

# 美军 SBIRS GEO - 1 预警卫星探测预警能力分析

李小将<sup>1</sup>, 金山<sup>2</sup>, 廖海玲<sup>3</sup>, 王建华<sup>3</sup>

(1. 装备学院航天装备系, 北京 101416; 2. 沈阳军区司令部, 沈阳 110805; 3. 装备学院研究生管理大队, 北京 101416)

**摘要:**为有效应对弹道导弹威胁, 维护本土与盟国利益, 美军不断发展完善其天基红外预警系统。介绍了美军天基红外系统的发展现状, 分析了首颗天基红外系统静止轨道(SBIRS GEO - 1)卫星的覆盖范围, 建立了SBIRS GEO - 1卫星的红外探测模型和弹道预警模型, 对其在轨探测预警能力进行了初步仿真分析。

**关键词:**预警卫星; SBIRS; 红外探测; 弹道预警

中图分类号: TN219 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2013.01.001

## Analysis on infrared detecting and early warning capabilities of America's SBIRS GEO - 1 satellite

LI Xiao-jiang<sup>1</sup>, JIN Shan<sup>2</sup>, LIAO Hai-ling<sup>3</sup>, WANG Jian-hua<sup>3</sup>

(1. Department of Space Equipment, the Academy of Equipment, Beijing 101416, China; 2. Shenyang Military Area Command, Shenyang 110805, China; 3. Company of Postgraduate Management, the Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

**Abstract:** For effectively responding to the threats of ballistic missiles and protecting the US's national and allies' interests, the US army continually develops and consummates the space-based infrared early warning system. The paper introduces the status and development of US's space-based infrared system, explores the coverage characteristic of the first space-based infrared geosynchronous orbit satellite, builds the GEO-1 satellite's infrared detecting model and early warning model, analyzes the detecting and early warning efficiencies of SBIRS GEO-1 satellite.

**Key words:** early warning satellite; space-based infrared system; infrared detecting; ballistic warning

### 1 引言

天基红外系统(space based infrared systems, SBIRS)是美军为取代国防支援计划(defense support program, DSP)卫星而设计部署的新型天基红外预警系统, 美军赋予天基红外系统的四大任务为导弹预警(Missile Warning)、导弹防御(Missile Defense)、技术情报(Technical Intelligence)和战场态势生成(Battle Space Characterization)<sup>[1]</sup>。2006年和2008年美国将两颗搭载红外预警载荷的侦查卫星分别送入可观测北极地区的2个大椭圆轨道。2011年5月, 美国空军第45太空联队在卡纳维拉尔角发射场第41发射台用宇宙神-5运载火箭将SBIRS GEO - 1卫星顺利送入预定轨道。按照美军计划, 第二颗地球同步轨道卫星将于2012年发射, 2016

年, 前天基红外系统的4颗地球同步轨道卫星将全部部署到位, 届时由地球同步轨道和极地大椭圆轨道构建的SBIRS - HIGH高轨部分将全部完成。

美军研究和建立天基红外系统基于多方面的考虑, 主要包含国际秩序中弹道导弹技术和核技术的不断提升、部分国家和地区的潜在威胁、美国现役国防支援计划红外预警系统的漏警、虚警缺陷和美国日益重视和致力提升的全球军事与经济利益这四个因素; 此外, 新型天基红外系统的构建与实战部署对加强美军弹道导弹防御系统整体作战性能和提升导弹预警效率有着十分重要的意义。

作者简介: 李小将(1973 -), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为装备与运用工程。E-mail: wangjianhua1226@126.com  
收稿日期: 2012-04-09; 修订日期: 2012-05-06

针对美军新一代天基红外预警系统,本文介绍了 SBIRS 的发展现状,探讨了首颗天基红外系统地球静止轨道(SBIRS GEO-1)卫星的覆盖范围,建立了 SBIRS GEO-1 卫星的红外探测模型和弹道预警模型,对其在轨探测预警能力进行了初步分析。

## 2 美军 SBIRS 研究发展现状

天基红外系统卫星星座由天基红外系统低轨部分(SBIRS LOW)和天基红外系统高轨部分(SBIRS HIGH)构成。SBIRS LOW 由飞行在多个轨道平面上的低轨道(LEO)卫星组成;SBIRS HIGH 由5颗地球静止轨道(GEO)卫星和2颗大椭圆轨道(HEO)卫星构成<sup>[2]</sup>。

SBIRS LOW: 19世纪80年代,美国战略防御局提出由多颗近地轨道卫星组成的“慧眼”(Brilliant Eyes)卫星星座计划;1993年,该计划移交美国空军,1994年,美国国防部提出在该计划基础上建造多轨道组合型天基预警系统——天基红外系统。同年,“慧眼”系统更命名为“太空与导弹跟踪系统”(SMTS),并作为天基红外系统低轨(SBIRS-LOW)部分;2002年,SBIRS-LOW 被导弹防御局(前美国弹道导弹防御办公室)改名为“空间跟踪与监视系统”(STSS),不久因技术和经费原因,STSS 计划调整为小规模试验计划;2003年,进行 STSS 系统的初始硬件检测,系统能力检查,载荷设计和部分地面站设计工作;2004年,进行系统兼容性测试,2005年~2007年,对 STSS 系统卫星进行综合与测试;2009年,发射两颗演示验证星,之后美军一直进行卫星在轨测试和载荷验证等工作<sup>[3]</sup>。

SBIRS HIGH: SBIRS HIGH 卫星用以替代 DSP 星座,由新型地球同步轨道和搭载红外载荷的大椭圆轨道卫星构成。1996年,Lockheed Martin 公司开始研制 SBIRS 高轨卫星,因进度缓慢和经费超支,2002年,项目调整为红外传感器设计,交付时间由预计的2003年推迟到2004年;2005年末,五角大楼决定减少 SBIRS 系统为2个大椭圆轨道和2个地球同步轨道卫星;2006年 SBIRS HEO-1 红外传感器搭载于 NROL-22 侦查卫星发射成功。2007年,研发(alternative infrared satellite system, ARISS)系统用以替代2~3个 SBIRS GEO 卫星;2008年,SBIRS HEO-2 红外载荷搭载于 NROL-28 侦查卫星成功发射,ARRISS 系统更名为 IRAS(infrared augmentation satellite)。2009年10月,SBIRS GEO-1 卫星进行

热真空试验;2010年1月,验证其运行状态、性能与地面系统协作能力;2010年12月,完成集成测试。2011年3月,运送至卫星发射场,5月7日发射,卫星通过6次变轨进入地球同步轨道<sup>[4]</sup>。SBIRS GEO-2 卫星2010年完成初期测试;2011年5月,完成集成测试;预计2012年中期发射。2012财年的国防预算中,美国空军计划采购第5、6颗 SBIRS 卫星,将于2018年完成 SBIRS 高轨部署。

## 3 SBIRS GEO-1 卫星覆盖范围分析

美军首颗 SBIRS GEO 卫星于2011年5月7日发射,进入近地点200 km,远地点36000 km的地球同步转移轨道,8日卫星远地点发动机首次点火进行轨道提升,开启太阳能电池板、天线和防护设备,进行六次变轨后定位于西经99°。2011年6月,红外载荷开始收集短波、中波红外信息。2012年2月,卫星开始传送给顶红外情报数据,预计18个月后,卫星将具备全面的弹道导弹预警能力,可参与弹道导弹防御试验与作战任务。

天基红外系统 GEO 卫星装有扫描型和凝视型两种探测器,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。GEO 卫星扫描型探测器扫描视场为 $10^{\circ} \times 20^{\circ}$ ,文中采用平行于地轴视场角度为 $10^{\circ}$ ,垂直于地轴视场角度为 $20^{\circ}$ 的观测方式,该方式可避免对两级地区的重复覆盖,可对地球近地空间实施较好覆盖,若采用相反方式,则近地空间会产生扫描盲区,扫描型探测器扫描周期为9 s,凝视型探测器视场 $0.44^{\circ} \times 0.44^{\circ}$ ,扫描周期为2 s<sup>[5]</sup>。

美军将首颗 SBIRS 地球同步卫星定点于西经99°与美军军事战略重心有直接联系,从保卫本土利益的角度出发,潜射弹道导弹成为美军的最大威胁。定点于该范围美军可有效监控美国周边海洋范围的红外威胁,尤其潜射弹道导弹和海军试验演习等战略动作;此外,定点于该位置对美军重返亚太地区可提供重要的情报支撑,对实时监测中、俄的弹道导弹发射和海军军事行为有突出的优势。

如图1所示卫星空间覆盖与地球表面覆盖示意图。图中白色区域表示凝视型探测器瞬时覆盖扫描范围,蓝色区域表示扫描型探测器覆盖范围。

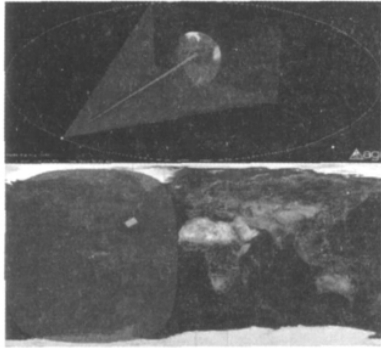


图1 SBIRS GEO-1 覆盖范围

#### 4 SBIRS GEO 卫星在轨探测模型

红外预警卫星扫描探测器采用焦平面红外阵列传感器,根据平面阵列中各个单元探测器所对应目标平面各单位面积辐射强度产生的光电信号进行搜索、探测与跟踪<sup>[6]</sup>。弹道导弹红外辐射特征波长为  $2.7\ \mu\text{m}$ 、 $4.3\ \mu\text{m}$  和  $6.3\ \mu\text{m}$ 。红外预警卫星所用红外探测器必须是对上述波段反应敏感的传感器,美军天基红外系统采用多谱线探测器,包含  $3\sim 8\ \mu\text{m}$  中波段红外、 $8\sim 12\ \mu\text{m}$  中波段红外和  $12\sim 16\ \mu\text{m}$  长波段红外,该探测波段可以获得完整的弹道导弹红外光谱特性。除采用多波段探测技术外,天基红外系统 GEO 卫星使用了新型的“See-To-Ground”传感器,弹道导弹发射瞬间即可被探测和锁定,从而实现预警卫星对导弹的探测摆脱地球大气的红外吸收和衰减作用,达到零延时随即发现与跟踪。

分析预警卫星的探测能力,可把预警卫星红外接收系统的探测距离作为替代,红外接收系统探测距离可视为线性阵列探测器作用距离。红外系统探测距离由目标红外辐射特性、目标尺寸、大气透过特性、红外系统光学参数和噪声参数等决定。SBIRS GEO-1 卫星主要用于探测助推段弹道导弹,助推段飞行的弹道导弹大部分弹道处于大气层内,预警卫星对助推段弹道导弹的侦测要以地球的大气为背景,会产生背景噪声,即大气层背景光子会到达红外探测器从而产生随机起伏的噪声信号。预警卫星探测系统为背景噪声限系统,作用距离为背景噪声限点源目标作用距离方程。

背景噪声限红外探测系统探测率  $D_\lambda^*$  为:

$$D_\lambda^* = \frac{\lambda}{ghc} \left( \frac{\eta}{Q_b} \right) \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为波长;  $g$  为常数,光导型探测器  $g=2$ ,光伏型探测器  $g=\sqrt{2}$ ;  $h=6.626176 \times 10^{-34}\ \text{W} \cdot \text{s}^2$  为普朗

克常数;  $c=2.99792458 \times 10^8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  为光速;  $\eta$  为探测器量子效率;  $Q_b$  为到达探测器的背景光子通量,  $Q_b = \lambda p / hc$ ;  $p$  为探测器接收来自背景红外辐射功率。

地球同步轨道卫星轨道距离地心  $42164.171\ \text{km}$ , 弹道导弹与卫星探测器距离很远,探测器张角小于系统瞬时视场,可以作为点目标处理,卫星红外探测系统作用距离可表示为:

$$R = (I_{\lambda_1-\lambda_2} \tau_\alpha)^{1/2} (A_0 \tau_0)^{1/2} (D_\lambda^*)^{1/2} \cdot \left( \frac{1}{K(1+\gamma) \sqrt{\Delta f \cdot A_d}} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中  $I_{\lambda_1-\lambda_2}$  为探测目标红外辐射强度;  $\tau_\alpha$  为探测器工作波段内的大气平均透过率;  $A_0$  为光学系统的有效入射孔径面积  $A_0 = \pi D^2 / 4$ ;  $D$  为光学系统口径;  $\tau_0$  为光学系统透过率;  $D_\lambda^*$  为红外探测器探测率,如式(1);  $K$  为红外探测系统门限信噪比;  $\gamma$  为系统噪声增加的百分数;  $\Delta f$  为等效噪声带宽;  $A_d = \alpha^2$ ,  $\alpha$  为红外探测器像元尺寸。

#### 5 SBIRS GEO 卫星弹道预警模型

对敌方或威胁方弹道导弹弹道进行探测、估算和预警是红外预警卫星的重要任务。根据所得弹道导弹助推段弹道和关机点参数,确定弹道导弹发射坐标、主动段弹道、关机点速度、弹道倾角、关机点高度等参量,以此估算弹道导弹型号、弹道导弹被动段飞行时间、弹道导弹再入点位置和弹道导弹落点等反导弹关键数据,完成对敌方弹道导弹的预警。

##### 5.1 弹道导弹发射点探测

弹道导弹点火发射后会有若干秒的垂直上升段,之后才会启动转弯或突防等飞行程序,因天基红外系统 GEO 卫星具备 See-To-Ground 探测能力,可作如下假设,正常情况下扫描型探测器以固有扫描周期进行全覆域扫描,一旦检测到可疑红外目标,则立即锁定该红外目标源,并以此为起点进行后续扫描工作,根据上述假设 SBIRS GEO 卫星完全可以记录并确认该弹道导弹发射位置的地球经、纬信息 ( $\lambda_{\text{发射}}, \varphi_{\text{发射}}$ )。若设定从弹道导弹发射到预警卫星发现目标的时间为  $T_{\text{发现}}$ ,则  $T_{\text{发现}} \approx 0\ \text{s}$ ,从探测延迟和红外系统工作效率出发,本文假定  $T_{\text{发现}} = 0 \sim 1\ \text{s}$ 。此外,设定传感器发现红外威胁目标即视为扫描型红外探测器的第一次目标探测。

##### 5.2 弹道导弹关机点探测

弹道导弹助推段关机点数据决定弹道导弹中段

弹道基本特征,对弹道导弹弹道预警、飞行时间预报和拦截策略分析有重要作用。

扫描型探测器在扫描  $n_{\text{扫描}}$  次后确认观测目标为威胁目标,并将初步探测数据交予凝视型探测器,任务交换用时  $T_{\text{交换}}$ ,之后凝视型探测器以周期  $T_{\text{凝视}} = 2\text{ s}$  的扫描速率进行精确跟踪扫描,根据红外辐射理论,发动机关机前温度较高,弹道导弹以辐射短波红外为主,发动机关机后,弹体则主要向外辐射中、中长波红外,以凝视型探测器所观测红外光突变来判断弹道导弹助推段关机点,自扫描型探测器与凝视型探测器进行任务交换之后,凝视型探测器  $n_{\text{关机前}}$  次(两探测器任务交换后即认为凝视型探测器开始一次扫描)扫描为短波红外,第  $n_{\text{关机后}} = n_{\text{关机前}} + 1$  次扫描突变为中、中长波红外,则可以确认弹道导弹关机点处于这两次扫描之间,则弹道导弹关机时刻  $T_{\text{关机}}$  满足:

$$\begin{cases} T_{\text{关机}} \geq 9 \times (n_{\text{扫描}} - 1) + T_{\text{交换}} + 2 \times (n_{\text{关机前}} - 1) \\ T_{\text{关机}} \leq 9 \times (n_{\text{扫描}} - 1) + T_{\text{交换}} + 2 \times n_{\text{关机前}} \end{cases} \quad (3)$$

预警卫星根据所探测红外线的不同波长辐射强度之比以及辐射强度的变化换算出目标的速度和加速度<sup>[7]</sup>。假设天基红外系统 GEO 卫星对所凝视目标的速度与加速度探测推算满足实时性,即没有误差。根据在轨 DSP 卫星和地面探测设备的协同可确定目标的实际高度,则卫星关机点  $k$  处数据满足:

$$\begin{cases} \nu_{\text{关机前}} \leq \nu_k \leq \nu_{\text{关机后}}; a_{\text{关机前}} \leq a_k \leq a_{\text{关机后}} \\ r_{\text{关机前}} \leq r_k \leq r_{\text{关机后}} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $\nu$  表示速度;  $a$  表示加速度;  $r$  表示地心距。

视关机点前后弹道导弹做匀加速飞行,则弹道导弹关机点数据可近似表示为:

$$\begin{cases} \nu_k = \frac{\nu_{\text{关机后}} + \nu_{\text{关机前}}}{2} \\ r_k = \frac{r_{\text{关机后}} + r_{\text{关机前}}}{2} \end{cases} \quad (5)$$

弹道导弹关机点的弹道倾角对中段弹道有着决定性作用,因关机点弹道倾角为关机点速度矢量方向与该点对应星下点(地球近似为圆球型)水平方向的夹角(锐角),根据预警卫星所得速度、高度等数据,关机点弹道倾角  $\Theta_k$  可近似表示为:

$$\Theta_k = \arcsin\left(\frac{\Delta L}{r_{\text{关机后}} - r_{\text{关机前}}}\right) \quad (6)$$

式中  $\Delta L$  表示  $n_{\text{关机前}}$  次扫描与  $n_{\text{关机后}}$  次扫描红外目

标移动距离大小,可表示为  $\Delta L = H_{\text{同步}} \times \Delta\delta$ ;  $H_{\text{同步}}$  为同步卫星轨道高度;  $\Delta\delta$  为两次扫描红外探测器对地张角。

### 5.3 弹道导弹射程与飞行时间估算

根据所估测的弹道导弹关机点速度、地心距和弹道倾角等数据,可得关机点能量参数  $\nu_k$  为:

$$\nu_k = \frac{V_k^2 \cdot r_k}{\mu} \quad (7)$$

式中  $\mu = f \cdot M$  为地球引力常数;  $f$  为引力常数;  $M$  为地球质量。

由此弹道导弹自由段(中段)射程角  $\beta_{k-e}$  计算公式表示为:

$$\beta_{k-e} = 2 \arctan\left(\frac{\nu_k \cdot \sin\Theta_k \cdot \cos\Theta_k}{1 - \nu_k \cdot \cos^2\Theta_k}\right) \quad (8)$$

式中  $\nu_k$  为能量参数;  $\Theta_k$  为关机点弹道倾角。

弹道导弹再入点与关机点的星下点对应弧线长度(中段射程)  $L_{k-e}$  为:

$$L_{k-e} = R_e \times \beta_{k-e} \quad (9)$$

式中  $R_e$  为地球平均半径。

同时,根据预警卫星所得关机点和主动段有关数据可得中段椭圆弹道圆锥曲线参数半长轴  $a$  和偏心率  $e$  如下:

$$\begin{cases} a = \frac{\mu \cdot r_k}{2\mu - r_k \cdot V_k^2} \\ e = \sqrt{1 + \nu_k(\nu_k - 2) \cos^2\Theta_k} \end{cases} \quad (10)$$

由此可得弹道导弹中段自由飞行时间  $T_{k-e}$  为:

$$T_{k-e} = 2 \cdot \sqrt{\frac{a^3}{\mu}} \left[ \cos^{-1} \frac{1 - \nu_k}{e} + e \cdot \sin\left(\cos^{-1} \frac{1 - \nu_k}{e}\right) \right] \quad (11)$$

## 6 算例仿真与结果分析

### 6.1 探测能力仿真分析

根据已有天基红外预警卫星的资料数据,设置天基红外系统参数如表 1<sup>[5]</sup> 所示。

表 1 探测系统参数设定

参数名称	设定值
红外探测器平均探测率 $D_A^*$	$8 \times 10^{11} \text{ W}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}$
光学系统孔径 $D$	0.5 m
大气平均透过率 $\tau_a$	0.95
光学系统透过率 $\tau_0$	扫描型 0.86
等效噪声带宽 $\Delta f$	20 Hz
探测器象元尺寸 $\alpha$	30 $\mu\text{m}$
背景红外辐射亮度	10.6 $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$
系统噪声增加百分数 $\gamma$	5%

此外,探测系统门限信噪比  $K$  和弹道导弹助推段红外辐射强度  $I_{\lambda_1-\lambda_2}$  两个变量 根据文中建立的探测模型可以得到红外预警卫星的探测距离曲线,如图 2 所示。

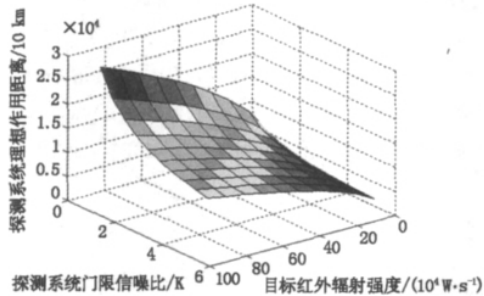


图2 星载红外探测系统作用距离

根据设定的参数值,得到美军 SBIRS GEO 卫星的作用距离可达到  $1 \times 10^5$  km 量级,相对其 40000 km 的地心距,探测系统有足够的探测和跟踪地球上发射的弹道导弹。探测系统的门限信噪比  $K$  直接决定探测系统的效率和对红外信号的侦收能力  $K$  越低说明探测器越灵敏,能够有效接收红外信号的门槛就越低,同时探测系统的作用距离就越远;目标红外辐射强度越高,被探测系统发现和跟踪就越容易,探测系统也就能在更远的距离发现目标。

### 6.2 弹道预警能力仿真分析

从关机点相关参数和中段弹道预估两方面进行弹道预警分析,假设某型弹道导弹的主动段数据如下:

主动段飞行时间 80 s,关机点速度 6.4 km/s,平均加速度  $80 \text{ m/s}^2$ ,径向平均加速度  $45.88 \text{ m/s}^2$ ,切向平均加速度  $65.53 \text{ m/s}^2$ ,关机点弹道倾角  $35^\circ$ ,SBIRS GEO 卫星探测数据如表 2 所示。

表 2 部分卫星扫描数据

采样次数	发射时间	速度	高度
1	1 s	15 m/s	10 m
2	10 s	800 m/s	2.294 km
3	12 s	960 m/s	3.303 km
4	14 s	1.12 km/s	4.496 km
.....	.....	.....	.....
36	78 s	6.24 km/s	139.56 km
37	80 s	6.4 km/s	146.82 km
38	82 s	6.38 km/s	154.15 km

根据仿真条件,卫星扫描 37 次后弹道导弹发动机关机,弹道导弹进入自由飞行中段,由扫描数据可得,如表 3 所示。

表 3 预测值和实际值比较

弹道数据名称	预测值	实际值	差值
关机时刻/s	$80 \leq T_{\text{关机}} \leq 82$	80	0 ~ 2
关机点速度/ $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	6.39	6.4k	0.01
关机点高度/km	150.49	146.82	3.67
弹道倾角/ $(^\circ)$	35.4795	35	0.4795
能量参数	0.6681	0.6698	0.0017
自由段射程角/ $(^\circ)$	59.0949	59.3756	0.2807
自由段射程/km	6571	6617.6	46.6
自由飞行时间/s	967.38	964.39	2.99

如图 3 所示,由所得数据进行弹道模拟,实际弹道曲线与预警弹道曲线重合,说明二者吻合很好。

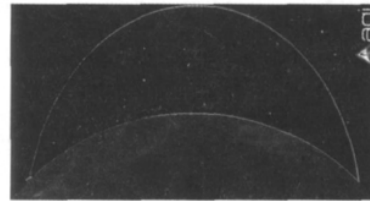


图 3 实际弹道与预警弹道

经过数值仿真,天基红外系统 SBIRS GEO 卫星可有效完成对弹道导弹主动段和自由段的探测与预警,可为美军实施弹道导弹拦截提供可靠的弹道信息和时间差,对美军的弹道导弹防御系统性能的提升具有重要作用。

### 7 总结

美军天基红外系统正处于紧张研发和部署阶段,其新型天基红外预警系统可快速提升美军弹道导弹防御系统的作战效能,为美军实现单边核威慑提供重要保障,也对弹道导弹各个飞行段的突防手段和策略提出更大的挑战。

### 参考文献:

[1] Nancy S Andreas. Space-based infrared system (SBIRS) system of system [J]. IEEE, 1997: 429 - 437.

[2] Zhang Fan. The analysis and simulation of missile warning satellite [D]. Beijing: The Academy of Equipment Command and Technology, 2006: 11 - 13. (in Chinese)  
张帆. 导弹预警卫星系统分析与仿真 [D]. 北京: 装备指挥技术学院, 2006: 11 - 13.

[3] Liu Lei, Si Lei, Hua Weihong. Reviews on US's space tracking and surveillance system [J]. 863 Advanced Defense Technology, 2010, 6: 17 - 27. (in Chinese)  
刘磊, 司磊, 华卫红. 美国空间跟踪与监视系统发展情况综述 [J]. 863 先进防御技术, 2010, 6: 17 - 27.

- [4] Jane's Information Group. Space based infrared system (SBIRS) [J]. Jane's Space System and Industry, 2011-07.
- [5] Wen Xianqiao, He Wei. Analysis on america early warning satellite system [J]. 863 Advanced Defense Technology, 2007, 7: 1-22. (in Chinese)  
温羨桥, 何威. 美国预警卫星系统分析 [J]. 863 先进防御技术, 2007, 7: 1-22.
- [6] Xu Nanrong, Bian Nanhua. Infrared radiation and guidance [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1997, (6): 53-58. (in Chinese)  
徐南荣, 卞南华. 红外辐射与制导 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1997, (6): 53-58.
- [7] Gao Guiqing, Liu Gang, Liu Fenglin. Research on early warning ability of DSP satellite to TBM [J]. Modern Defense Technology, 2007, 35(4): 79-82. (in Chinese)  
高桂清, 刘刚, 刘凤林. 预警卫星对战术弹道导弹预警能力研究 [J]. 现代防御技术, 2007, 35(4): 79-82.