

美国 SBIRS-HEO 卫星预警能力分析

毛艺帆, 张多林, 王 路

(空军工程大学 防空反导学院, 陕西 西安 710051)

摘要: 美国天基红外系统 (SBIRS) 是现今最先进的天基预警系统, 并且还在不断地发展完善当中。重点研究 SBIRS-High 中的大椭圆轨道卫星, 具体针对其覆盖范围和探测能力进行了建模及仿真, 对其在轨工作性能进行了初步分析。

关键词: SBIRS-HEO; 红外探测; 弹道导弹预警

中图分类号: TN216 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2014)06-0467-04

Analysis on Early Warning Capability of USA's SBIRS-HEO Satellite

MAO Yi-fan, ZHANG Duo-lin, WANG Lu

(School of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: The space-based infrared system (SBIRS) is the most advanced space-based early warning system, and also in the midst of developing and perfecting constantly. The paper mainly studies the HEO (highly elliptical orbit), explores the modeling and simulation aiming at the coverage characteristic and the detecting capability, and analyses the work performance on orbit.

Key words: SBIRS-HEO, infrared detection, ballistic missile warning

0 引言

美国天基红外系统 (space based infrared systems, SBIRS) 的任务是战略导弹预警, 以及战区弹道导弹预警跟踪^[1], 主要由 SBIRS-HIGH、SBIRS-LOW 及用于任务处理控制的地面设备组成, 其中 SBIRS-HIGH 由 HEO、GEO 共同构成, SBIRS-LOW 由 LEO 构成, GEO、HEO、LEO 分别是地球静止轨道卫星、大椭圆轨道卫星和圆形低轨卫星。

现阶段, 已有一些针对天基红外系统卫星探测能力进行的研究, 文献[2]对 SBIRS 中 GEO-1 卫星的探测预警能力进行了分析, 对其覆盖范围和红外探测能力进行了详细的数据分析, 并具体对弹道预警能力进行了仿真; 文献[3]通过分析 HEO 的性能, 使用 STK 对其覆盖范围进行仿真, 但其仿真的视场并非是 HEO 视场扫描方式, 而是 DSP 卫星的扫描方式, 且并未对红外探测能力进行阐述。

本文重点针对 SBIRS-HIGH 中的 HEO 卫星运动特性和探测特性进行分析, 然后进一步探讨其覆盖范围, 最后对红外探测能力、弹道导弹预警能力

进行数据分析。

1 HEO 预警卫星简介

1.1 SBIRS-HIGH 主要任务

SBIRS-HIGH 包括 5 颗地球同步卫星 GEO (1 颗备用) 和 2 颗大椭圆轨道卫星 HEO, 带有凝视型和扫描型 2 种红外探测器。主要任务是探测和跟踪助推飞行的弹道导弹, 可得到助推段及下落段的红外数据^[1]。

1.2 HEO 运动特点

HEO, 即大椭圆轨道 (highly elliptical orbit), 是一种具有较低近地点和极高远地点的椭圆轨道。根据开普勒定律, 卫星在远地点附近区域的运行速度较慢, 因此这种极度拉长的轨道的特点是卫星到达和离开远地点的过程很长, 而经过近地点的过程极短。这使得卫星对远地点下方的地面区域的覆盖时间可以超过 12 h。

HEO 卫星的远地点在北极上空, 大于 35398 km, 每颗卫星可观察北极地区的时间大于 12 h, 所以可全天 24 h 对北极地区及潜艇发射的弹道导弹进行探测。

1.3 SBIRS 工作过程

SBIRS 首先对导弹发射实现粗查, 然后由高低轨卫星做定点详查, 对导弹弹头进行跟踪并测出弹道轨迹参数^[4]。具体来说, 由于 SBIRS-HIGH 采用双波段双传感器方案, 即每颗卫星上装有双色 2.7 μm、4.3 μm 高速扫描型探测器和与之互补的高分辨率凝视传感器^[4], 所以, 扫描型探测器用一维线阵粗略扫描地球南北半球, 进行初探; 发现目标后, 将探测信息提供给凝视探测器, 后者用一个精细的二维面阵将发射画面拉近放大, 紧盯目标, 进行跟踪, 获取详细信息, 并在 10~20s 内将预警信息传给预警指挥控制中心。高轨卫星间不通信, 但可和低轨卫星进行通信以接力跟踪^[4]。

SBIRS-HIGH 卫星扫描速度和灵敏度比 DSP 卫星高 10 倍, 加之 HEO 将系统的预警能力扩展到两极地区, 使其侦查范围扩大了 2~4 倍, 可在导弹发射 10~20s 内将警报信息传送给地面^[1]。

总之, HEO 主要负责对 GEO 盲区, 即极帽地区的侦查监视及预警。图 1 为 HEO 组成运行示意图。美国已分别于 2006 年和 2008 年成功发射了两颗 HEO 卫星, 预计到 2018 年, 待 GEO 全部部署完毕, HEO 和 GEO 将共同进行高轨侦查预警任务。

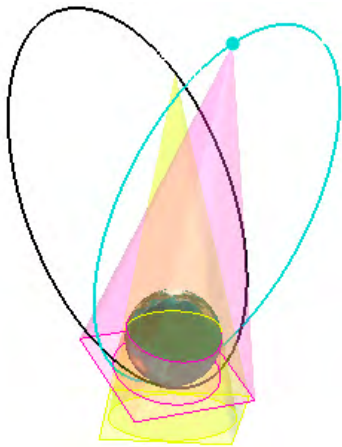


图 1 HEO 组成运行示意图

Fig.1 The structure and operating of HEO

2 HEO 覆盖范围分析

对 HEO 而言, 由于其远地点定位于极点上空附近可较长时间对极点所在半球进行长时间的覆盖观测^[5], 与 GEO 配合, 可以起到非常好的侦查预警效果, 但是对单星而言存在明显的覆盖漏洞, 所以本文不探讨单星的覆盖情况, 而是对双星的覆盖范围进行分析。

2.1 运行轨道

若需对 HEO 运行轨道进行分析, 则必须对其

轨道参数进行确定。由于公开资料甚少, 只能对现有的资料进行分析, 得近似的轨道参数。

卫星在空间轨道上的位置, 可用 6 个参数描述: 升交点赤经 (RAAN, right ascension of the ascending node), 轨道倾角 (inclination), 近地点角距 (argument of perigee), 轨道半长轴 (semi-major axis), 轨道偏心率 (eccentricity), 卫星飞过近地点的时刻^[6]。由于升交点赤经对探测效能没有根本影响, 近地点角距可设置为固定值, 近地点时刻可以任意设置, 本文只对其他 3 个参数的确定进行说明。

具体确定方法如下:

轨道倾角: 资料显示^[3,7], 美国 SBIRS-HEO 的大椭圆轨道类似于俄罗斯的闪电轨道。闪电轨道 (Molniya Orbit), 是一种轨道倾角为 63.4° 的特殊的大椭圆轨道, 近心点幅角为 270°, 轨道周期为半个恒星日 ($T=12\text{ h}=43200\text{ s}$)。闪电轨道的远地点是北半球北纬 63.4° 上空, 远地点高度为 40000 km, 在卫星远地点附近时, 卫星对于俄罗斯、北欧、格陵兰岛和加拿大等都有很好的可见度。

半长轴: 由开普勒第三定律, 可知沿椭圆轨道运行物体的轨道周期计算公式为 $T=2\pi\sqrt{a^3/\mu}$, μ 为标准重力参数, 查表可知地球的标准重力参数 $\mu=396800\text{ km}^3/\text{s}^2$, 由上文知 $T=12\text{ h}=43200\text{ s}$, 则可反推出半长轴 $a=26610.2241\text{ km}$ 。

偏心率: 即用焦点间距离除以长轴的长度。闪电轨道远地点高度 h_f 为 40000 km, 地球平均半径 $R=6371.004\text{ km}$, 则可由式(1)计算出近地点高度 h_n 约为 478.45 km, 如图 2 所示大椭圆轨道与地球关系, 由式(2)可求得偏心率为 0.7426007。

$$h_n=2a-2R-h_f \quad (1)$$

$$e=1-\frac{R+h_n}{a} \quad (2)$$

这样的轨道可以保证对北极圈的最大监视能力, 加之对空间的摄动影响非常小, 使得远地点一直停留在北半球。

2.2 覆盖范围

由上文分析计算可得 HEO 卫星大椭圆轨道的基本参数, 由于 HEO 的设计目标是弥补 GEO 的探测盲区, 所以其近地点幅角 (升交点与近地点夹角) 均选择 270°; 升交点赤经对探测效能没有根本影响, 选择卫星位置在相对的两侧即可; 而真近点角 (近地点-地心-卫星当前位置夹角) 的差值对探测结果影响最大, 应根据经验值选取, 可选择差值约为 10° ^[7]; 考虑地球是个正球体, 可选择如表 1 的参数值。

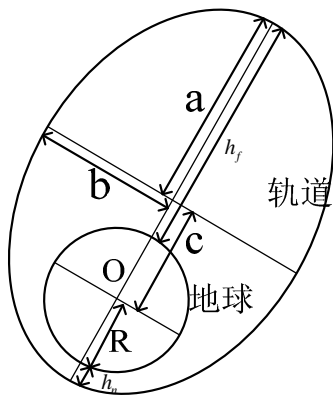


图 2 地球与大椭圆轨道示意图

Fig.2 The earth and highly elliptical orbit

对传感器而言,HEO 上载荷的具体数据并未公开,由于 HEO 卫星上探测器与 SBIRS-GEO 卫星探测器具有类似的性能参数,所以根据 SBIRS-GEO 卫星的扫描视场来简单推算 HEO 的扫描视场。由于 GEO 的扫描视场为 $10^{\circ} \times 20^{\circ}$,其中平行于地轴视场的角度为 10° ,垂直于地轴视场的角度为 20° ,以避免对两极地区的重复覆盖;由于 HEO 的任务

主要在于对北极圈的探测预警,不用考虑是否重复覆盖,所以可选择正矩形视场,假设其扫描视场为 $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ 到 $20^{\circ} \times 20^{\circ}$ 之间,使用一维线扫的扫描方式。通过 STK 对扫描视场的仿真,发现视场为 $15^{\circ} \times 15^{\circ}$ 时,即可最大程度覆盖视线范围,又可避免视场过大浪费探测器资源。

卫星的覆盖范围指的是卫星能探测到地面的面积除以地球表面积。这里假设 HEO 红外传感器视场范围内都可探测,且可直接对地探测,不考虑云层的影响。

使用 STK 软件对覆盖情况进行演示,建立 HEO-1 和 HEO-2 两个大椭圆卫星,并建立相应的传感器,在北极 60° 以上建立一个 Area Target,即设定一个面目标,如图 3。由 STK 的仿真结果可知,对单星而言,在整个运行周期内 (43200 s),有长达 39753.255 s 的时间可对北极圈 (纬度大于 60°) 进行覆盖,占运行周期的 92.02%;对双星而言,双重覆盖时间可达 34463.194 s,占运行周期的 79.78%。图 4 阴影部分为双星覆盖范围,图 5 表示 STK 仿真中 HEO-1 和 HEO-2 对北极圈的覆盖时间。

表 1 卫星椭圆轨道参数值 Table 1 Elliptical orbit parameters of satellite

卫星	轨道倾角	半长轴	偏心率	近地点幅角	升交点赤经	真近点角
HEO-1	63.4°	26610.2241 km	0.7426007	270°	220.2159°	180°
HEO-2						40.2159°

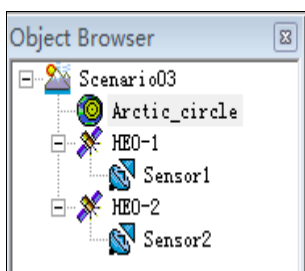


图 3 在 STK 中建立对象图

Fig.3 Insert object in STK

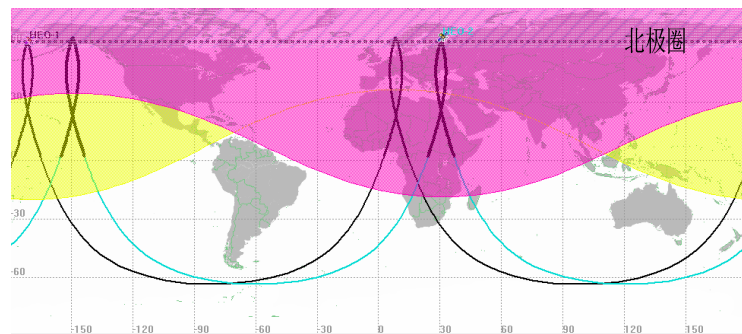


图 4 某时间 HEO 的覆盖情况

Fig.4 The coverage of HEO in a moment

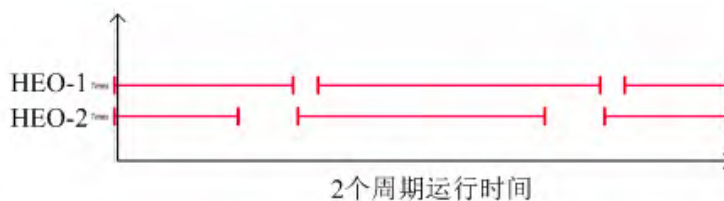


图 5 HEO-1 和 HEO-2 的覆盖时间图

Fig.5 Covering time of HEO-1 and HEO-2

3 探测预警能力分析

对于弹道导弹预警而言,其第一要素是捕获喷焰的红外辐射;对于 SBIRS-HEO 卫星而言,由上文可知,已经解决了全周期覆盖的问题,其首要任务就是利用其载荷探测弹道导弹助推段尾焰的红外特征。然而,上文的假设条件是即使在远地点,传感器也具有直接对地探测的能力,但是 HEO 是否具有此能力还需要进一步分析。

1) 弹道导弹助推段红外特征

在助推段,由于发动机大推力推动,弹体具有强的热、光辐射,是红外特征最明显的时期。这一阶段,最强的辐射源是导弹的尾焰羽流,其温度可达 1000 K 以上,短红外线波长(2.7 μm)辐射较强^[8],辐射强度可达 10⁴~10⁶ W/sr^[9];此外,发动机喷管口和蒙皮在近红外和长波红外波段辐射较强。

2) 星载红外传感器探测距离

系统探测目标的作用距离主要取决于目标特性(目标的辐射强度和波谱范围)、传输因子(沿视线方向的大气透过率、天空背景)和系统因子(探测器的灵敏度及光学系统和信号处理系统的性能)^[10]。

由于 HEO 卫星装有双色高速扫描探测器和具有 24000 光敏元焦平面阵列的高分辨率凝视传感器,其性能大大优于 DSP,所以其系统本身性能十分优越;在某一时间段内,传输因子也是在一定的取值范围内;则目标的红外特性最终决定其探测距离。

在助推段探测过程中,弹道导弹目标为点目标,且探测器对着有云层遮挡的区域,产生背景噪声,则使用背景噪声限点源目标作用距离方程来计算探测距离^[11-12]:

$$R = \sqrt{(I\tau_a) \left[\frac{\pi}{2} D_0 (NA) \tau_0 \right]} \cdot \sqrt{\left[\frac{\lambda}{ghc} \left(\frac{\eta}{Q_b} \right)^{1/2} \right] \left[\frac{1}{(\omega\Delta f)^{1/2} SNR (1+\gamma)} \right]} \quad (3)$$

式中: I 为目标红外辐射强度; τ_a 为沿视线方向大气光谱透过率; D_0 为系统入射孔径; NA 为系统数值孔径; τ_0 为光学零件光谱透过率乘积; λ 为波长; $g=2$, 为光导探测器常数; $h=6.626176 \times 10^{-34} (\text{W}\cdot\text{s}^2)$, 为普朗克常数; $c=2.99792458 \times 10^8 (\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$, 为光速; η 为探测器的量子效率; $Q_b = \lambda p / hc$, 为到达探测器的背景光子通量, $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$; p 为探测器的背景光子通量, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; ω 为探测器相元尺寸, $\mu\text{m} \times$

μm ; Δf 为系统等效噪声带宽; SNR 为系统门限信噪比; γ 为系统噪声增加的百分数。

3) 助推段探测预警能力

假设式(3)中的参数取值如下: 设波长 $\lambda=2.7 \mu\text{m}$, $I=1 \times 10^4 \text{ W/sr}$, $\tau_a=0.8$, D_0 、 NA 分别取 40 cm 和 20 cm, τ_0 、 η 取 0.8, $\omega=40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$, $\Delta f=100 \text{ Hz}$, $\gamma=0.01$ 。关于系统门限噪声比 SNR 的选择,在相关文献中,有对 SNR 取值的讨论,当目标辐射强度 $I=1 \times 10^4 \text{ W/sr}$, 探测距离为 35860 km 时, SNR 要低于 5.81 dB 才能达到探测要求,所以本文选择 $SNR=5 \text{ dB}$ 。

使用 MATLAB 进行仿真,如图 6,表示背景辐射光子通量密度和探测距离的关系,可以看出背景辐射越强,探测距离越短。但是,在一般情况下,探测距离可达到 30000 km 以上,可以满足远地点的探测预警需求。

高轨卫星部署的目的就在于能够实现尽早探测到弹道导弹,即能够在导弹发射的第一时间发现目标。由于 SBIRS-GEO 卫星具备 See-To-Ground 探测能力^[2],类似地,HEO 卫星也应具备此能力,意味着几乎可以忽略云层的影响,则在距离计算时,可以在导弹发射瞬时被探测。

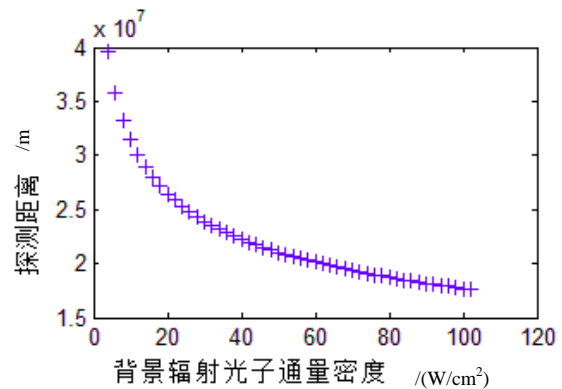


图 6 探测距离与背景辐射的关系

Fig.6 The relationship between detection distance and background radiation

4 总结

天基红外系统的大椭圆卫星主要用于北极圈的探测预警,本文在对 HEO 卫星轨道特性分析的基础上,对覆盖范围及探测性能进行了分析与仿真,得出即使在云层的影响下,其仍旧具有很好的探测效果,即使位于远地点,探测距离也足以观察到地面情况;当配合地球同步轨道卫星和低轨卫星工作时,可以起到很好的探测预警作用。

(下转第 490 页)

- [J]. 红外技术, 2009, 31(5): 270-274.
- Wang Kun-peng, Xu Yi-dan, Yu Qi-feng, et al. Classification and state of IR/Visible image registration methods[J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(5): 270-274.
- [5] Peng Yigang, Ganesh A, Wright J, et al. Robust Alignment by Sparse and Low-rank Decomposition for Linearly Correlated Images[C] // *IEEE Trans on PAMI*, 2011, 34(11): 2233-2246.
- [6] 高莹莹, 杨建峰, 马晓龙, 等. 基于 Fourier-Mellin 算法的干涉图像配准[J]. *光学精密仪器*, 2007, 15(9): 1415-1420.
- Gao Ying-ying, Yang Jian-feng, Ma Xiao-long. Interference image registration based on Fourier-Mellin algorithm[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(9): 1415-1420.
- [7] 高峰, 文贡坚, 吕金建. 基于干线的红外与可见光最优图像配准算法[J]. *计算机学报*, 2007, 30(6): 1014-1021.
- Gao Feng, Wen Gong-Jian, Lu Jin-Jian. An optimal algorithm for IR/visual image registration based on main-line-Pairs[J]. *Chinese Journal Of Computers*, 2007, 30(6): 1014-1021.
- [8] Lin Zhouchen, Chen M, Ma Yi, et al. The augmented Lagrange multiplier method for exact recovery of corrupted low-rank matrices[J]//UIUC Technical Report UILU-ENG-09-2215, 2011.
- [9] 马政德, 杜云飞, 周海芳, 等. 遥感图像配准中相似性测度的比较和分析[J]. *计算机工程与科学*, 2008, 30(2): 45-48.
- MA Zheng-de, DU Yun-fei, ZHOU Hai-fang, et al. Performance comparison of similarity measures for remote sensing image registration[J]. *Computer Engineering & Science*, 2008, 30(2): 45-48.
- [10] 葛永新, 杨丹, 张小洪. 基于特征点对齐度的图像配准算法[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(2): 425-428.
- Ge Yong-xin, Yang Dan, Zhang Xiao-hong. A new method for image registration based on alignment metric of feature points[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(2): 425-428.

(上接第 470 页)

参考文献:

- [1] 刘纯胜, 苏庆华, 赵剡. 现有天基预警系统浅析[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(增刊): 234-238.
- [2] 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.
- [3] 胡磊. 美国 HEO 预警卫星覆盖性能分析[J]. *装备学院学报*, 2013: 76-80.
- [4] 蒋跃, 邓磊, 臧鹏. 美国天基红外预警系统的发展现状和技术特点[J]. *空军雷达学院学报*, 2011, 25(2): 105-108, 112.
- [5] 申镇. 单星预警弹道导弹参数估计方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010.
- [6] 王永刚, 刘玉文. *军事卫星及应用概论*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [7] 王瑞, 熊伟, 张学志. SBIRS-High 对助推段导弹的探测和跟踪能力研究[J]. *电子测量技术*, 2011, 34(3): 16-19.
- [8] 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.
- [9] 张鑫, 郭宜忠, 万新敏, 等. 基于红外特性的弹道导弹助推段预警探测能力仿真[J]. *舰船电子对抗*, 2010, 33(5): 92-95.
- [10] 朱和平, 沈齐. *现代预警探测与监视系统*[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [11] 谢道成, 张为华. 基于助推段红外辐射特性的 SBIRS 探测能力分析[J]. *光电技术应用*, 2008, 23(2): 50-53.
- [12] 林杰, 江勇, 方浩百, 等. 飞机整机蒙皮自身红外辐射特性建模与分析[J]. *红外技术*, 2012, 34(5): 286-291.