun-ping. Analysis of Space-Based Infrared Missile Warning System in America [J]. Electro-Optic Technology Application, 2019, 34(3): 1-7.
- [ 9 ] KRUEGER M R. A Comparison of Detection and Tracking Methods as Applied to OPIR Optics [R]. Naval Postgraduate School Monterey CA, 2014.
- [ 10 ] BRIAN W. Everstine. Lockheed Receives Up to \$4.9 Billion for Next-Gen OPIR Satellites [EB/OL]. (2021-01-05) [2021-08-18]. <https://www.airforcemag.com/lockheed-receives-up-to-4-9-billion-for-next-gen-opir-satellites/>.
- [ 11 ] Lockheed Martin. Lockheed Martin Selects Industry Mission Payload Providers for Next-Gen OPIR Missile Warning System [EB/OL]. (2018-10-04) [2021-08-18]. <https://news.lockheedmartin.com/2018-10-04->

- Lockheed-Martin-Selects-Industry-Mission-Payload-Providers-for-Next-Gen-OPIR-Missile-Warning-System.
- [12] Space and Missile Systems Public Affairs. USSF Awards Missile Track Custody Prototype Effort [EB/OL]. (2021-05-26) [2021-08-18]. <https://www.losangeles.spaceforce.mil/News/Article-Display/Article/2634839/ussf-awards-missile-track-custody-prototype-effort/>.
- [13] Gunter's Space Page. WFOV [EB/OL]. (2017-10-07) [2021-08-18]. [https://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/wfov.htm](https://space.skyrocket.de/doc_sdat/wfov.htm).
- [14] SBIR. Algorithm Development for WFOV Mission Data Processing [EB/OL]. (2016-01-11) [2021-08-18]. <https://www.sbir.gov/node/870311>.
- [15] LEVI A, SIMONDS J, GRUBER C. CHIRP Technology Demonstration Project [C]//AIAA SPACE 2011 Conference & Exposition. Anaheim, California: 2011: 7333.
- [16] SCHUELER C F. FD-CHIRP: Hosted Payload System Engineering Lessons [C]//Remote Sensing System Engineering IV. International Society for Optics and Photonics, San Diego, California: 2012, 8516: 851607.
- [17] CLARK B, LUCE K, ONORATO K, et al. Developing an Adaptive OPIR Exploitation Framework [C]//32nd Space Symposium, Technical Track, Colorado Springs, Colorado, USA. Space Foundation, Colorado Springs, Colorado, 2016.
- [18] Sandra Erwin. Raytheon Wins Air Force Contract for Ground System to Process Missile Warning Satellite Data [EB/OL]. (2020-01-28) [2021-08-18]. <https://spacenews.com/raytheon-wins-air-force-contract-for-ground-system-to-process-missile-warning-satellite-data/>.
- [19] SMC Public Affairs. New Overhead Persistent Infrared (OPIR) Ground System Embracing Rapid Acquisitions [EB/OL]. (2019-06-06) [2021-08-18]. <https://www.afspc.af.mil/News/Article-Display/Article/1870889/new-overhead-persistent-infrared-opir-ground-system-embracing-rapid-acquisitions/>.
- [20] NGA. STND. 0027\_1.0. OPIR Level 3 Standard, Representative Return Data Model [S]. National Geospatial-Intelligence Agency: Information Integration Office, OPIR Focus Group, 2011.