文章编号:1001-5078(2018)08-0999-06

· 红外技术及应用 ·

天基红外系统对滑翔式高超目标探测性能分析

刘晓磊,董小萌,王 通,王虎妹,王世涛 (中国空间技术研究院总体部,北京100094)

摘 要:目前试飞成功的临近空间高超目标已经成为潜在威胁,对临近空间高超目标的预警探测成为新的研究方向。美国天基红外系统(SBIRS)是现阶段最完整最先进的天基预警系统。 本文分析了助推滑翔式高超目标 HTV -2 的目标特性,以天基红外系统为研究对象,分析了其 对高超目标全程探测性能,包括探测模式、探测覆盖性以及探测能力。

关键词:天基红外系统;临近空间高超目标;探测性能

中图分类号:TN219 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2018.08.010

Analysis of SBIRS performance for the detection of HTV – 2

LIU Xiao-lei, DONG Xiao-meng, WANG Tong, WANG Hu-mei, WANG Shi-tao

(Institute of Spacecraft System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract:Nowadays, the near space hypersonic aircrafts that has made a successful test flight has become serious potential threats, the early warning and detection of the near space hypersonic target have become a new research direction. SBIRS is the most advanced early warning system. In this paper, the main categories and characteristics of HTV -2 is analyzed, on the basis of the introduction of the working mechanism of SBIRS, the applicability of SBIRS to the HTV -2 detection is analyzed.

 $Key \ words: {\rm SBIRS}, near \ {\rm space} \ hypersonic \ target, detection \ performance$

1 引 言

临近空间高超声速飞行器是未来具有颠覆性的 全球打击武器。近年来,高超武器的连续试飞成功 给防空反导系统带来了严峻挑战。高超武器是一种 新研制的空天武器,其区别于弹道导弹以及空中目 标,传统防空反导系统难以实现对其有效预警探测, 对高超目标探测技术研究意义重大。

天基系统具有"站得高、看得远"特点,且不受 国界限制,对此类高速目标探测相比于地基探测系 统优势明显,据调研分析,美国早在20世纪60年代 就提出并实施采用天基系统探测弹道导弹目标的计 划(天基红外系统)。因此,天基探测是未来实现高 速目标探测的有效途径之一。本文以 HTV-2 助推 滑翔类高超目标为探测对象,针对目标全程特性分 析,以天基红外系统为探测系统,开展了天基红外系 统对滑翔类高超目标全程探测的可行性分析工作。

2 高超目标特性分析

当前,临近空间高超目标主要分为两种类型,一 种是类似HTV-2的助推滑翔类高超目标,其采用 运载火箭发射到一定高度,后进入大气层做类似 "打水漂"的滑翔运动,该类目标速度最大可达20 Ma(即20倍声速),后续将详细介绍目标特性;另一 种是主动巡航式高超目标,典型的是X-51A目标, 该类目标具有超燃冲压发动机,可主动巡航,速度为

作者简介:刘晓磊(1988 -),男,硕士研究生,工程师,目前主要从事天基红外弱小目标探测技术研究。E-mail: xlliuhit @ 163. com

收稿日期:2018-01-05;修订日期:2018-03-06

3~5 Ma^[1]。本文的高超目标探测主要是针对速度 达到 20 Ma 的助推滑翔类高超目标。

2.1 HTV-2 目标运动特性分析

被动滑翔类临近空间高超目标飞行全过程可分为助推段、再入段、滑翔段,图1为HTV-2典型飞行剖面示意图。



Fig. 1 The flight section of HTV -2

各阶段运动特点如下:

(a)助推段

助推段指从运载火箭起飞至 HTV - 2 与火箭分 离的阶段,此阶段类似于卫星的发射阶段,首先运载 火箭点火起飞,当达到预定高度和速度后,与 HTV

-2 分离,随后 HTV -2 进入再入段。

根据美国开展试验的 HTV - 2 计划情况,助推 段特征:

分离点高度:约150 km

飞行距离:1000 km~1800 km

分离时间:约5 min

(b)再入段

再入段是指 HTV - 2 与运载火箭分离后,由 150 km 高度再入大气层内的阶段,此阶段目标为自 由滑行状态。该阶段的特征为:

滑行高度:150 km(运载分离高度)至60 km(高 超滑翔高度)之间;

滑行距离:1800 km~2600 km

滑行时间:6~9 min

(c)滑翔段

滑翔段是 HTV - 2 的主要飞行阶段,由于 HTV - 2 特殊的升力体构型,保证了其能够进行无动力 滑翔,根据目前资料分析,其滑翔段的主要特征为:

滑翔高度:30 km~60 km

滑翔距离:3000 km 至上万千米

滑翔速度:约20 Ma

滑翔时间:10 min~50 min

2.2 HTV-2 目标辐射特性分析

(a)助推段

由上面的分析可知,高超目标助推段由常规的 火箭发动机推动飞行,其红外特性与弹道导弹类似, 发动机喷焰是主要的辐射源。根据调研结果,导弹 主动段在 2.7~2.95 μm 波段辐射强度为 50000 W/ sr,4.2~4.45 μm 波段为 40000 W/sr。

(b)再入段

高超目标与运载火箭分离后,最初一段时间将 延续在整流罩中状态,没有经过大气摩擦生热,属于 常温目标。其温度变化特性与常规弹头类似,在太 阳辐照、自身红外辐射及地球辐照等综合作用下温 度慢变,由于滑行时间短,温度变化不大,红外辐射 以长波为主。

假定弹头温度 300 K,以黑体辐射定律计算,其 中心波长位于 10 μm,根据中远程弹头发射率 0.7, 高超弹头面积 2 m²,可计算得出其再入段 8 ~ 10 μm 红外辐射强度为 39 W/sr,8 ~ 12 μm 红外辐射强度 为 77.2 W/sr。

(c)滑翔段

滑翔段的高超目标进入高超音速飞行阶段,在 30~60 km 高度高速飞行时,弹体与大气摩擦生热, 致使弹体的温度很高。图 2 为飞行高度 50 km,速度 15 Ma 的 HTV - 2 流场分析结果,从图中可以看出,弹 体温度为 1000~2000 K 左右。根据调研,HTV - 2 滑 翔段 3.7~4.8 μ m 辐射强度为 4000~10000 W/sr(不 同俯仰、方位角下目标特性不同)^[2-4]。



图 2 HTV - 2 流场仿真分析结果
Fig. 2 HTV - 2 flow emulation analysis result
3 天基红外系统对高超目标探测可行性分析
3.1 天基红外系统简介

(1)高轨预警系统

天基红外系统由高轨预警系统和低轨预警 系统组成,根据资料调研,高轨预警系统包括4 颗 GEO 卫星和2颗 HEO 卫星。GEO 卫星主要 实现全球中低纬度地区的覆盖,HEO 卫星主要实 现对北极地区的覆盖。由于资料有限,对于高轨 预警卫星星座轨道详细参数尚不清楚,只是一些 研究文献对其可能的星座构型进行了推测分析。 尤其对于 HEO 卫星,其可能的轨道参数如表1 所示。

表1 美国 HEO 预警卫星一种可能的轨道参数

Tab. 1 One possible orbit parameter of HEO satellites

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	62 40	26610 22411	0 7426007	2700	220. 2159°	180°
HEO – 2	05.4	20010. 2241 km	0. 7420007	270	40. 2159°	170°

高轨预警卫星配备大区域扫描载荷,其中 GEO 卫星载荷视场可达 10°×20°,HEO 载荷视场为 15° ×15°。两类卫星载荷均采用大气吸收波段(2.7 μm、4.3 μm)对弹道导弹主动段进行探测发现,采 用此波段的原因是,一方面,此波段为导弹尾焰的发 射峰波段,目标特性强;另一方面,此为大气吸收波 段,当导弹飞离地面一定高度时,大气将地面复杂背 景吸收,探测背景简单,目标与背景形成较大对比 度,信噪比高。

(2)低轨预警系统

美国的低轨预警系统,又称 STSS 系统,STSS 主要任务是对中段导弹进行跟踪识别,提供技术情报。 根据文献[5-7]的研究,认为 STSS 采取的是 Walker-Delta 构型,由 20~30 颗卫星组成。一种假设的 星座轨道为,低轨预警系统由 3 个轨道面的 24 颗卫 星组成(每个轨道面 8 颗),均采用太阳同步极地近 圆轨道,轨道倾角 90°,轨道高度为 1600 km,其架构 可描述为 24/3/1^[5-7]。

STSS 每颗卫星都配置大视场扫描的捕获相机 和带有二维指向机构的凝视跟踪相机,工作波段包 括短波红外、中波红外和长波红外等多个波长。捕 获相机可实现对助推段导弹和中段目标的初始捕 获,跟踪相机主要实现目标持续跟踪。根据资料调 研,跟踪相机本身视场为3°×3°,二维指向范围为 方位向360°,俯仰向60°(+15°~-45°)。

根据上述分析,结合高超目标与弹道导弹特

性类比,天基红外系统的高轨部分主要面向导弹 主动段的早日预警,可扩展至对高超目标助推段 的早期探测。低轨部分搭载指向跟踪相机,且面 向弹道导弹主动段初始捕获和中段低温弹头探测 跟踪,可应用于高超目标再入段及滑翔段的探测 及跟踪。

3.2 天基红外系统对高超目标探测覆盖性分析

探测覆盖性分析与观测模式息息相关,而观测 模式需要综合考虑目标背景特性及载荷能力。首先 分析天基红外系统对高超目标不同运动阶段的观测 模式。

3.2.1 观测模式

(1)助推段

基于高超目标特性分析,滑翔式高超目标助推 段与导弹/火箭主动段相同,天基红外系统对此阶段 目标观测模式以地球为背景,采用大气吸收波段 (2.75~2.95 μm,4.2~4.45 μm)进行探测,其探测 模式如图 3 所示。



(2) 再入段初期

再入段初期目标辐射强度较小,若以地球为 背景进行探测,目标很可能会湮没在地球较强的 背景辐射中,因此再入段目标探测应以深空为背 景进行探测。如图4所示,根据再入段目标飞行 高度,目标探测区域为以目标视线下界切90 km 高度线,视线上界切150 km 高度线之间的以深空 为背景的区域。

(3) 再入段后期及滑翔段

目标再入大气层后,与大气层剧烈摩擦,目标本体温度升高,滑翔段温度可达2000 K 左右,目标红外辐射特性明显。再入段后期及滑翔段可采取对地

和对临边探测,如图 5 所示,探测区域为以目标视线 下界切 30 km 高度线,视线上界切 80 km 高度线的 以地球和大气临边为背景的区域。



图 4 再入段目标探测模式示意图

Fig. 4 Detection mode of reentry phase



图 5 滑翔段目标探测模式示意图 Fig. 5 Detection mode of glide phase

3.2.2 覆盖性分析

(1)助推段

高轨预警系统对高超目标助推段早期探测,文 献[6-7]已经分析过,GEO可实现全球中低纬度地 区的双重覆盖,HEO弥补对北极地区的覆盖。也就 是说,高轨预警系统可实现对全球(除南极)的 覆盖。

(2) 再入段初期

再入段探测由低轨预警系统完成,根据调研的 低轨预警系统星座及载荷参数,结合再入段初期观 测模式,分析低轨预警系统对目标不同运动高度的 空间覆盖性如图6所示。

从图中可以看出,低轨系统对高超目标再入段 典型运动高度,北纬各纬度一重覆盖性优于 85%,









(3) 再入段后期及滑翔段

同样,基于再入段后期及滑翔段观测模式,分析 低轨预警系统对目标不同运动高度的空间覆盖性如 下所示。

从图 7 中可以看出,低轨系统对高超目标滑翔 段运动高度,北纬全纬度可实现 100% 一重覆盖,北 纬 40°以上可实现 100% 二重覆盖。









3.3 天基红外系统对高超目标探测能力分析

高超目标助推段与弹道导弹主动段目标特性相同,目前天基红外系统高轨部分可实现对助推段的 探测,信噪比满足检测处理要求。再入段目标与弹 道导弹中段类似,属常温弱目标,辐射强度约几十瓦 每思,低轨跟踪相机采用长波波段以深空弱辐射背 景,可实现对再入段目标探测,探测信噪比满足检测 要求。

对于滑翔段目标,对地探测时,为复杂背景下的 点目标探测,信噪比计算分析公式如下:

SNR =
$$(E_a - E_0) \cdot \tau_0 \cdot \frac{A_o}{R^2} \frac{D^*}{\sqrt{A_d * \Delta f}}$$

相关参数说明如下:

 E_a 为目标像元强度,其表达式为 $E_a = E \cdot \tau_a \cdot a$ + $(S - S_a) \cdot L_0 \cdot + S_a \cdot L'$,其中E为目标辐射强度, τ_a 为目标上层大气透过率,a为光学系统能量集中 度, $S = GSD \cdot GSD$ 为地面像元覆盖面积, S_a 为目标 视线方向面积, L_0 为背景辐射,L'为目标上层大气 辐射; E_0 为背景像元强度,其表达式为 $E_0 = S \cdot L_0$; τ_a 为光学系统透过率,这里取0.7; A_0 为光学系统入 瞳面积, $A_0 = \frac{\pi D^2}{4}$,D为光学系统入瞳直径; D^* 为 探测器探测率;R为探测距离; A_a 为探测器像元面 积; Δf 为探测器等效噪声带宽, $\Delta f = \frac{\pi}{4\tau}$, τ 为探测 器积分时间。

调研的低轨预警卫星相关参数如表2所示。

基于低轨卫星相关参数,结合 modtran 仿真计 算的背景辐射、大气透过率结果,以及根据光学系 统参数利用 zemax 计算分析的能量集中度,采用上 述公式,计算了中波 3.7~4.8 μm,不同观测视角 下的,对滑翔段高超目标的探测信噪比,如表 3 所示。

表2 低轨卫星相关参数

Tab. 2 The parameter of STSS satellites

参数	取值
光学系统口径 D/mm	195
光学系统焦距 f/mm	390
<i>F</i> 数	2
探测器像元大小/μm	20×20
探测器探测率 D*	8 × 10 ¹¹
积分时间/ms	10

表3 探测信噪比计算结果

Tab. 3 Analysis of SNR for space - based detection

观测工况	探测距离	信噪比
目标高度30 km,切临边观测	4752 km	
目标高度30 km,观测仰角15°,海面背景	3375 km	. 100
目标高度30 km,观测仰角30°,海面背景	2527 km	> 100
目标高度30 km,观测仰角45°,海面背景	2035 km	

从上表中可以看出,低轨预警卫星跟踪相机采用3.7~4.8 μm时,对滑翔段高超目标探测信噪比较高。

4 结 论

根据调研的天基红外系统相关参数,通过分析, 可以得出以下结论:

(1)高轨预警系统可实现对全球(南极除外)助 推段高超目标的预警探测;

(2)低轨预警系统可实现对目标再入段典型高度,北纬所有纬度 85% 以上一重覆盖,50% 以上二 重覆盖,部分区域 100% 覆盖;对滑翔段典型高度, 北纬所有纬度 100% 一重覆盖,北纬 40° 以上 100% 二重覆盖。

(3)低轨预警系统跟踪相机对再入段及滑翔段 高超目标具备一定探测能力。

本文仅从覆盖性及探测能力角度分析了美国天 基红外系统对助推滑翔类高超目标的探测可行性。 针对高超目标全程跟踪性能未进行分析研究,后续 将作为一项重点研究工作。

参考文献:

[1] Rondeau, Christopher M, Jorris. X – 51A Scramjet Demon-

[2] ZHANG Hailin, ZHOU Lin. Study on infrared radiation feature of near space hypersonic missile[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(1):13-15. (in Chinese) 张海林,周林,等. 临近空间高超声速导弹红外特性研 究[J]. 激光与红外, 2015, 45(1):13-15.

AIR Force Flight Test Center, 2013.

- [3] ZHANG Shengtao. The research on numerical simulation of infrared properties of flow field around near space hypersonic vehicle[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009:73-83. (in Chinese)
 张胜涛. 临近空间高超声速飞行器绕流红外辐射特性数值模拟研究[D].上海:上海交通大学, 2009:73-83.
- [4] LIN Yan. Modeling of optical radiative charactistics of hypersonic vehicle in the atmospere[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology. 2010:47 60. (in Chinese) 林妍. 大气层内高超声速飞行器光辐射特性建模[D].

哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010:47-60.

- [5] SHE Eryong, XU Xuewen. Study on the method of STSS space coverage performance [J]. Computer Simulation, 2010,27(6):103 106. (in Chinese)
 余二永,徐学文. STSS 星座空间覆盖性能分析方法研究[J]. 计算机仿真,2010,27(6):103 106.
- [6] XU Zhiming, WU Yi, Yi Dongyun. Airspace coverage performance of single satellite in SBIR LEO&MEO constellations based on coast phase tracking[J]. Areospace Shanghai, 2011(1):7-11,27. (in Chinese) 续志明,吴翊,易东云,等. 中低轨红外预警星座基于自由段跟踪的单星覆盖性能[J]. 上海航天,2011(1):7-11,27.
- [7] MAO Yifan, ZHANG Duolin, WANG Lu. Simulation analysis of ballistic missile detection by STSS [J]. Infrared Technology, 2015, 27(3):218-223. (in Chinese)
 毛艺帆,张多林, 王路. STSS 对弹道目标探测的仿真分析[J]. 红外技术, 2015, 27(3):218-223.