

## 天基跟踪层星座性能建模与仿真

薛永宏, 樊士伟, 乔 凯, 张 磊

(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

**摘要:** 随着高超声速武器技术的快速发展和实战化部署, 美国有针对性地提出了建设国防太空架构跟踪层计划的设想。首先, 介绍了跟踪层卫星主要设计性能参数; 其次, 建立了跟踪层星座覆盖性能分析模型、探测能力分析模型和跟踪性能分析模型; 最后, 通过仿真计算对跟踪层系统性能进行了分析, 并推断了系统全星座最小卫星数量、探测灵敏度和全球目标最优跟踪精度等核心能力。分析结果对相关系统信息处理算法研究、载荷与星座方案设计具有重要参考价值。

**关键词:** 跟踪层; 高超声速武器; 国防太空架构; 覆盖性能; 探测能力; 跟踪性能

中图分类号: TJ86; V47 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210067

## Performance modeling and simulation of space based tracking layer constellation

Xue Yonghong, Fan Shiwei, Qiao Kai, Zhang Lei

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** With the rapid development of technology and practical deployment of hypersonic weapon, the United States has carried out a new plan of building Tracking Layer of National Defense Space Architecture (NDSA). Firstly, the main design parameters of tracking layer were introduced; Secondly, the analysis model of tracking layer constellation coverage performance, detection capability and tracking performance were established; Finally, the performance of tracking layer was analyzed through simulation and calculation, and the core capabilities such as the minimum satellites number of the whole constellation, detection sensitivity and optimal global target tracking accuracy were deduced. The analysis results have important reference value for the research of data processing algorithm and the design of similar payload and constellation.

**Key words:** tracking layer; hypersonic weapon; National Defense Space Architecture (NDSA); coverage performance; detection performance; tracking performance

收稿日期: 2021-01-26; 修订日期: 2021-04-28

作者简介: 薛永宏, 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为天基信息获取与处理。

## 0 引言

天基跟踪层是美国防太空架构 (National Defense Space Architecture, NDSA) 的重要组成部分,也是美下一代持续红外系统 (Next Generation Overhead Persistent Infrared System, NG-OPIR) 的重要组成部分,主要承担高超声速武器等先进导弹威胁目标 (Advanced Missile Threats) 探测、预警、跟踪和指示等任务。

2020 年 10 月 5 日,美航天发展局 (Space Development Agency, SDA) 向 SpaceX 和 L3Harris 两家公司分别授予价值 1.935 亿美元和 1.49 亿美元的合同,用于天基跟踪层 0 批次 8 颗卫星研制,其中每家公司负责研制 4 颗卫星,计划 2022 年 9 月起的 6 个月内完成发射部署。

文中以美天基跟踪层为研究背景,重点对其对地覆盖性能、探测性能、跟踪性能等进行仿真分析,并推断了跟踪层系统性能。论文主要结构安排如下:第一部分介绍天基跟踪层主要任务及设计参数;第二部分建立覆盖性能、探测性能、跟踪性能分析模型;第三部分对天基跟踪层性能进行仿真分析,并给出相关结论。

## 1 天基跟踪层

该节首先介绍美国防太空架构基本情况,再详述天基跟踪层星座组成及主要设计参数。

### 1.1 国防太空架构 (NDSA)

国防太空架构在航天发展局 2019 年 7 月 1 日发布的信息征询书中首先被提出,旨在构建一种灵活、弹性、敏捷的系统架构,以应对高超声速武器等新型威胁目标,进一步保持美在太空领域的优势。根据信息征询书,国防太空架构包括 7 个功能层<sup>[1]</sup>,如图 1 所示。

(1) 传输层:为全球范围内的作战人员或平台提供稳定、可靠、低时延的数据和通信连接。

(2) 战斗管理层:为战役行动中时敏杀伤链闭合提供任务分派、指挥控制及数据分发等功能。

(3) 跟踪层:对全球高超声速武器等先进导弹威胁目标进行预警、跟踪、指示等。

(4) 监视层:对高时敏目标发射前征候进行全天时 (24×7)、全天候监视,支撑目标指示。

(5) 导航层:在 GPS 拒止环境下,提供定位、导航、授时功能。

(6) 威慑层:抑制地月空间的敌对行动。

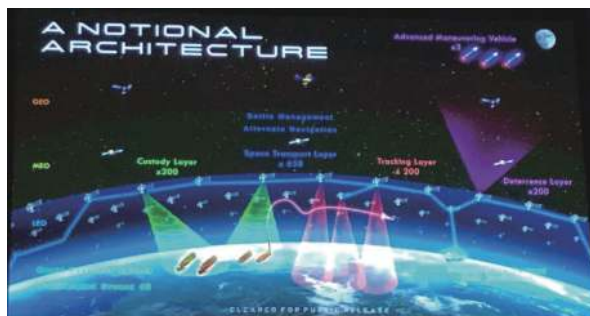


图 1 国防太空架构<sup>[1]</sup>

Fig.1 National Defense Space Architecture<sup>[1]</sup>

(7) 支撑层:确保地面和发射部分对太空架构的快速响应支持。

2020 年 10 月,航天发展局公布了 NDSA 第 0 批次采购计划,共包括 28 颗卫星;其中,20 颗为传输层卫星,8 颗为跟踪层卫星。0 批次系统包括六大验证目标:一是验证低延迟数据传输系统;二是演示从外部天基传感器向作战人员传送数据;三是演示有限的 C3 作战管理功能;四是从传输层网络向作战人员传输综合广播系统数据 (Integrated Broadcast System);五是通过网络实时存储、中继和传输 16 链路数据;六是不依赖于 GPS 系统的通用时空基准。第 1 批次计划 2024 年底完成,卫星数量将增加到 100~150 颗,由多家不同的单位承担研制任务。

### 1.2 跟踪层

卫星部署在 1000 km 轨道高度、80°~100°倾角的圆轨道,采用三轴稳定控制方式,平台具备不小于 0.3°/s 机动指向能力,能够确保相机在 100 s 内指向任意区域并稳定探测;卫星寿命不少于 4 年。

每颗卫星装载一台宽视场红外相机,相机装配红外短波谱段 (Short Wave Infrared, SWIR) 和红外短波透过谱段 (SWIR See-to-Ground, SWSTG),相机视场 50°×50°,像元角分辨率 450  $\mu$ rad,任意视场地面空间分辨率不大于 1.5 km;卫星利用恒星进行光轴校正,光轴校正精度优于 0.1 个像元;星上具备数据存储和处理能力,能够存储不小于 50 min 原始探测数据,星上处理算法参数如门限、阈值等可在轨调整。每颗卫星装载 4 条激光链路,其中两个用于同轨道面卫星建链、两个用于异轨道面卫星建链或星地链路;装载一个 V 频段星间链路,作为激光链路的备份;星间链路采用与传输层卫星相同的路由协议以及基于 IP 的安全策略;星上时统精度优于 100 ns。跟踪层卫星其他主要参数见表 1<sup>[2]</sup>。

表 1 跟踪层卫星其他主要参数

Tab.1 Other parameters of tracking layer satellite

Orbit position accuracy	Orbit velocity accuracy	
10 m (3σ)	0.02 m/s (3σ)	
TT & C frequency	Data rate	Bit error rate
Ka (30-31 GHz)	1 Mbps	1e-7
Data downlink frequency	Data rate	
Ka (20.2-21.2 GHz)	At least 500 Mbps (250 GB/d)	
V-band Crosslink frequency	Transmission rate	
40-75 GHz	1 Gb/s	

第 0 阶段 8 颗卫星将部署在两个轨道面内, 每个轨道面 4 颗, 为确保两颗卫星形成立体跟踪能力, 星间最优相位约为 30°, 且最大应不超过 60°。0 批次 8 颗跟踪层卫星在轨主要任务: 一是验证新的低轨高灵敏度红外相机对高超声速武器的探测能力; 二是验证星间、星地链路传输能力; 三是验证利用传输层卫星, 通过战术数据链传输目标跟踪信息的能力; 四是验证不同供应商提供卫星之间的互操作性; 五是验证星上处理、星间通信以及提升星间通信带宽算法的能力; 六是开发全球目标跟踪的作战概念; 七是评估未来全功能系统对传感器数量、类型、星地数据处理以及通信等的需求。

## 2 星座性能分析建模

基于前述跟踪层卫星主要参数, 重点对其星座覆盖性能、相机探测能力、目标跟踪能力等建模, 研究分析其星座核心能力。

### 2.1 覆盖性能建模

跟踪层系统对地覆盖性能与星座轨道高度、星间相位、卫星数量、相机瞬时探测视场、总探测视场等相关<sup>[3]</sup>, 如图 2 所示。

假设跟踪层卫星相机为矩形视场, 其视场张角称为瞬时探测视场角, 记为  $\alpha$ ; 通过卫星姿态机动或转台转动可扩展相机探测范围, 相机对地可见探测范围张角称为总探测视场角, 记为  $\beta$ ; 另假设卫星轨道高度为  $H$ , 地球半径为  $R$ , 则可得对地覆盖率与卫星数量间的关系:

$$N_s = \begin{cases} \frac{4\pi R^2}{(\alpha H)^2} & \text{Instantaneous field of view (IFOV)} \\ \frac{4\pi R^2}{\pi(\beta H/2)^2} & \text{Total field of view (TFOV)} \end{cases} \quad (1)$$

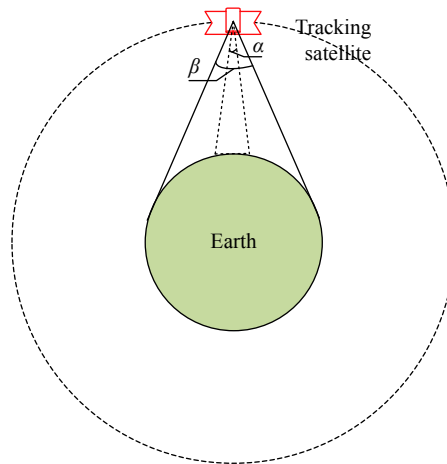


图 2 卫星姿态与传感器指向关系示意图

Fig.2 Sketch map of satellite attitude and sensor point

### 2.2 探测性能建模

跟踪层卫星探测性能分析需首先建立红外相机成像模型, 具体包括几何投影模型<sup>[4-5]</sup>和信号传递模型<sup>[6]</sup>两部分。其中, 几何投影模型主要描述目标与背景在像平面的成像位置关系, 论文不再赘述; 信号传递模型主要描述像平面上目标与背景能量幅度关系, 直接与系统探测性能相关。

根据参考文献 [6-7], 相机获取目标与背景能量分别可表示为:

$$\begin{cases} Q_{\text{foc}}^{(B)} = E_{\text{foc}}^{(B)} \cdot t_d \cdot d_{\text{foc}}^2 \\ Q_{\text{foc}}^{(T)} = E_{\text{foc}}^{(T)} \cdot t_d \cdot \int_{y_c - \frac{d_{\text{foc}}}{2}}^{y_c + \frac{d_{\text{foc}}}{2}} \int_{x_c - \frac{d_{\text{foc}}}{2}}^{x_c + \frac{d_{\text{foc}}}{2}} p_{(x_0, y_0)}(x, y) dx dy \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $t_d$  为相机积分时间;  $d_{\text{foc}}$  为单个像元尺寸;  $(x_c, y_c)$  为目标投影在像平面的位置;  $p_{(x_0, y_0)}(x, y)$  为相机点扩散函数, 反映相机能量集中度, 记为  $\rho$ ;  $E_{\text{foc}}^{(T)}$ 、 $E_{\text{foc}}^{(B)}$  分别为目标与背景在像平面的辐射照度。

$$\begin{cases} E_{\text{foc}}^{(B)} = \int L_\lambda d\lambda \cdot \frac{f_{\text{IFOV}}^2 \cdot \tau_0 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot \cos(\theta_0)}{4d_{\text{foc}}^2} \\ E_{\text{foc}}^{(T)} = \frac{\int \tau_a^\lambda \cdot I_\lambda d\lambda}{l^2} \cdot \frac{\tau_0 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot \cos(\theta_1)}{4d_{\text{foc}}^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $L_\lambda$  为大气背景光谱辐射亮度;  $I_\lambda$  为目标光谱辐射强度;  $l$  为探测距离;  $\tau_a^\lambda$  为大气透过率;  $f_{\text{IFOV}}$  为相机单个像元的角分辨率;  $\theta_0$  和  $\theta_1$  分别为背景与目标入射光线与相机口面法线的夹角;  $\tau_0$  为相机成像效率;  $D$  为相机光学口径尺寸。

采用目标与背景杂波辐射对比度<sup>[6]</sup>, 即信杂比表述相机探测性能, 利用公式 (2)、(3) 可得:

$$CR = \frac{Q_{\text{foc}}^{(T)}}{Q_{\text{foc}}^{(B)}} = \frac{\rho \cdot \int \tau_a^\lambda \cdot I_\lambda d\lambda}{l^2 \cdot f_{\text{IFOV}}^2 \cdot \int L_\lambda d\lambda} \quad (4)$$

由此可知,探测性能主要与相机探测谱段、像元角分辨率、探测距离、目标与背景光谱辐射强度/亮度、大气透过率等因素相关;其中,目标与背景光谱辐射强度/亮度、大气透过率为客观因素,不会随着相机或人为因素改变而改变。

### 2.3 跟踪性能建模

跟踪层卫星对高超声速目标跟踪属于仅测角跟踪系统,必须利用两颗或者多颗卫星的观测数据实现对目标的三维定位跟踪<sup>[8]</sup>,如图 3 所示。

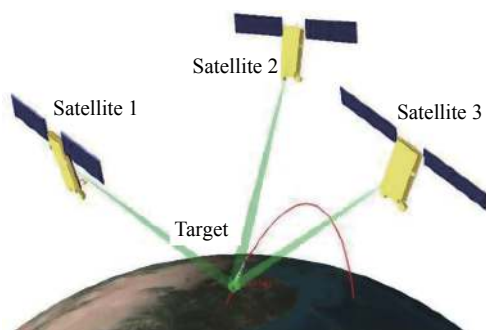


图 3 光学交叉定位原理图

Fig.3 Schematic diagram of optical cross location

根据目标视轴指向的定义:

$$\mathbf{v}_T = \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_S}{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_S\|} \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{r} = (x, y, z)^T$  和  $\mathbf{r}_S = (x_S, y_S, z_S)^T$  分别表示目标和卫星的位置矢量。对上式求一阶微分可得:

$$d\mathbf{v}_T = \mathbf{H} (d\mathbf{r} - d\mathbf{r}_S) \quad (6)$$

进一步改写可得到:

$$\mathbf{H} d\mathbf{r} = d\mathbf{v}_T + \mathbf{H} d\mathbf{r}_S \quad (7)$$

可知,目标跟踪定位性能主要与卫星位置误差和目标视轴指向误差相关。式中  $\mathbf{H}$  反映了目标视轴指向误差对目标位置误差、卫星位置误差的灵敏程度,可表示为:

$$\mathbf{H} = \frac{\begin{pmatrix} (y-y_S)^2 + (z-z_S)^2 & -(x-x_S)(y-y_S) & -(x-x_S)(z-z_S) \\ -(x-x_S)(y-y_S) & (x-x_S)^2 + (z-z_S)^2 & -(y-y_S)(z-z_S) \\ -(x-x_S)(z-z_S) & -(y-y_S)(z-z_S) & (x-x_S)^2 + (y-y_S)^2 \end{pmatrix}}{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_S\|^3} \quad (8)$$

由于  $|\mathbf{H}| \equiv 0$ ,  $\mathbf{H}$  不可逆;因此单星观测条件下无法求解目标跟踪性能,当且仅当卫星数量  $N_S \geq 2$  时,才能对目标跟踪性能进行分析。进一步构建目标跟踪性能分析模型为:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{H}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{H}_{N_S} \end{pmatrix} d\mathbf{r} = \begin{pmatrix} d\mathbf{v}_{T,1} \\ \vdots \\ d\mathbf{v}_{T,N_S} \end{pmatrix} + \Lambda \begin{pmatrix} d\mathbf{r}_{S,1} \\ \vdots \\ d\mathbf{r}_{S,N_S} \end{pmatrix} \quad (9)$$

其中,  $\Lambda = \text{diag}(\mathbf{H}_1, \dots, \mathbf{H}_{N_S})$ ; 进一步求解可得:

$$d\mathbf{r} = (\boldsymbol{\Sigma}_H)^{-1} \mathbf{C}_H \begin{pmatrix} d\mathbf{v}_{T,1} \\ \vdots \\ d\mathbf{v}_{T,N_S} \end{pmatrix} + (\boldsymbol{\Sigma}_H)^{-1} \mathbf{B}_H \begin{pmatrix} d\mathbf{r}_{S,1} \\ \vdots \\ d\mathbf{r}_{S,N_S} \end{pmatrix} \quad (10)$$

其中,

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Sigma}_H &= \sum_{i=1}^{N_S} \mathbf{H}_i^T \mathbf{H}_i \\ \mathbf{C}_H &= (\mathbf{H}_1^T, \dots, \mathbf{H}_{N_S}^T) \\ \mathbf{B}_H &= (\mathbf{H}_1^T \mathbf{H}_1, \dots, \mathbf{H}_{N_S}^T \mathbf{H}_{N_S}) \end{aligned} \quad (11)$$

### 3 仿真计算与分析

根据跟踪层卫星设计参数,对系统覆盖性能、探测能力及跟踪性能进行仿真计算。

#### 3.1 覆盖性能

根据跟踪层系统参数计算可知,利用瞬时探测视场视线对地 100% 一重覆盖,至少需 671 颗卫星,如图 4 所示;利用卫星总探测视场 ( $\beta=120$ ) 实现对地 100% 一重覆盖理论上仅需 15 颗卫星,但考虑低轨卫星轨道运动特定,实际所需卫星数量更多。

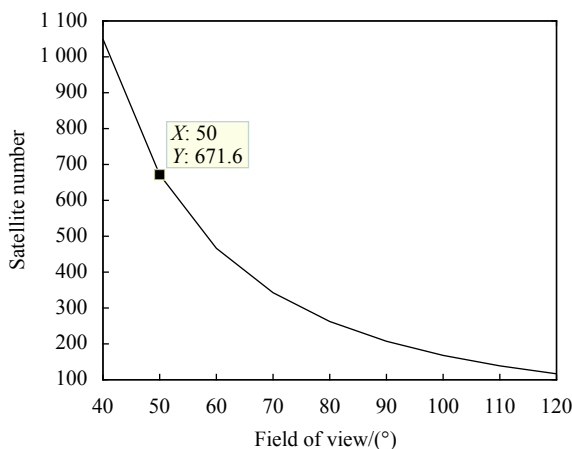


图 4 瞬时视场与一重覆盖卫星数量关系

Fig.4 Relationship between FOV and satellite number under one coverage

跟踪层卫星设计采用总探测视场覆盖方式,通过整星机动实现对地可见范围内任意位置目标的跟踪。由于  $\alpha=50 \ll \beta=120$ , 故而可推断跟踪层卫星不具备目标搜索发现能力,必需在其他系统(如高轨 SBIRS 卫星)引导信息支持下,实现对高超声速武器的连续跟踪探测。



基于覆盖性能计算软件工具,通过构建场景进一步分析跟踪层星座参数、卫星数量与覆盖性能关系见表 2。为对高超声速武器的立体跟踪定位,跟踪层卫星必需实现对高超声速武器飞行空间,即距地表 20~100 km 高度<sup>[9]</sup>实现双重覆盖,由此推断,跟踪层卫星总数量需不少于 98 颗,考虑一定的功能备份,卫星总数量不应少于 100 颗。

表 2 覆盖性能与星座参数关系表

Tab.2 Relationship between coverage performance and constellation parameters

Constellation parameters	Satellite number	Coverage rate for at least 1 valid access	Coverage rate for at least 2 valid access
7/5/2/180	35	99.3%	52.48%
14/7/2/180	98	100%	99.46%

3.2 探测能力

根据参考文献 [9-11],高超声速武器辐射能量主要集中在 2~5 μm 红外短波谱段,与跟踪层卫星谱段设计相匹配。其中,高超声速武器在红外短波谱段的光谱辐射强度在 10000 W·sr<sup>-1</sup>·μm<sup>-1</sup> 以上<sup>[9-10]</sup>,背景在红外短波谱段的光谱辐射亮度约为 0.01W·sr<sup>-1</sup>·m<sup>-2</sup>·μm<sup>-1</sup><sup>[9-10]</sup>。假设大气综合吸收率为 0.5,则结合式可得到探测距离、相机角分辨率与目标背景辐射对比度 CR 间的关系,如图 5 所示。

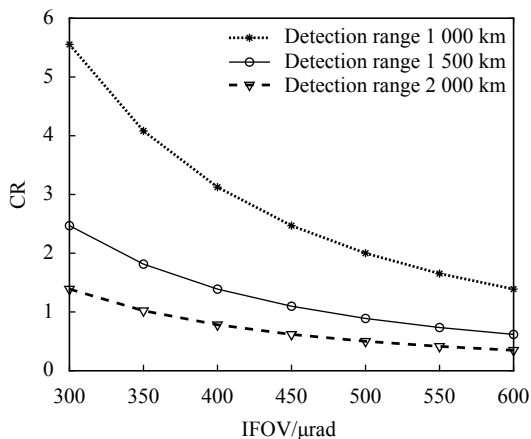


图 5 探测距离与角分辨率与辐射对比度关系图

Fig.5 Relationship between range, IFOV and CR

根据跟踪层卫星载荷在 1.5 microflick<sup>[2]</sup>背景探测能力要求,并结合 1000 km 轨道高度、450 μrad 相机角分辨率等参数推断,跟踪层卫星载荷探测灵敏度优于 700 W/sr;但是受背景杂波影响,单帧图像信杂比较低,跟踪层卫星必需通过高帧频探测降低信息处理算法对信杂比的需求或研究低信杂比条件下目标检测与跟踪算法。

3.3 跟踪能力

在表 2 跟踪层卫星星座参数实现对地表高度 20~100 km 高度空间双重覆盖条件下,结合公式对跟踪层卫星星座全球目标跟踪性能进行了分析,如图 6 所示。

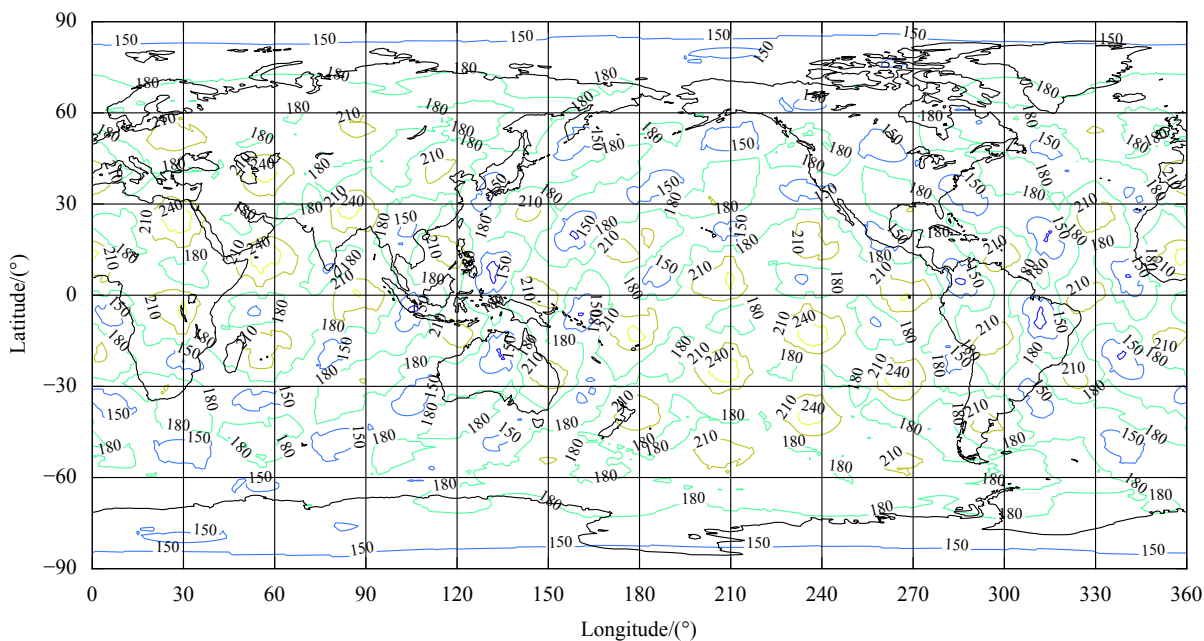


图 6 跟踪层星座全球 GDOP 图

Fig.6 Global GDOP map of tracking layer

从图 6 仿真结果可以推断,跟踪层卫星完成组网后,在全球范围内在对高超声速武器最优跟踪精度将达到 200 m 左右,较现有高轨天基红外系统 (SBIRS) 有了极大的改善。

## 4 结 论

跟踪层星座设计与目标、背景特性等密切相关,通过对跟踪层卫星覆盖性能、探测性能、跟踪性能进行建模与仿真,推断了跟踪层星座卫星数量、探测能力边界、最优跟踪性能等核心指标参数,主要启示有:一是在目标探测跟踪方面,从载荷探测灵敏度、跟踪性能看,跟踪层卫星对高超声速武器具有较好的探测效果,但受制于卫星姿态机动跟踪模式,星下点附近对高超目标跟踪能力较弱;二是在目标识别方面,跟踪层卫星主要采用红外短波谱段,仅依赖红外辐射特性难以有效进行目标分类判别,但综合利用目标飞行高度、速度等特征信息,系统具备高超声速武器分类判别能力;三是在信息处理算法方面,跟踪层卫星探测图像中目标背景辐射对比度较低,需研究低信噪比信息处理算法确保对目标的可靠检测处理。

### 参考文献:

- [1] Hu Yini, Zhong Jiangshan, Wei Chenxi, et al. Analysis of US next generation space architecture [J]. *Spacecraft Engineering*, 2021, 30(2): 108-117. (in Chinese)
- [2] SDA. Technical requirements of tracking layer to WFOV[EB/OL]. [2020-05-11]. <http://beta.sam.gov/>.
- [3] Wang Bo, Xu Dan, Chen Yanjun, et al. Analysis of the coverage of LEO constellation based infrared staring sensors [J]. *Journal of Hunan University (Nature Sciences)*, 2009, 36(10): 68-74. (in Chinese)
- [4] Xue Yonghong, An Wei, Zhang Tao, et al. Real-time line of sight calibration algorithm for high earth orbit infrared scanning sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0628003. (in Chinese)
- [5] Liu Tao, Yang Degui, Jiang Weidong, et al. IR imaging modeling and simulation of ballistic target group outside atmosphere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 589-594. (in Chinese)
- [6] Zhang Tao, Xue Yonghong, Ding Yonghe, et al. Analysis of imaging characteristics of background in elliptical orbit infrared surveillance platform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0326001. (in Chinese)
- [7] Sun Jianqi, Fang Xiaoping. Infrared Physics[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004. (in Chinese)
- [8] Sheng Weidong. Research on target tracking technologies for space-based optical sensor network[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [9] Yang Xiao, Niu Qinglin, He Zhihong, et al. Analysis of infrared radiation characteristics and detectability of HTV-2-like hypersonic gliding aircrafts [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 1204001. (in Chinese)
- [10] Wang Yingying, He Ping, Meng Changliang, et al. Detection distance computation of the space borne infrared detector for hypersonic flight vehicles [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7): 0704003. (in Chinese)
- [11] Yu Xiaoya, Liu Lituo, Li Rui, et al. Measurements of absolute radiative emissions for supersonic reentry [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2020, 13(1): 87-94. (in Chinese)