文章编号:1001-5078(2017)10-1254-05

·红外技术及应用·

# 海面目标天基红外探测概率研究与分析

陈 翾1,2,林春生2,杨 立3

(1. 中国人民解放军 91336 部队,河北 秦皇岛 066326;2. 海军工程大学兵器工程系,湖北 武汉 430033;3. 海军工程大学动力工程学院,湖北 武汉 430033)

**摘 要:**天基红外成像侦察有着常规空基、地基、海基军事侦察手段无法比拟的空间优势,业已成为世界上各大军事强国重点发展的一项重要的军事侦察技术。首先,从海面目标的天基红外探测条件出发,推导出极限探测条件下的阈值信噪比和目标等效条带数的数学表达式。然后,以此为基础得出海面目标天基红外探测的探测概率公式。最后,分析了噪声等效温差、探测器瞬时视场、卫星轨道高度、目标与背景的零视距的实际等效温差、目标临界尺度以及大气透射率对天基红外目标探测概率的影响。研究表明对于大温差、大尺度的海面目标,天基红外探测的探测概率相对较高,但在大气透射状况一般时,要通过天基红外观测平台探测小温差、小尺度海面目标较为困难。研究结果对天基红外探测器的研制与设计具有一定的借鉴意义。 关键词:天基红外;军事侦察;海面目标;探测概率

中图分类号:TN215 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2017.10.012

# Research on space-based infrared detection probability for sea surface targets

CHEN Xuan<sup>1,2</sup>, LIN Chun-sheng<sup>2</sup>, YANG Li<sup>3</sup>

(1. Unit 91336 of the PLA, Qinhuangdao 066326, China;

2. Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

3. College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract : Compared with air-based , land-based or sea-based reconnaissance, space-based infrared imaging system has more incomparable advantages, and it has been the important reconnaissance means that many military powers of the world pay attention to. Firstly, from the space-based infrared detection conditions of sea surface targets, the expression of threshold signal-to-noise ratio and equivalent band numbers were derived. Secondly, based on the first step, the expression of space-based infrared detection probability was obtained. At last, the influence of noise equivalent temperature difference, instantaneous field of view of detector, orbit altitude, zero visual range temperature difference between target and background, critical size of target and atmospheric transmittance on the space-based infrared detection probability were analyzed. The research results show that the detection probability of space-based infrared detection is relatively high for the sea surface targets with large temperature difference and size, but it is difficult to detect targets with small temperature difference and size when the atmospheric transmittance is low. The research results provide references for the design and development of space-based infrared detector.

Key words: space-based infrared; military investigation; sea surface target; detection probability

收稿日期:2017-03-21

基金项目:国防预研项目(No. 1010502020202)资助。

作者简介:陈 翾(1981 - ),男,博士后,主要从事目标与背景红外特征模拟及红外隐身方面的研究。E-mail:chenxuan1019@126.com

#### 1 引 言

卫星(天基)成像侦察有着常规空基、地基、海基军事侦察手段无法比拟的空间优势,并且还可以通过卫星组网技术对重点区域和重要目标进行24小时不间断监视与侦察,业已成为世界上各大军事强国重点发展的一项重要的军事侦察技术<sup>[1-3]</sup>。随着红外成像技术的日益成熟,以美国为首的西方国家发射的众多军事成像侦察卫星上都装有高性能的红外传感器。如,美国的锁眼-12 成像侦察卫星上搭载的红外成像探测器的空间分辨率优于1 m<sup>[4]</sup>,法国太阳神-2 卫星上带有一台高分辨率全色相机(具备红外能力)的空间分辨率优于5 m<sup>[5]</sup>、美国的"海军天基广域监视系统"所搭载的红外 CCD 相机的灵敏度可达0.1 K,足以探测海面舰船目标<sup>[6]</sup>。

本文首先从海面目标的天基红外探测条件出 发,推导出极限探测条件下的阈值信噪比和目标等 效条带数的数学表达式。然后,以此为基础得出海 面目标天基红外探测的探测概率公式。最后,分析 了噪声等效温差、探测器瞬时视场、卫星轨道高度、 目标与背景的零视距的实际等效温差、目标临界尺 度以及大气透射率对天基红外目标探测概率的影 响。研究结果对天基红外探测器的研制与设计具有 一定的借鉴意义。

#### 2 天基红外探测条件

对于天基红外成像探测系统来说,一般用瞬时 视场角  $\alpha$  或  $\beta$  和噪声等效温差 NETD 来反映其空间 与温度分辨率。当其对海面目标进行红外探测时,通 常希望获取它们的成像特征,从而达到能够在一定 距离外发现、识别或认清目标的目的。热成像系统能 够观察到目标的基本条件是:对于空间频率为f的 目标,它与背景的实际等效温差在经过大气衰减到 达热成像系统时,仍大于或等于系统对应该频率下 的最小可分辨温差 MRTD(f, $T_b$ ),同时目标对系统 的张角  $\Delta \theta$  应大于或等于观察等级所要求的最小视 角<sup>[7]</sup>。即:

$$\Delta T(R) = \Delta T_e \tau_a(R) \ge \text{MRTD}(f, T_b)$$
(1)

$$\Delta \theta = \frac{H}{R} = \frac{1}{2f} \ge n_e \alpha \tag{2}$$

式中,  $\Delta T(R)$  表示经大气衰减后,目标与背景的等效温差;  $\Delta T_a$  表示目标与背景的零视距的实际等效温差;  $\tau_a(R)$  表示 R 距离上的平均大气透射比; MRTD( $f, T_b$ ) 表示经实际条件修正后的最小可分辨温差,与噪声等效温差 NETD 密切相关; f 表示目标的空间频率;  $T_b$  表示背景温度; H 表示目标的临界

尺寸,为目标投影的最小尺寸; n。表示不同观察等 级要求时的目标等效条带数(半周期数); R表示卫 星轨道高度。当公式(1)和(2)两边取等号时,即为 目标天基红外探测的极限条件。

凝视焦平面红外探测器的最小可分辨温差 MRTD(f)可以表示为<sup>[8]</sup>:

$$\operatorname{MRTD}(f) = \frac{\pi^2}{4 \sqrt{14}} \cdot \frac{\operatorname{SNR}_{DT} \cdot \operatorname{NETD} \cdot f}{\operatorname{MTF}(f)} \cdot \frac{\beta \cdot N \cdot t_{\operatorname{int}}}{t_{\operatorname{eve}}} \int_{0.5}^{0.5} \cdot (4\alpha^2 f^2 + 1)^{-0.25}$$
(3)

式中, SNR<sub>DT</sub> 表示阈值信噪比; MTF(f) 表示系统总 传递函数; N 表示探测单元数;  $t_{int}$  表示探测器光积 分时间;  $t_{exe}$  表示人眼光积分时间。

MRTD(f) 是在实验室或理论分析条件下得到的,当实际用于目标的观察时,目标特性和环境条件并不满足标准条件,因此必须对它进行修正。经实际条件修正后的最小可分辨温差 MRTD(f,T<sub>b</sub>)表示为:

 $MRTD(f, T_b) = k_1 k_2 k_3 MRTD(f)$  (4) 式中,  $k_1, k_2, k_3$ 分别为目标形状修正系数、背景温度 修正系数和信噪比修正系数。

#### 3 探测概率

由天基红外探测条件可知,当海面目标同时满 足探测器的温度分辨及空间分辨条件时,即可在一 定探测概率下按照观察等级要求发现、定向、识别或 认清目标。在天基极限探测条件下,将公式(3)、 (4)代入公式(1),可将阈值信噪比 SNR<sub>pr</sub> 表示为:

$$SNR_{DT} = \frac{4\sqrt{14}}{k_1 k_2 k_3 \pi^2} \cdot \Delta T_e \tau_a(R) \operatorname{MTF}(f) /$$

$$\left[\operatorname{NETD} \cdot f \cdot \left(\frac{\boldsymbol{\beta} \cdot N \cdot t_{\operatorname{int}}}{t_{eye}}\right)^{0.5} \cdot (4\alpha^2 f^2 + 1)^{-0.25}\right] \quad (5)$$

探测目标所需阈值信噪比 SNR<sub>DT</sub> 与温度分辨探 测概率 *P*<sub>d</sub> 密切相关,满足如下概率积分:

$$P_{d1} = \int_{-\infty}^{\text{SNR}_{DT} - \text{SNR}_{DT, 50\%}} \exp(-z^2) \,\mathrm{d}z$$
 (6)

式中, SNR<sub>DT,50%</sub> 表示温度分辨探测概率为 50% 时 的阈值信噪比,通常取 SNR<sub>DT,50%</sub> = 2.8。在天基极 限探测条件下,由公式(2)得, n<sub>e</sub>表示为:

$$n_e = \frac{H}{\alpha R} \tag{7}$$

与之对应的空间分辨探测概率 P<sub>a</sub>,满足如下概率积分:

$$P_{d2} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{n_e - n_0}{\sigma}} \exp(-\frac{z^2}{2}) dz$$
 (8)

$$\sigma = \begin{cases} 0.625 & \text{$\Xi $\Pi$} \\ 0.824 & \text{$\Xi $\Pi$} \\ 1.882 & \text{$\Pi $\Pi$} \\ 3.529 & \text{$\Pi $\Pi$} \end{cases}$$
(9)

式中, n<sub>0</sub> 是在探测概率为 50% 时的目标等效条带数,取值见表 1。

表1 不同观察等级下的 n<sub>0</sub>

Tab. 1  $n_0$  at different discrimination level

Discrimination level	Equivalent band numbers $n_0$
Discovery	1.0±0.25
Orientation	1.4 ±0.35
Recognition	4.0 ± 0.8
Discrimination	6.4 ± 1.5

综合考虑温度分辨和空间分辨,天基红外探测 系统的总探测概率 *P*<sub>d</sub> 为:

$P_d = \min(P_{d1}, P_{d2})$	(10)	
式中, min() 为取小函数。		

#### 4 探测概率影响因素分析

从上述公式推导过程可以看出,诸如噪声等效 温差 NETD、瞬时视场角 $\alpha$ 、卫星轨道高度R此类内 部因素以及目标与背景的零视距的实际等效温差  $\Delta T_e$ 、目标的临界尺寸H、平均大气透射比 $\tau_a(R)$ 这 些外部因素都会在一定程度上影响天基红外探测的 总探测概率 $P_d$ 。

### 4.1 内部影响因素分析

当目标和环境特性一定时,卫星的内部因素将 影响天基红外探测的总探测概率。平均大气透射比  $\tau_a(R)$ 与大气组成、季节、气象条件等因素相关,可 由 MODTRAN 大气辐射传输计算软件仿真计算。 目标温度与尺寸特征见表2。

表2 目标温度与尺寸特征

m 1 0			1	•	1 .	• • •	C	
Tab 7	l'om	noraturo	and	0170	oharaat	oriction	ot	target
1 a. 2	, rem	DETAILUTE	anu	SIZC	Unaraci	CHELLOS	UI.	laiget
	-							··· · · · ·

Target	Temperature	℃ \	Size or area/m or m <sup>2</sup>		
	Deck	25	Length and width	$150 \times 20$	
Ship	Chimney	200	Chimney outlet	1.60	
	Sea surface	20	Deck	2400	

当目标温度分布不均匀时,目标温度通常取为 面积的加权平均温度,则目标与背景的零视距的实 际等效温差 $\Delta T_e$ 为:

$$\Delta T_{e} = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_{i} T_{i}}{\sum_{i=1}^{n} A_{i}} - T_{b}$$
(10)

式中, A<sub>i</sub> 表示目标表面微元对探测方向的投影面积; T<sub>i</sub> 表示目标表面微元的温度; T<sub>b</sub> 表示背景温度。 天基红外不同观察等级下的探测概率 P<sub>d</sub> 与

NETD、 $\alpha$  以及 R 的关系如图 1、图 2 和图 3 所示。



总得来说,随着观察等级由发现、定向、识别到 认清逐渐提高,探测概率 P<sub>d</sub> 逐渐减小。分别来看, 图1中,当α和 R 一定时,随着噪声等效温差 NETD 逐渐增大,各观察等级下的探测概率 P<sub>d</sub> 都是先保持 不变,然后逐渐减小,说明降低探测器的 NETD 能够 显著增大对目标的探测概率,但受空间分辨的限制, 当探测概率增大到一定程度后将保持不变。如图 2 所示,当 NETD 和 *R* 一定时,随着瞬时视场角α逐渐 增大,各观察等级下的探测概率 *P*<sub>a</sub> 都是逐渐减小, 说明提高探测器的空间分辨率有助于提高天基红外 探测的探测概率。从图 3 可以看出,当 NETD 和α 一定时,随着卫星轨道高度的增大,探测概率逐渐减 小,当轨道高度上升到一定高度后,探测概率降为 零,说明随着 *R* 的增大,目标的空间频率*f* 随之增 大,当*R* 增大到一定值时,目标的空间频率大于探 测器光学系统的空间截止频率,无论探测器具备多 么高的温度或空间分辨率都无法探测到目标,此时 唯有改变探测器光学系统设计,增大其空间截止频 率才有可能探测到目标。

#### 4.2 外部影响因素分析

当卫星高度及其搭载的红外探测器特性一定时,目标与背景的零视距的实际等效温差、目标的临界尺寸以及大气衰减状况也会影响天基红外探测的 探测概率,如图4、图5和图6所示。



Fig. 5 The relationship between  $P_d$  and H





总得来看,当卫星高度及其搭载的红外探测器 特性一定时,随着观察等级的提高,探测概率依次减 小。分别来看,图4中,当目标与背景的零视距的实 际等效温差  $\Delta T_e$  在一天之中发生变化时,  $\Delta T_e$  越大, 探测概率越高,但受空间分辨的限制,当 $\Delta T_a$ 增大到 一定程度时,探测概率将会保持不变,从目标成像的 角度解释,目标与背景温差越大,目标成像对比度越 强,目标越容易被识别,但同时也受到目标成像像素 数的限制,探测概率增大到一定程度后,不会再随温 差的增大而增大。当 $\Delta T_a$ 和 $\tau_a$ 确定时,探测概率会 随着目标临界尺寸H的增大而增高,如图5所示,目 标具有更大的尺度,将会占据更多的图像像素,具备 更强的信噪比,更有利于目标探测。当 $\Delta T_{\mu}$ 和 H — 定,大气透射状况也在一定程度上影响探测概率,如 图6所示。随着透射率的增大,探测信噪比逐渐增 大,探测概率也不断增高,但受空间分辨的限制,探 测概率增高到一定程度后将保持恒定。综合来说, 在大气透射状况良好条件下,对于大温差、大尺度的 海面目标,天基红外探测的探测概率相对较高,但在 大气透射状况一般时,要通过卫星发现、定向、识别 甚至认清小温差、小尺度海面目标就非常困难。

## 5 结 论

通过以上分析,可以得出以下结论:

(1)观察等级对天基红外探测概率的影响明显,随着观察等级由发现、定向、识别到认清逐渐提高,天基红外探测的探测概率依次降低。

(2)当目标与大气透射特性一定时,天基红外 探测器具有更高的空间及温度分辨率,将更有利于 海面目标探测,但受研制技术、制作工艺及成本的限 制,现阶段在高轨道高度、高观察等级要求(识别或 认清)下,探测海面目标较为困难。可以考虑将高 轨红外探测卫星用于海面目标的早期侦察和预警 (发现与定向),配合其他探测手段(可见光或雷达 波探测)或降低平台高度(低轨、空基或海基)来进 一步识别与认清目标。

(3)当轨道高度和探测器性能一定时,在大气 透射状况良好条件下,对于大温差、大尺度的海面目 标,天基红外探测的探测概率相对较高,但在大气透 射状况一般时,要通过天基红外观测平台发现、定 向、识别甚至认清小温差、小尺度海面目标较为 困难。

#### 参考文献:

- [1] LEI Guoqiang, CHEN Hangyong. Threat level analysis about the reconnaissance of electronic reconnaissance satellite to warship [J]. Shipboard Electronic Countermeasures, 2014, 37(6):41-43. (in Chinese)
  雷国强,陈行勇. 电子侦察卫星对舰船侦察卫星等级分析[J]. 舰船电子对抗,2014,37(6):41-43.
- [2] XU Kai, CHEN Xiao, ZHOU Benwen. Present situation ang development offoreign space reconnaissance satellite
  [J]. Information & Communocations, 2015, 147(3):76 -79. (in Chinese)
  徐慨,陈霄,周本文. 国外航天侦察卫星的现状与发展

[J]. 信息通信,2015,147(3):76-79.

[3] GONG Haimei, LIU Dafu. Development and trends in spaceborne infrared detectors [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(1):18-24. (in Chinese) 龚海梅,刘大福. 航天红外探测器的发展与现状[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1):18-24. [4] FANG Youpei, WANG Xiaoli, ZHAO Shuang. Space imaging reconnaissance and its countermeasures [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(1):143 – 146. (in Chinese)

方有培,王小莉,赵霜.空间成像侦察及其对抗技术 [J]. 红外与激光工程,2006,35(1):143-146.

- [5] LIU Zhaojun, ZHOU Feng, LI Yu. Demands analysis of IR detector for space remote sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(1):25-29. (in Chinese) 刘兆军,周峰,李瑜. 航天光学遥感器对红外探测器的 需求分析[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1):25-29.
- [6] WU Hao. Development trend and analysis of the abroad space-based infrared system [J]. Ship Electronic Engineering, 2013, 234(12):145 148. (in Chinese) 吴昊. 国外天基红外系统的发展动向与分析[J]. 舰船 电子工程, 2013, 234(12):145 148.
- [7] JIN Weiqi, ZHANG Jingxian, GAO Zhiyun. Visual range prediction for the extended source target in thermal imaging systems[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1996, 16(1):25 30. (in Chinese) 金伟其,张敬贤,高稚允. 热成像系统对扩展源目标的 视距估算[J]. 北京理工大学学报, 1996, 16(1):25 30.
- [8] WU Xiaoping, ZHOU Qibo, WU Minming. Studies on e-valuating methods for staring thermal imaging systems u-sing IR focal plane[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1993, 12(4):249-253. (in Chinese)
  吴小平,周起勃,邬敏鸣. 红外焦平面凝视热成像系统 评估方法研究[J]. 红外与毫米波学报, 1993, 12(4):249-253.