

美国 HEO 预警卫星覆盖性能分析

胡磊¹, 闫世强², 刘辉², 许松²

(1. 空军预警学院 研究生管理大队, 湖北 武汉 430019; 2. 空军预警学院 空天预警实验室, 湖北 武汉 430019)

摘 要 导弹预警卫星是导弹防御系统的重要组成部分, 是战略预警的有效手段, 在战争中起着其他装备无法替代的重要作用。首先分析了大椭圆轨道 (highly eccentric orbit, HEO) 特性与美国 HEO 预警卫星发展历程, 并利用 STK (satellite tool kit) 软件对美国天基红外系统 (space-based infrared system, SBIRS) 中的 2 颗 HEO 预警卫星轨道特性与覆盖性能进行了仿真分析, 在此基础上, 提出了发展 HEO 预警卫星星座的相关对策与建议。

关 键 词 天基红外系统; HEO 预警卫星; 覆盖性能

中图分类号 TP 391.9 文章编号 2095-3828(2013)03-0076-05

文献标志码 A DOI 10.3783/j.issn.2095-3828.2013.03.018

Analysis of Coverage Performance of Early Warning Satellites on HEO of America

HU Lei¹, YAN Shiqiang², LIU Hui², XU Song²

(1. Company of Postgraduate Management, Air Force Early Warning Academy, Wuhan Hubei 430019, China;

2. Air/Space-based Early Warning Laboratory, Air Force Early Warning Academy, Wuhan Hubei 430019, China)

Abstract Missile early warning satellite is an important part of missile defense system, it's an effective tactic early warning measure, and it plays an indispensable role in wars. The characteristics of highly eccentric orbit (HEO) and the course of development of early warning satellites on highly eccentric orbit of America are analyzed, and the orbit characteristics and coverage performance of two satellites on highly eccentric orbit in space-based infrared system (SBIRS) are modeled and analyzed by satellite tool kit(STK). On the basis of analyzing above, measures and advices on developing early warning satellites on highly eccentric orbit are brought forward.

Key words space-based infrared system (SBIRS); early warning satellite on HEO; coverage performance

地球静止轨道预警卫星定点于地球赤道上空, 可以对载荷覆盖区域进行不间断监视。但由于受地球曲率影响, 地球静止轨道预警卫星对高纬度地区的探测能力很差, 甚至是不能探测。而远地点位于北极上空的大椭圆轨道 (HEO) 预警卫星在北极区域滞留时间长, 可以有效解决北极地区的探测, 并与地球静止轨道预警卫星互补, 形

成对全球 (除南极区域) 24 h 监视。为了应对弹道导弹的威胁, 美国与俄罗斯都发展了 HEO 预警卫星^[1-2]。本文根据 HEO 特性和轨道理论知识, 利用 STK 软件对美国 HEO 预警卫星的轨道特点和覆盖性能进行了仿真分析, 并提出了发展 HEO 预警卫星星座的对策与建议, 旨在为我国预警卫星的发展与研究提供借鉴与参考。

收稿日期 2012-10-22

基金项目 部委级资助项目

作者简介 胡磊 (1985-), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 预警监视装备发展论证, huleikjld@126.com.

闫世强, 男, 教授, 博士生导师.

1 HEO 特性分析

大椭圆轨道(HEO),即大偏心率轨道,指近地点高度与远地点高度相差特别显著的轨道^[3]。根据空间物体运动规律,航天器在 HEO 远地点附近运动速度特别慢,适合具有空间逗留要求的航天任务。如果将 HEO 远地点布置于北半球上空,则航天器处于北半球上空的时间占一个轨道周期的大半。

大椭圆冻结轨道是指倾角为 63.4° 的大椭圆轨道,该轨道的近地点高度、远地点高度和近地点的星下点纬度受空间摄动影响小、改变特别慢,轨道长期维持所需的燃料较少。

闪电(Molniya)轨道是一种特殊的大椭圆冻结轨道,闪电轨道远地点位于北半球高纬度地区,使得卫星在 1 个周期内可长弧段(90%以上)位于北半球上空。冻结轨道的特点使卫星远地点高度和星下点位置较为稳定,即可以长期保持该长弧段“逗留”特性^[3-4]。闪电轨道周期通常为 12 h,地面轨迹 2 圈后回归,有利于星地管理和卫星对地观测,同时卫星有 50% 的弧段位于 3 万~4 万 km 之间,对地覆盖范围大(卫星视场可以完全覆盖北极地区)。

美国和俄罗斯均发展闪电轨道预警卫星星座,以完成对北半球高纬度地区的预警监视。与地球静止轨道预警卫星配合组网,可实现全球(除南极区域)24 h 监视,从而达到增加弹道导弹预警时间和提高探测、跟踪与预报精度的目的。

2 美国 HEO 预警卫星发展情况

美国导弹预警卫星的发展主要经历了 3 个阶段^[1,5-11]:①“米达斯”计划,该系列卫星属于试验论证阶段;②国防支援计划(Defense Support Program, DSP),该系列卫星是迄今为止全球最

为成熟的、参与实战的预警卫星系统;③天基红外系统(SBIRS),该系列卫星是在 DSP 基础上进行改进与完善的,主要包括高轨部分和低轨部分,目前正处于研制部署过程中。已经部署的部分 SBIRS 高轨卫星中,包括 2 颗 HEO 卫星和 1 颗地球静止轨道卫星。目前 SBIRS 静止轨道卫星和 DSP 卫星协同工作,2 颗 HEO 卫星目前均已部署完成^[12],低轨卫星尚处于实验论证阶段,还没有成功部署。

由于受地球曲率与大气折射影响,DSP 星座只能对中低纬地区的弹道导弹进行早期预警,对高纬度地区的监视能力很差,甚至是不能探测。对于美国,在北极区域存在俄罗斯弹道导弹的威胁,因此,美国在 SBIRS 中发展了 HEO 预警卫星,将系统的预警能力扩展到北极区,从而弥补 DSP 星座的缺陷。这 2 颗大椭圆轨道预警卫星分别于 2006 年和 2008 年发射,目前与 DSP 星座组网工作。它最重要的任务是向美国本土司令部或战场的指挥官提供战略和战区弹道导弹的发射、飞行及全球的战区红外线数据和处理过的情报,对北极圈(北纬 60° 以上)进行全天时不间断覆盖。

3 美国 HEO 预警卫星覆盖性能仿真与分析

从美国整个 SBIRS 作战使命来看,其 HEO 预警卫星主要负责对北极圈内进行全天时不间断覆盖,以实现北极圈内弹道导弹目标的早期预警、战场空间感知和技术情报的收集。本文主要利用 STK 软件对美国在轨的 2 颗 HEO 预警卫星的轨道特性与覆盖性能进行分析。根据相关数据递推至北京时间 2010 年 10 月 20 日的 2 颗大椭圆轨道红外预警卫星相关参数如表 1 所示。这种轨道类似于俄罗斯的闪电轨道。

表 1 HEO-1 与 HEO-2 轨道基本参数

卫星	近地点高度 h_1 /km	近地点时刻	远地点高度 h_2 /km	远地点时刻	升交点赤经/ $^\circ$	轨道周期/h
HEO-1	2 246.30	2010-10-20T11:57:29	38 115.50	2010-10-20T05:58:51	204.967	11.95
		2010-10-20T23:49:17		2010-10-20T17:56:07		
HEO-2	1 377.88	2010-10-20T05:44:17	39 012.12	2010-10-20T11:43:12	275.636	11.96
		2010-10-20T17:42:08		2010-10-20T23:41:03		

根据摄动公式^[13]

$$\frac{dw}{dt} = \frac{0.75J_2\sqrt{\mu}R_e^2(4-5\sin^2 i)}{a^{7/2}(1-e^2)^2} \quad (1)$$

式中: w 为近地点幅角; J_2 为地球引力势二阶带谐系数; R_e 为地球赤道半径,本文取 $R_e =$

6 371 km; i 为轨道倾角; a 为长半轴; μ 为地球引力常数; e 为轨道偏心率。对 SBIRS-HEO 而言, $dw/dt=0$,可知 $4-5\sin^2 i=0$,得出轨道倾角 $i=63.434\ 948\ 8^\circ$ 。

根据长半轴公式

$$a = R_e + (h_1 + h_2)/2 \quad (2)$$

式中 h_1 与 h_2 分别为卫星近地点和远地点高度。

将表 1 中的相关数据代入式 (2), 可得: HEO-1 的长半轴 $a_1 = 26\,551.9$ km, HEO-2 的长半轴 $a_2 = 26\,566.0$ km。

根据偏心率公式

$$e = 1 - \frac{R_e + h_1}{a} \quad (3)$$

由表 1 可知, HEO-1 的近地点高度为 2 246.30 km, HEO-2 的近地点高度为 1 377.88 km, 代入式 (3) 得出, HEO-1 的轨道偏心率 $e_1 = 0.675\,5$, HEO-2 的轨道偏心率 $e_2 = 0.708\,3$ 。

根据上述相关参数, 利用 STK 软件^[14-15] 建立的三维场景视图与星下点轨迹如图 1 所示, 仿真得出 HEO-1 与 HEO-2 的经纬高与时间关系曲线分别如图 2 和图 3 所示。2 颗卫星的平近点角相差接近 180° , 即到达北半球远地点的时间相

差大约半个周期, 这样可以通过 2 颗 HEO 卫星交替对北极区域的覆盖, 实现对北极区域 24 h 不间断的监视。

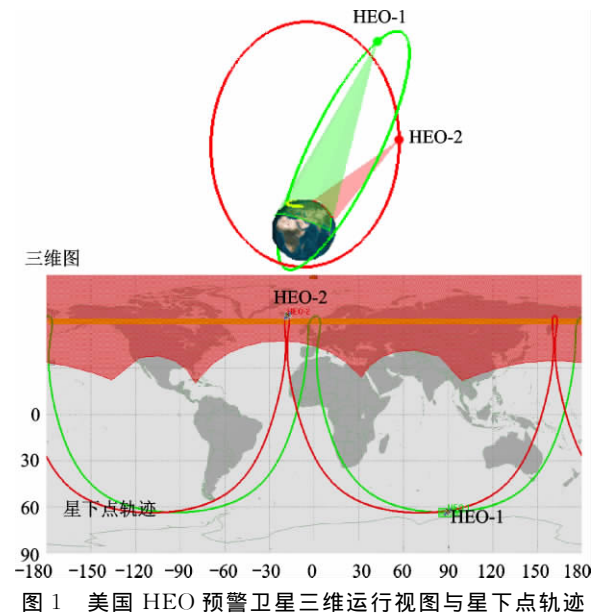


图 1 美国 HEO 预警卫星三维运行视图与星下点轨迹

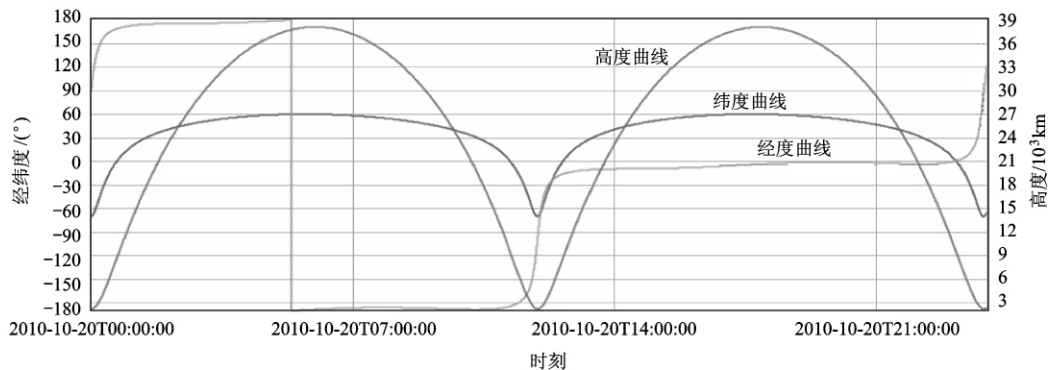


图 2 HEO-1 经纬高与时间关系曲线

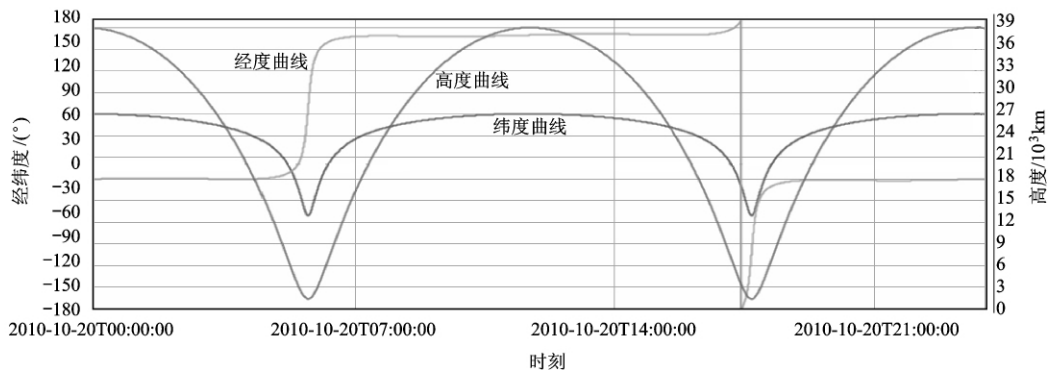


图 3 HEO-2 经纬高与时间关系曲线

因无法得到美国 HEO 预警卫星红外探测器的详细资料, 为便于分析, 本文假设美国 2 颗 HEO 预警卫星扫描相机的视场均为 $14^\circ \times 14^\circ$, 在对北极区域进行监视时, 探测器的视轴指向北极点。利用 STK 软件的仿真分析报告可得出, HEO-1 在 27 027 km 高度以上可实现北极圈的 100% 覆盖,

HEO-2 在 27 028 km 高度以上可实现北极圈的 100% 覆盖, HEO-1 与 HEO-2 的覆盖性能详细数据如表 2 所示。由表 2 可看出, 单个周期内, HEO-1 与 HEO-2 的对北极圈完成 100% 覆盖的时间均在 6 h 以上, 同一周期内其分别到达远地点的时间相差将近 6 h (周期的一半), 而且同一

周期内 2 颗卫星的 100%覆盖弧段也存在交叉覆盖。综上所述,HEO-1 与 HEO-2 组成的大椭圆

轨道星座足以实现对北极圈的全天时单重覆盖,完成对北极区域 24 h 的监视和探测。

表 2 HEO-1 与 HEO-2 覆盖性能分析

北纬 60°以上 100%覆盖率轨道弧段	时刻	卫星高度/km	飞行时间/h	占轨道周期的比例/%
HEO-1 弧段 1(27 027~38 116 km)	2010-10-20T02:33:00	27 028.69	6.860 0	57.40
	2010-10-20T09:24:42	27 027.08		
HEO-1 远地点 1	2010-10-20T05:58:51	38 115.50		
HEO-1 弧段 2(27 027~38 116 km)	2010-10-20T 14:30:16	27 028.78	6.860 0	57.40
	2010-10-20T 21:21:58	27 026.99		
HEO-1 远地点 2	2010-10-20T17:56:07	38 115.50		
HEO-2 弧段 1	2010-10-20T00:00:00	38 959.20	3.220 0	26.92
	2010-10-20T03:13:26	27 028.74		
HEO-2 弧段 2(27 028~39 012 km)	2010-10-20T08:10:49	27 028.12	7.079 5	59.19
	2010-10-20T15:15:35	27 030.00		
HEO-2 远地点 1	2010-10-20T11:43:12	39 012.12		
HEO-2 弧段 3	2010-10-20T20:08:40	27 029.48	3.855 0	32.24
	2010-10-20T24:00:00	38 923.35		
HEO-2 远地点 2	2010-10-20T23:41:03	39 012.12		

4 发展 HEO 预警卫星星座的对策与建议

在上述研究分析美国导弹预警卫星的发展历程、HEO 星座覆盖性能等的基础上,根据我国实际情况,总结出我国 HEO 预警卫星星座建设过程中,应当重点考虑以下几个方面的问题。

1) 根据我国面临的北极区域弹道导弹威胁态势考虑 HEO 星座的覆盖性能,实现北极区域的全天时覆盖,尤其是要对重点威胁区域实现多重覆盖,保证全天时的监视和对目标的立体探测。从上述仿真分析中可以看出,针对北极区域的弹道导弹威胁,美国 SBIRS 中的 HEO 星座只对北极圈区域进行全天时的单重覆盖。之所以这样,主要是由于美国在北极方向的本土部署了远程预警雷达,与预警卫星协同工作,完成对北极区域弹道导弹的早期发现与跟踪定位。对于我国而言,在北极区域主要面临美国和俄罗斯的弹道导弹威胁,我国大部分地区都在美国和俄罗斯部署在北极区域的远程弹道导弹射程之内。而我国本土最北边的纬度在 53°左右,受地球曲率的影响,地基远程预警雷达不足以完全覆盖北极圈,因此,我国若构建 HEO 星座应该考虑对北极圈进行双重或三重覆盖,保证对北极区域全天时的监视和对目标的立体探测,以便精确测定目标弹道。

2) 要考虑 HEO 星座预警卫星和地面站的备份问题。对于组网卫星以及固定地面站除了建立工作星和工作站之外,还应该建立相应的备份

星以及抗毁站和备份站,用以应对突发事件,保证卫星组网系统的连续正常工作,提高系统的稳定性、抗干扰能力和生存能力。

针对上述 2 个方面的考虑,本文提出下述相关对策与建议。

HEO 预警卫星探测器的成像质量和卫星的速高比有直接关系,速高比越小,成像效果越好。卫星在北极区域时,高度越高,其速度越小,这样对北极圈的成像效果越好。若相机的技术水平允许,可用 2 颗 HEO 预警卫星组网,实现对北极圈的全天时单重覆盖。而根据我国面临的威胁和有限的探测手段,并综合考虑卫星备份问题,笔者认为采用 3 颗 HEO 预警卫星组网:2 颗工作,1 颗备份,组成 HEO 星座。在保证对北极圈双重覆盖的同时,实现 HEO 星座卫星的备份。有 2 个前提:一是卫星的速高比和卫星载荷的视场必须支持每颗 HEO 卫星每圈对北极圈的覆盖时间至少达 8 h;二是每 2 颗卫星配合工作都可实现对北极圈的全天时单重覆盖。(由于无法得到卫星的速高比和成像质量的具体关系,本文不对其进行具体的验证分析,笔者在此只提出这种想法。)

笔者认为备份星可以从 2 个方面来理解:① 作为故障星的替补。星座的工作星数量保持不变,只有出现故障星的时候才启动备份星作为补充。② 作为红外数据备份。在常态情况下,由工作星执行常态监视任务,地面站只接收和处理工作星的红外探测数据。当常态监视过程中发现感兴趣的目标,则启用备份星,即恢复备份星与地

面站的数据通信,利用双星探测,提供立体视角,以获取精确的预警信息。

3) 要考虑我国当前技术发展水平和未来的技术发展趋势,兼顾当前的作战应用和未来的作战局势,综合制定我国 HEO 星座的发展规划和组网部署路线。由上述分析的美国导弹预警卫星发展历程可以看出,美国当今导弹预警卫星的成熟与先进离不开早期的长远规划、长期的试验论证与数据积累,早期的试验论证和数据积累为后续导弹预警卫星的发展提供了技术支持与数据支撑。美国 HEO 星座也是在前期“米达斯”计划和中期 DSP 技术基础上发展起来的。对于我国,不能急于求成,也不能过分拘泥于当前的技术水平而裹足不前。早期发射的预警卫星应以试验为主,积累技术经验和数据,为后续的长期发展打下坚实的技术基础。在系统设计和部署上,应充分考虑兼容性因素,强调功能的可拓展性。一旦将来预警需求发生变化,能够依据新的预警需求,利用最前沿的技术定期对其进行改造,拓展其功能,以减少系统升级或换代的成本和时间周期,保证我国空间应用能力的持续发展。

5 结束语

进入 21 世纪,军事航空与航天、防空与防天在作战需求的牵引下,在空中目标高速化、高空化、无人化的发展趋势下,空天领域高度融合,加速了空天一体化作战样式的形成。为应付全球弹道导弹的威胁,发展预警卫星成为必然趋势。因此,加强对美俄 HEO 预警卫星的分析和了解,可以为我国预警卫星的发展与研制提供相应的借鉴与参考。

参考文献 (References)

- [1] 吕文平,李为民,黄仁全.国外天基导弹预警系统发展关键技术分析[J].飞航导弹,2011(8):66-69.
- [2] 许松,闫世强,刘辉,等.美俄导弹预警卫星的发展与启示[J].电子工程,2011(3):1-6.
- [3] 张育林,范丽,张艳,等.卫星星座理论与设计[M].北京:科学出版社,2008:30-37.
- [4] 张雅声,姚勇.异构预警卫星星座设计与分析[J].装备指挥技术学院学报,2009,20(3):47-51.
- [5] 许松,闫世强,刘辉,等.STK在导弹预警卫星仿真中的应用[J].舰船电子对抗,2011,34(5):76-80.
- [6] 郭文鸽,冯书兴.美国导弹预警卫星系统分析及其启示[J].中国航天,2005(12):39-42.
- [7] 陈富生.从DSP到SBIRS:美国导弹预警卫星系统的发展[J].现代军事,2001(5):35-37.
- [8] 于昕.美俄导弹预警卫星发展现状[J].太空探索,2011(7):47-49.
- [9] 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.
- [10] 葛之江,刘杰荣,张润宁,等.美俄导弹预警卫星的发展与现状[J].航天器工程,2003(4):38-44.
- [11] 吕文平,李为民,黄仁全.国外天基导弹预警系统发展关键技术分析[J].飞航导弹,2011(8):66-69.
- [12] 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,2012,32(2):7-12.
- [13] 蒙波,韩潮,黄卫俊.区域覆盖特殊椭圆轨道星座优化设计[J].北京航空航天大学学报,2008,34(2):167-170.
- [14] 杨颖,王琦.STK在计算机仿真中的应用[M].北京:国防工业出版社,2005:104-120.
- [15] 张雅声,樊鹏山,刘海洋,等.掌握和精通卫星工具箱 STK[M].北京:国防工业出版社,2011:201-225.

(编辑:王高翔)