

复杂环境下弹道中段目标探测能力分析

袁航¹, 王晓蕊¹, 张凯莉¹, 任冬², 李珂¹

(1. 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;
2. 武警陕西总队, 陕西 西安 710083)

摘要: 基于低轨预警卫星对中段弹道导弹的探测机理, 综合考虑了复杂探测环境中各辐射源(太阳、地表、大气、云层)对弹道中段目标的辐射作用, 计算了三个波段各辐射源在目标表面产生的辐照度, 在此基础上建立了弹头目标自身辐射及反射辐射模型。基于弹道中段目标红外辐射计算结果, 结合预警卫星成像系统的衍射效应, 推导了成像综合信噪比、探测作用距离修正模型, 从这两个方面分析了深空背景下低轨预警卫星对弹道中段目标的探测能力。结果表明: 复杂探测环境中各辐射源对目标成像综合信噪比的影响不可忽略, 约为目标自身辐射综合信噪比的 1.2 倍; 低轨卫星光学系统的衍射效应对中段目标探测能力影响严重, 8~9.4、9.4~10、10~14 μm 波段下衍射效应修正前后综合信噪比差值占未修正综合信噪比的比率分别为 41.9%、36.7%、10.4%; 探测距离随观测角度的变化而变化, 迎头探测时, 探测距离最大。

关键词: 低轨预警卫星; 红外辐射; 综合信噪比; 探测距离

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0604003

Analysis of the detection ability of midcourse ballistic targets in the complex environment

Yuan Hang¹, Wang Xiaorui¹, Zhang Kaili¹, Ren Dong², Li Ke¹

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;
2. Shaanxi Provincial Corps, Chinese Peoples Armed Police Forces, Xi'an 710083, China)

Abstract: Based on the detection mechanism of low orbit early warning satellites for the midcourse ballistic missiles, the radiation effects of various radiation sources (solar, earth, atmosphere, clouds) on targets in complex environments were considered. The irradiance generated by the background radiation sources of the three wavelength bands on the target surface was calculated, and the self-radiation and reflected radiation models of the warhead target were established. Based on the calculation results of the infrared radiation of the ballistic missile targets, combined with the diffraction effect of the early warning system, the modified model of the Synthetic Signal-to-noise Ratio(SSR) and the detection range were derived. From these two aspects, the ability of low orbit early warning satellites to detect the midcourse ballistic missiles in deep space was analyzed. The results show that the SSR effect of each radiation source on the target imaging in the complex detection environment can not be neglected. It is approximately 1.2 times that of the SSR only considering

收稿日期: 2019-01-11; 修订日期: 2019-02-14

基金项目: 国家自然科学基金(61377007, 61575152, 61775174); 国防基础科研基金(JCKY2016208B001)

作者简介: 袁航(1993-), 女, 博士生, 主要从事复杂环境空天基目标红外辐射特性建模及仿真评估方面的研究。

Email: yhxidianedu0525@163.com

导师简介: 王晓蕊(1976-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光电成像系统工程优化设计、协同仿真、性能测试与评估等方面的研究。Email: xrwang@mail.xidian.edu.cn

the target's own radiation. The diffraction effect of the optical system of the low orbit early warning satellites has a serious influence on the detection capability of the midcourse ballistic missiles. The ratio of the difference between the unmodified SSR and the modified SSR to the unmodified SSR in the 8–9.4 μm , 9.4–10 μm , and 10–14 μm are 41.9%, 36.7%, and 10.4%, respectively. The detection distance changed with the observation angle, and the detection range is the largest when the detection angle is 0°.

Key words: low orbit early warning satellite; infrared radiation; synthetic signal-to-noise ratio; detection range

0 引言

弹道导弹作为一种能够精确打击敌方军事目标的武器,以其威力巨大、射程极远且飞行速度快的特点在整个军事作战系统中占有极其重要的地位。天基红外预警系统作为弹道导弹防御系统的重要组成部分,具有大视场、较高机动性能、较长预警时间、较强生存能力、高的灵敏度、强的抗干扰性,同时不受地理位置和气象条件的约束等特点^[1-2]。得益于天基预警系统的优势,可相对容易地发现弹道导弹目标,为整个导弹防御系统提供有效的预警时间;且弹道导弹中段飞行时间约占弹道全程的 92%^[3],因此,开展红外预警系统对中段弹道导弹的探测预警能力具有重要意义。

由于天基红外预警技术在军事国防上的敏感性,大多数学者基于美国现役的导弹预警系统 DSP 和部分公开空间实验报告进行预警卫星探测能力的研究。对于弹道中段目标辐射特性研究方面,禄晓飞^[4]等人分析了弹道导弹在助推段、中段和再入段的表面温度,重点给出了弹道导弹中段弹头和诱饵的平衡温度;张义^[5]等人建立了导弹蒙皮的红外辐射强度计算模型,分析了在不同探测距离下导弹红外辐射随探测角度的变化。针对预警卫星对空间目标探测能力方面,Shen X^[6]等人针对空间目标以及太阳和地球大气背景光源建立其辐射模型,讨论了长波段下背景对天基红外成像系统探测空间目标的影响;刘尊洋^[7]等人建立了红外预警卫星直视地表(See-To-Ground, STG)波段探测能力计算模型,仿真了 STG 最佳探测波段范围以及该波段导弹预警中可能具备的能力。现有的研究工作为天基红外导弹预警系统的探测能力的分析提供了理论依据和数据参考,但仍存在不足:以上研究针对导弹目标所在复杂环境的各辐射源对目标影响的研究较少,影响探测能力的目标辐射特性的建模精确性有待提高;其

次空间目标的探测能力一般采用信噪比及一般探测作用距离进行衡量,较为理想。

针对上述不足,基于低轨预警卫星对中段弹道导弹的探测机理,综合考虑了复杂探测环境中各辐射源对弹道中段目标的辐射作用,建立了弹头目标精确的辐射/反射辐射模型。基于弹道中段目标红外辐射计算结果,修正了低轨预警卫星成像系统衍射效应的成像综合信噪比模型及探测作用距离模型,分析了深空背景下低轨预警卫星对弹道中段目标的探测能力。

1 复杂环境对弹道目标辐射作用建模

低轨预警卫星探测弹道中段目标时,目标被视为点辐射源,没有轮廓信息,目标在预警卫星探测器像面成像特征变化表现为点像的明暗程度变化^[8]。因此,弹道中段目标辐射特性计算结果的精准程度将直接决定低轨红外预警卫星对弹道中段目标预警探测的及时性和准确性。

根据低轨预警卫星对弹道中段目标的复杂探测环境的分析,分别计算了太阳、地表、大气及云层各辐射源对目标的辐射作用,图 1 为探测环境中各辐射源作用下的弹道中段目标红外辐射模型。

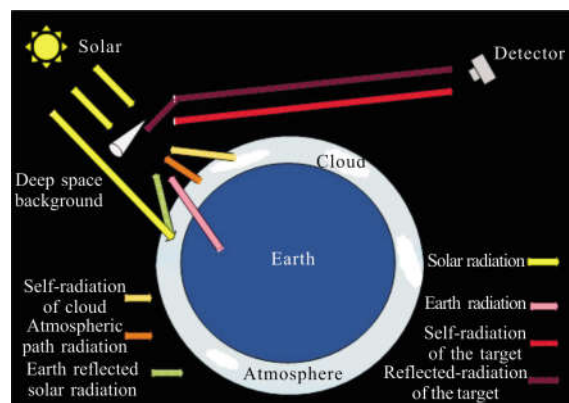


图 1 探测环境中弹道中段目标辐射模型

Fig.1 Radiation model of midcourse ballistic target in detection environment

探测环境中太阳、地表、大气、云层各辐射源以不同的入射辐射角作用到弹道中段目标表面，因此分别计算分析各辐射源分别作用在目标表面产生的辐照度随目标飞行高度和入射辐射角的变化。

1.1 太阳辐射建模

太阳平均半径约为 $6.3638 \times 10^8 \text{ m}$ ，与地球的平均距离 $AU=1.49985 \times 10^{11} \text{ m}$ ，太阳温度约为 $T_{\text{sun}}=5900 \text{ K}$ 。太阳辐射出度 M_{sun} 可表示为：

$$M_{\text{sun}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T_{\text{sun}}}} - 1} \quad (1)$$

根据太阳辐射出度 M_{sun} 和太阳辐射在目标表面产生的辐照度 E_{s-t} 之间的关系，太阳在目标表面产生的辐照度 E_{s-t} 可表示为：

$$E_{s-t} = M_{\text{sun}} R_s^2 \cos \theta_{st} / l_{s-t}^2 \quad (2)$$

式中： R_s 为太阳半径； l_{s-t} 为太阳到目标的距离； θ_{st} 为太阳辐射入射到目标表面的夹角。

1.2 地表辐射建模

根据弹道导弹目标发射点和落地点坐标以及飞行速度，利用卫星工具软件 STK 仿真了目标的飞行运动轨迹。再根据弹道中段目标运动轨迹确定覆盖的地表范围，通过 MODIS 卫星数据反演得到弹道中段目标覆盖范围内的地表平均温度。图 2 为弹道导弹发射点坐标为 (34.48 N, -122.25 W)，导弹落地点坐标为 (45.34 N, 126.35 E)，导弹飞行速度为 7.16 km/s，导弹飞行最高点高度为 1520.93 km 时导弹轨迹及飞行区域夏季地表温度分布图。

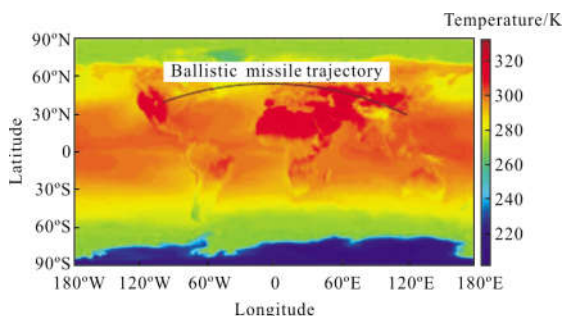


图 2 中纬度夏季地表平均温度分布

Fig.2 Distribution of mean surface temperature in mid-latitude summer

根据确定的地表温度值计算地表直接辐射在弹道中段目标表面产生的辐照度，图 3 为建立的地表辐射计算模型。 z 轴过地心指向目标， x 、 y 轴在地球赤道面上相互垂直。A 点为地表小面元的位置，B 点为

目标中心位置， o 点为原点坐标， \vec{n}_e 为地表面元法线方向， \vec{n}_t 为目标法线方向。

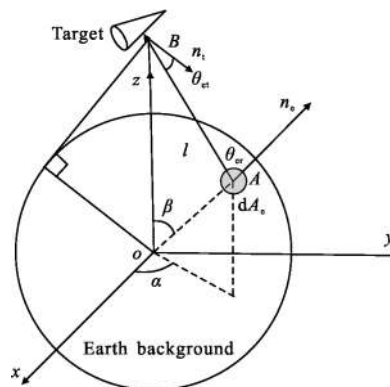


图 3 地表直接辐射在目标表面产生的辐照度计算模型

Fig.3 Calculation model for the irradiance generated by Earth's background radiation on the target

地表直接辐射在弹道中段目标表面产生的辐照度 E_{e-t} 计算表达式为：

$$E_{e-t} = \int_S \frac{\tau_{\text{atm}} \epsilon_e M_e(T_e) \cos \theta_{et} \cos \theta_{st}}{\pi l_{e-t}^2} dA_e \quad (3)$$

式中： τ_{atm} 为特定波段大气透过率； ϵ_e 为地表发射率； T_e 为地表温度； l_{e-t} 为地球表面面元与弹道中段目标的距离； θ_{et} 为地表面元法线与目标和地表面元连线夹角； θ_{st} 为目标法线与目标和地表面元连线夹角； dA_e 为地球表面面元面积， $dA_e = R_e^2 \sin \beta d\beta d\alpha$ ， R_e 为地球半径， β 为 z 轴与地表面元法线的夹角，由目标与地球位置关系得 β 的范围为 $\beta \in [-\arccos(R_e/(R_e+h_t)), \arccos(R_e/(R_e+h_t))]$ ， h_t 为弹道中段目标飞行高度， α 为 x 轴与面元法线向量在 XOY 面投影向量的夹角， α 的取值范围为 $\alpha \in [0, 2\pi]$ 。

1.3 大气辐射建模

根据低轨红外预警卫星探测器与弹道中段目标的位置关系，建立大气路径辐射计算模型，如图 4 所示。

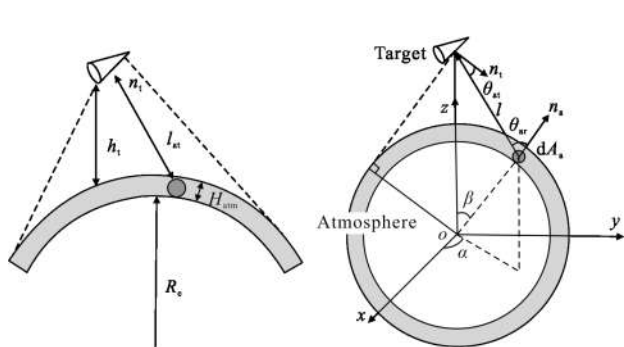
大气辐射在目标表面产生的辐照度 E_{a-t} 表示为：

$$E_{a-t} = \int_S \frac{L_a \cos \theta_{at} \cos \theta_{at}}{\pi l_{a-t}^2} dA_a \quad (4)$$

式中： L_a 为大气辐射亮度； l_{a-t} 为大气面元与目标的距离； θ_{at} 为大气面元法线与大气面元和目标连线的夹角； θ_{at} 为目标法线和连线的夹角； dA_a 为大气辐射

面元面积, $dA_a=(R_c+H_{atm})^2\sin\beta d\beta d\alpha$, H_{atm} 为大气层的厚度, β 为大气面元法线与 z 轴的夹角, 其取值范围为 $\beta \in [-\arccos(R_c+H_{atm})/(R_c+h_t), \arccos(R_c+H_{atm})/(R_c+h_t)]$, 为大气面元在 XOY 面的投影与 x 轴的夹角, 其取值范围为 $\alpha \in [0, 2\pi]$ 。

辐出度; ε_c 为云层发射率; T_c 为云层温度; $R_c=2(R_c+H_{cloud-top})^2\{1-\cos[(R_c+H_{cloud-top})/(R_c+h_t)]\}$ 为云层辐射有效面积的等效半径; c_f 为云层覆盖率; R_c 为地球半径; $H_{cloud-top}$ 为云顶高度; h_t 为目标飞行高度。



(a) 大气与目标的位置关系 (b) 大气辐射在目标表面上产生的辐照度
(a) Positional relationship between atmosphere and target (b) Irradiance generated by atmosphere on the target

图 4 大气辐射计算模型

Fig.4 Calculation model of atmospheric radiation

1.4 云层辐射建模

8~14 μm 波段云层的光谱辐射波动较小, 光谱辐射亮度比较稳定, 云层的红外辐射主要是云层自身辐射, 采用灰体模型可得到较好的近似^[9]。将云层等效为扩展源, 建立云层辐射作用到目标表面产生的辐照度计算模型, 如图 5 所示。云层辐射在弹道中段目标表面产生的辐照度 E_{c-t} 为:

$$E_{c-t}=\tau_{atm}M_c(\varepsilon_c, T_c)\frac{c_f \cdot R_c^2}{(h_t-H_{cloud-top})^2+R_c^2} \quad (5)$$

式中: τ_{atm} 为云层的大气透过率; M_c 为云层的红外

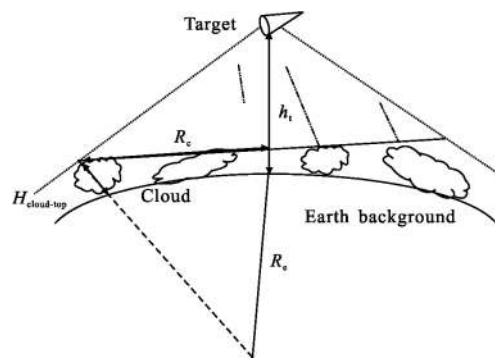


图 5 云层辐射在目标表面产生的辐照度计算模型

Fig.5 Irradiance computer model generated by clouds on the target

云层的红外发射率计算公式^[5]如下:

$$\varepsilon_c=1-\exp(-W_z) \quad (6)$$

$$W_z=\int_{z_b}^{z_t} [(1-\omega_w(z))\kappa_w(z)+(1-\omega_i(z))\kappa_i(z)]dz \quad (7)$$

式中: W_z 为六层红外吸收系数; z_t 为云顶高度; z_b 为云底高度; ω_w 为水滴散射系数; ω_i 为冰晶散射系数; κ_w 为水滴消光系数, κ_i 为冰晶消光系数。

根据云层发射率的计算公式, 结合表 1 中云层相关参数可计算不同云层的发射率。云层均处于对流层, 对流层内温度随着高度而线性降低, 其温度递减率为 6.5 K/km。根据云层高度, 结合大气温度变化规律, 即可计算不同类型云层的温度变化。云量是指视野所及的天空被云所遮蔽的比例。表 2 是不同云层在天空的覆盖率以及云量大小。

表 1 不同云层的辐射参数

Tab.1 Radiation parameters of different cloud layers

Cloud type	Cloud-base height/km	Cloud-top height/km	Average particle size/ μm	Scattering coefficient/ km^{-1}	Extinction coefficient/ km^{-1}	Thickness/km	Emissivity ε_c
Cumulus	0.7	3.0	4-11	16.463 7	17.138 0	0.3-5.0	0.762 3
Stratus	0.3	1.0	2-10	15.618 8	16.207 2	0.1-1.0	0.307 8
Cirrus	8.0	9.5	8-40	18.889 5	19.526 7	0.2-1.0	0.615 5

表 2 各云层空中覆盖情况及云量大小

Tab.2 Coverage and cloud amount of different cloud layers in the air

Cloud type	Coverage over ocean	Clouds over ocean	Coverage over land	Clouds over land
Cumulus	45%	34%	27%	18%
Stratus	46%	22%	35%	21%
Cirrus	37%	13%	47%	23%

2 弹道中段目标辐射特性建模

2.1 弹道中段目标反射辐射建模

为了研究弹道中段目标反射探测环境中其他辐射源的辐射强度值,建立如图 6 所示的弹道中段目标对入射辐射的反射辐射特性计算模型。

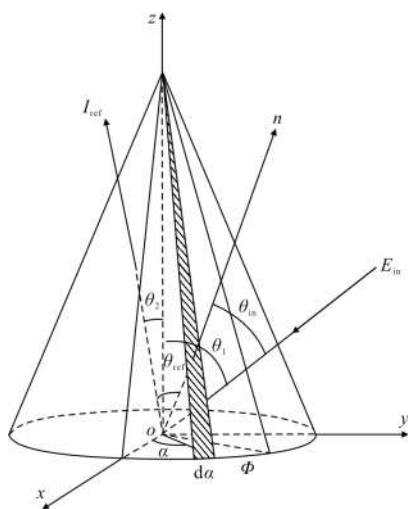


图 6 反射辐射计算模型

Fig.6 Model for calculating reflection radiation

弹道中段目标对入射辐射照度产生的反射辐射强度可表示为:

$$I_{ref} = \rho_t \int_{\alpha} \frac{E_{in}}{\pi} \cdot \cos \theta_m \cdot \cos \theta_{ref} \cdot dA_t \quad (8)$$

式中: I_{ref} 为弹头目标反射其他辐射源的辐射强度; ρ_t 为目标表面反射率; E_{in} 为其他辐射源入射到目标表面产生的辐照度; θ_m 为入射辐射方向与目标面元法线的夹角; θ_{ref} 为反射辐射方向与目标面元法线的夹角; dA_t 为弹头目标面元的面积。 \vec{n} 为面元法线, α 为面元投影与 x 轴夹角, Φ 为入射面和反射面之间的相位角, θ_1 为入射辐射方向与 z 轴的夹角, θ_2 为反射辐射方向与 z 轴的夹角。 $\cos \theta_m$ 、 $\cos \theta_{ref}$ 和 dA_t 分别由

公式(9)、(10)和(11)确定:

$$\cos \theta_m = \cos \theta_1 \cos \sigma + \sin \theta_1 \sin \sigma \cos(\Phi - \alpha) \quad (9)$$

$$\cos \theta_{ref} = \cos \theta_2 \cos \sigma + \sin \theta_2 \sin \sigma \cos \alpha \quad (10)$$

$$dA_t = \frac{R_t^2}{2 \cos \sigma} d\alpha \quad (11)$$

2.2 弹道中段目标自身辐射建模

弹道中段目标在飞行过程中,由于热传递作用和探测环境中辐射源加热作用,弹头表面不同位置的温度会发生变化。为了详细描述目标不同位置的差异性,根据目标-空间辐射源的位置关系,选取弹头目标上典型五点位置来描述温度的变化规律,如图 7 所示。

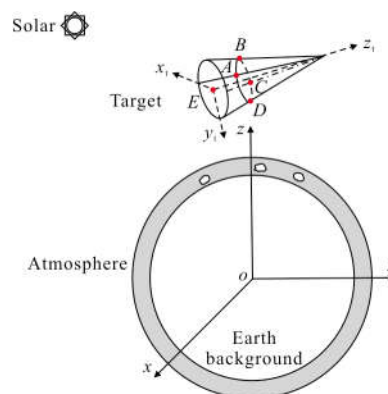


图 7 目标与其他辐射源关系

Fig.7 Relationship between targets and other radiation sources

弹头目标表面 A、D 点为既存在部分太阳辐射又有部分地球辐射、大气辐射及云层辐射。B 主要受太阳辐射,C 点不存在太阳辐射,E 点为目标底面与 A、D 点相同。已知弹头表面不同位置各点温度变化规律^[10],图 8 为弹头自身辐射计算模型。图中 \vec{n} 为弹头面元法向向量, \vec{R}_{target} 为弹头面元自身辐射方向, \vec{R}_{detect} 为探测器观测视方向, Θ_1 为 R_{target} 与 z 轴的夹角, Θ_2 为 $R_{detector}$ 与 z 轴的夹角, Θ 为 R_{target} 与 $R_{detector}$ 的夹角。弹头目标自身辐射模型可用下式表示:

$$I_{self} = \varepsilon_t \int_{\alpha} \frac{M_t}{\pi} Z(\alpha_t) \frac{R_t^2}{2 \cos \Theta_1} d\alpha_t \quad (12)$$

其中:

$$Z(\alpha_t) = (\cos \Theta_2 \cos \Theta_1 + \sin \Theta_2 \sin \Theta_1 \cos \alpha_t) \quad (13)$$

式中: ε_t 为弹头目标表面发射率; α_t 为弹头侧面面元与 x 轴的夹角; R_t 为弹头底面半径; Θ_1 为弹头目标面元法线 n 与 z 轴的夹角, 其值为 $\pi/2 - \arctan(R_t/H_t)$;

Θ_2 为探测方向与 z 轴的夹角。

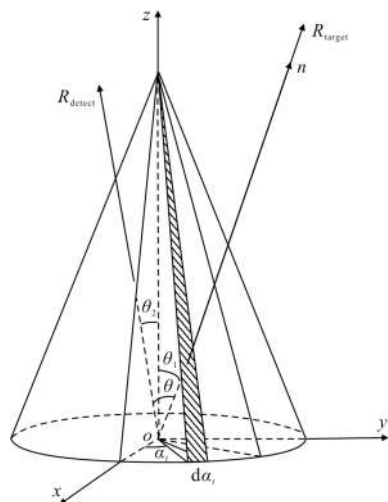


图 8 目标自身辐射模型

Fig.8 Self-radiation model of the targets

3 弹道中段目标的探测能力分析

基于上述对弹道中段目标的红外辐射特性的计

表 3 低轨预警卫星长波段探测器参数

Tab.3 Detector parameters of low orbit early warning satellite in long wavelength bands

Parameters	Value
Detection bandwidth/ μm	8-14
Detector type	HgCdTe
FOV/($^\circ$)	1x1
NEFD/ $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$	1.0×10^{-17}
Optical transmittance τ_0	0.7
Optical aperture D/cm	53
Detector size N	128x128
Spatial resolution $\alpha/\mu\text{rad}$	37.7
Focal length f/cm	106
Equivalent noise bandwidth $\Delta f/\text{Hz}$	50
Normalized detectivity $D^*/\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$	1×10^{13}
Detector pixel area $A_d/\mu\text{m}\times\mu\text{m}$	40x40

算模型, 计算了深空背景下不同波段中段目标的辐射强度, 考虑低轨预警卫星光学系统的衍射效应, 分别从目标成像综合信噪比、探测距离两方面讨论低轨预警卫星对弹道中段目标的探测能力。表 3 为低轨预警卫星探测器参数^[11-12]。

3.1 弹道中段目标辐射强度计算结果

选取弹头目标进入弹道中段后, 目标温度为 300 K, 目标飞行高度为 650 km, 目标表面涂层的反射率为 0.2, 取中纬度夏季目标相位角 Φ 为 $30^\circ\sim 90^\circ$, 入射角 θ_1 和反射角 θ_2 均为 45° , 深空背景温度近似为 4 K, 太阳、地表、大气、云层以及预警卫星探测器的位置与计算模型中一致。表 4 为三个波段下弹道中段目标/背景的辐射强度计算结果。

由表 4 可知: 深空背景的辐射远远小于目标辐射值, 当考虑弹头目标对复杂环境辐射反射时, 目标总体辐射值有较为明显的提升。因此, 在研究弹头目标辐射特性时必须考虑其对周围复杂环境中其他辐射源的反射辐射特性。

表 4 中段目标/背景辐射强度计算结果

Tab.4 Radiation intensity calculation results of midcourse ballistic target and background

Intensity/ $\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$	Wavelength range/ μm		
	8-9.4	9.4-10	10-14
Self-radiation	32.2-37.1	14.5-16.3	86.8-95.5
Self-radiation + reflected radiation	38.8-43.2	16.5-18.3	101.9-110.6
Deep-space radiation	1.3×10^{-164}	9.7×10^{-155}	1.5×10^{-110}

如图 9 为弹头目标自身辐射强度和反射强度总和的辐射强度场仿真结果($\Phi=30^\circ$)。从计算结果可知: 弹头目标辐射强度在 10~14 μm 波段表观量最大, 8~9.4 μm 波段次之, 9.4~10 μm 波段表观量

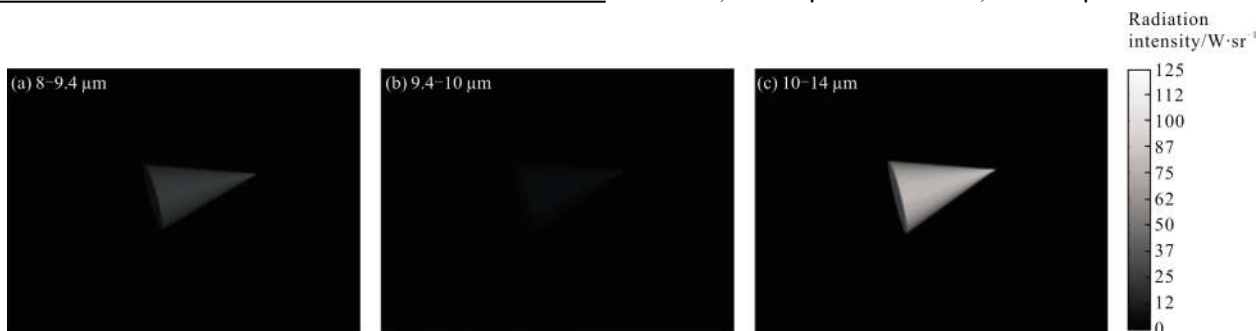


图 9 不同波段弹头目标辐射强度仿真结果

Fig.9 Simulation results of warhead target radiation intensity at different bands

最小。主要原因在于波段宽窄不同,导致累积的能量不同。

3.2 基于衍射效应的综合信噪比分析

低轨红外预警卫星对弹道中段目标成像关系可用图 10 描述。其中探测器像元面积为 A_d ,入瞳面积为 A_0 ,辐射源面积为 A_s ,目标与成像系统的距离为 R_1 ,入瞳到探测器的距离为 R_2 ,系统焦距为 f 。

考虑背景辐射及系统噪声对目标探测的影响,引入综合信噪比 SSR(Synthetic Signal-to-noises Ratio)描述方法^[13-14],表达式为:

$$SSR = \frac{\Delta V_t}{\sqrt{V_b^2 + V_n^2}} = \frac{SNR}{\sqrt{1 + \left(\frac{V_b}{V_n}\right)^2}} \quad (15)$$

式中: ΔV_t 为目标辐射在探测器像元上产生的信号电压; V_b 为背景辐射在探测器像元上产生的信号电压; V_n 为系统噪声电压;SNR 为信噪比。

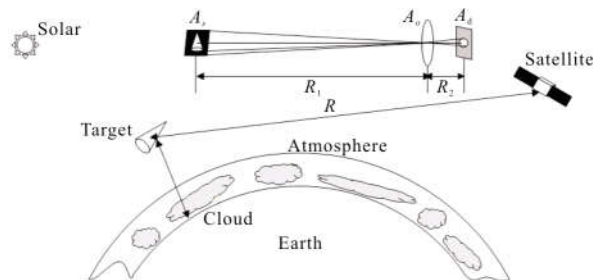


图 10 红外预警卫星对弹道中段目标成像示意图

Fig.10 Diagram of the midcourse ballistic target imaged by an infrared warning satellite

目标及背景辐射在探测器像元产生的信号电压可表示为:

$$\Delta V_t = \frac{V_n D^*}{(A_d \Delta f)^{1/2}} \frac{\tau_0 \tau_a (\pi \Delta I) A_d}{4 F^2 (1 + M_{optics})^2 A_{DAS}} \quad (16)$$

$$V_b = \frac{V_n D^*}{(A_d \Delta f)^{1/2}} \frac{\tau_0 \tau_a (\pi L_b A_b) A_d}{4 F^2 (1 + M_{optics})^2 A_{DAS}} \quad (17)$$

式中: D^* 为比探测率; Δf 为噪声等效带宽; V_n 为探测器噪声电压峰值; A_d 为探测器面积; ΔI 为探测器像元接收到的辐射 ($\Delta I = I_{self} + I_{ref} - \epsilon_b L_b A_b$), A_b 为探测器视场内背景辐射的面积, ϵ_b 为深空背景发射率; τ_0 为成像系统光学透过率; τ_a 为大气透过率; F 为光学系统 F 数; M_{optics} 为光学系统放大率,其值为 R_2/R_1 ; A_{DAS} 为探测器视觉立体角在物空间的投影,其值为 $A_d R_1^2/R_2^2$, L_b 为背景辐射。

弹道中段目标辐射经低轨红外预警卫星光学成像系统时,会产生夫朗和费圆孔衍射,而关键参数之一是位于模糊斑中心位置处探测器像元接收到的目标辐射能量的比例,该比例决定了观测到的信号强度,影响信噪比大小^[15]。当衍射效应不可避免时,目标产生的信号电压按非周期传递函数(ATF)修正,ATF可由累积分布函数(CDF)确定,CDF 表征模糊斑分布在探测器像元的比例^[16]。利用 CDF 对目标在低轨预警卫星探测器像面产生的信号电压进行修正,目标辐射在探测器像元产生的信号电压可表示为:

$$\Delta V_t = \frac{V_n D^*}{(A_d \Delta f)^{1/2}} \frac{\tau_0 \tau_a (\pi \Delta I) f^2}{4 F^2 (R_1 + f)^2} \cdot CDF \quad (18)$$

背景辐射在探测器上产生的信号电压为:

$$V_b = \frac{V_n D^*}{(A_d \Delta f)^{1/2}} \frac{\tau_0 \tau_a (\pi L_b A_b) f^2}{4 F^2 (R_1 + f)^2} \quad (19)$$

式中: R_1 为点源经光学系统衍射后模糊斑半径。

经过对光学系统衍射效应修正后的综合信噪比表达式为:

$$SSR = \frac{D^*}{(A_d \Delta f)^{1/2}} \frac{\tau_0 \tau_a (\pi \Delta I) f^2}{4 F^2 (R_1 + f)^2} \cdot CDF \sqrt{1 + \frac{1}{A_d \Delta f} \left(\frac{D^* \tau_0 \tau_a (\pi L_b A_b) f^2}{4 F^2 (R_1 + f)^2} \right)^2} \quad (20)$$

根据低轨红外预警卫星长波探测器参数,分别计算了复杂背景下低轨预警卫星对目标探测的综合信噪比随飞行时间的变化曲线及光学系统衍射效应修正前后综合信噪比的变化曲线,如图 11 和图 12 所示。

由图 11 可知:只考虑目标自身辐射特性与综合考虑复杂环境下目标辐射特性的成像综合信噪比 SSR 的差别很明显。复杂背景下目标的综合信噪比 SSR 约为目标自身辐射产生的综合信噪比 SSR 的 1.2 倍。由此可见,复杂探测环境中辐射源对成像综合信噪比的影响不可忽略。

由图 12 可知:修正后的 SSR 明显小于修正前的 SSR,但各波段衍射效应的影响程度不同。8~9.4 μm 波段和 9.4~10 μm 波段修正后与修正前的差距相对较大,修正后和修正前的 SSR 的差值占未修正 SSR 的比率分别为 41.9%、36.7%。主要原因在于衍射斑半径相对较小,CDF 值较小,而 10~14 μm 由于其衍射斑半径相对较大,模糊斑覆盖探测器像元的比率值 CDF 较大,衍射效应相对其他两波段的影响程度较小。总而言之,弹道中段目标经低轨

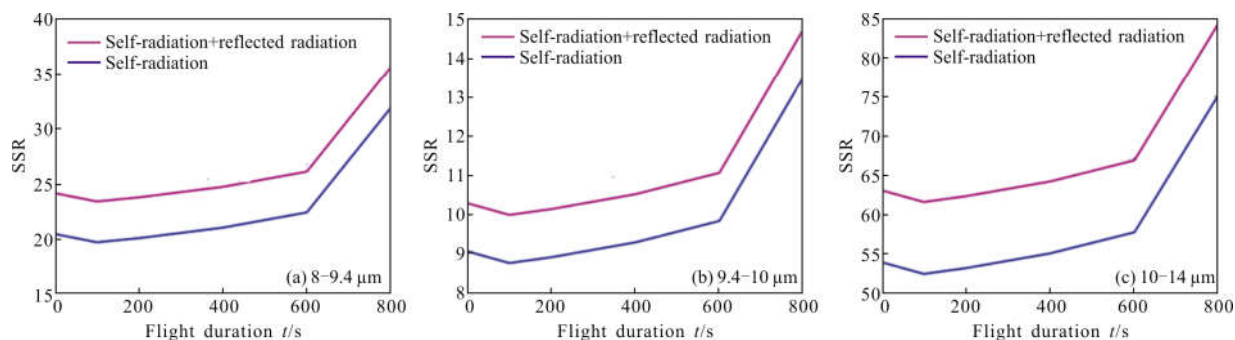


图 11 各波段复杂背景下综合信噪比变化曲线

Fig.11 Curves of integrated signal-to-noise ratio of each waveband in the complex environment

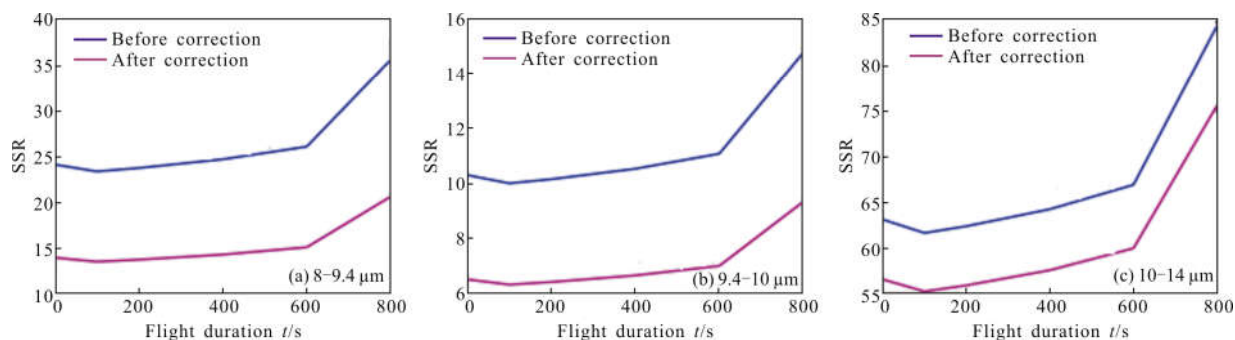


图 12 修正的与未修正的结果对比

Fig.12 Comparison between the corrected and the uncorrected results

红外预警卫星后产生的衍射效应对其综合信噪比的影响很严重,在计算弹道中段目标成像信噪比时不能忽略。

3.3 探测距离分析

探测距离是衡量预警卫星探测能力的主要指标之一。探测距离不仅要考虑目标辐射特性,还要考虑目标辐射的变化、背景辐射、大气传输衰减以及光电探测器性能等特性的影响。红外成像系统探测作用距离模型一般表达式为^[17]:

$$R_2 = [I_t \tau_a] [A_0 \tau_0] [D_\lambda^*] \left[\frac{1}{(A_d \Delta f)^{1/2} \text{SNR}} \right] \quad (21)$$

等式右边第一项表征了目标的辐射特性和大气衰减作用;第二项代表了光学系统特性的各个参数,包括光学系统的入瞳面积和光学透过率;第三项为探测器的特性;第四项说明系统和信号处理特性的参数。

该探测作用距离模型未考虑背景辐射和目标反射探测环境中其他辐射源的影响,同时未考虑成像

系统衍射效应的影响。影响探测能力的目标辐射特性的建模精确性有待提高,对传统探测作用距离模型作出以下修正:

(1) 考虑低轨预警卫星探测器视场内背景辐射的影响。公式(21)中第一项中目标辐射强度修改为目标辐射与其探测器视场内背景辐射的差值即: I_t 替换为 $\Delta I = I_t - \varepsilon_b L_b A_t$ 。

(2) 考虑弹道中段目标对复杂探测环境其他辐射源的反射,即: I_t 替换为 $I_t = I_{\text{self}} + I_{\text{ref}}$,其中 $I_{\text{ref}} = I_{\text{ref-earth}} + I_{\text{ref-sun}} + I_{\text{ref-atm}} + I_{\text{ref-cloud}}$ 。

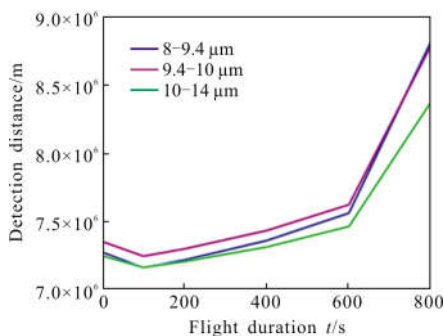
(3) 考虑低轨预警卫星光学系统衍射效应对弹道中段目标成像的影响。引入模糊斑在探测器像元的累积分布函数 CDF 表征低轨预警卫星光学系统衍射效应的影响。

根据修正的衍射效应作用综合信噪比 SSR 计算模型,红外成像系统探测作用距离计算式表示为:

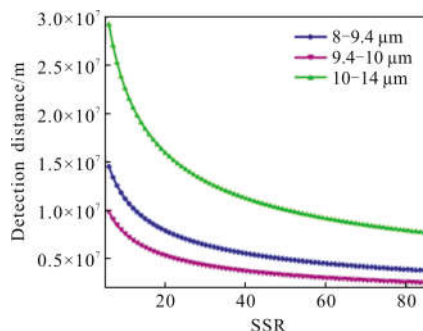
$$(R+f)^2 = \frac{D^*}{(A_d \Delta f)^{1/2}} \frac{\pi \tau_0 \tau_a}{4F^2} \sqrt{\text{CDF} + \frac{(\Delta I f^2)^2}{\text{SSR}^2} - (L_b A_t f^2)^2} \quad (22)$$

图 13 为低轨红外预警卫星对弹道中段目标探测作用距离随目标飞行时间的变化曲线以及探测作用距离随综合信噪比 SSR 的变化曲线。

由图 13 可知:各波段探测作用距离随着综合信噪比的升高迅速下降。当综合信噪比值高于 20 时,其下降速度趋于平缓。同时,9.4~10 μm 波段探测作用距离相对其他两波段较小,其他两波段低轨红外预警卫星对弹道中段目标探测距离量级为 10⁷ m。



(a) 探测距离随目标飞行时间变化曲线
(a) Detection distance varies with time



(b) 探测距离随综合信噪比变化曲线
(b) Detection distance varies with SSR

图 13 探测距离变化曲线图

Fig.13 Detection distance varies with time and SSR

目标在不同方向上的辐射强度不同,导致低轨预警卫星以不同的角度对目标进行探测时,探测距离会随观测角度的变化而变化,图 14 为阈值综合信噪比 *SSR_{th}* 不同时,探测距离随观测角度的变化曲线。

由图 14 可知:各波段低轨预警卫星对弹道中段目标的探测距离随阈值综合信噪比 *SSR_{th}* 的增

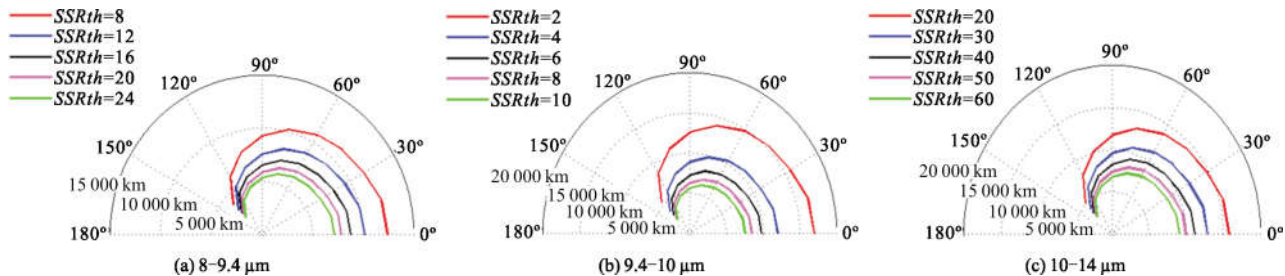


图 14 探测距离随探测角度的变化

Fig.14 Detected distance varies with detection angle

大而减小。在 8~9.4 μm 波段当阈值综合信噪比 *SSR_{th}* 分别取 [8 12 16 20 24] 时,最大探测作用距离分别为 [12 444.1 10 160.5 8 799.3 7 870.3 7 184.59 km]。9.4~10 μm 波段,由于弹道中段目标在低轨预警卫星探测器像面产生的综合信噪比较低,当阈值综合信噪比 *SSR_{th}* 分别为 [2 4 6 8 10] 时,最大探测作用距离分别为 [16 963.6 11 995.1 9 793.0 8 481.8 7 586.4 km]。在 10~14 μm 波段,阈值综合信噪比 *SSR_{th}* 分别为 [20 30 40 50 60] 时,最大探测距离分别为 [15 754.4 12 863.4 11 140.0 9 964.0 9 095.8 km]。

基于表 3 低轨预警卫星的载荷参数及其轨道

高度(1 600 km),当弹道导弹中段目标飞行高度为 650 km 时,目标与探测器的最大距离约为 7 200 km^[18]。8~9.4 μm、9.4~10 μm 和 10~14 μm 波段的阈值综合信噪比分别小于 24、10 和 60 时,满足低轨卫星探测预警探测需求。

4 结论

文中基于低轨预警卫星对中段弹道导弹的探测机理,综合考虑了复杂探测环境中各辐射源对弹道中段目标的辐射作用,分别建立了弹头目标的自身辐射及反射辐射特性,结合天基预警卫星成像系统

参数及衍射效应,修正了成像综合信噪比模型及探测作用距离模型,分析了低轨预警卫星对弹道中段目标的探测能力。最后仿真了不同时刻目标的成像特征。从仿真及计算结果可以看出:(1)复杂背景下目标的综合信噪比 SSR 约为目标自身辐射产生的综合信噪比 SSR 的 1.2 倍,复杂探测环境中辐射源对成像综合信噪比的影响不可忽略。(2)修正后的综合信噪比明显小于修正前的综合信噪比,弹道中段目标经低轨红外预警卫星后产生的衍射效应对其综合信噪比的影响很严重,在计算弹道中段目标成像信噪比时不能忽略。(3)当综合信噪比值高于 20 时,探测距离下降速度趋于平缓,且 $9.4\sim 10\ \mu\text{m}$ 波段探测作用距离相对其他两波段较小。(4)低轨预警卫星以不同的角度对目标进行探测时,探测距离会随观测角度的变化而变化,当探测角为 0° 时,探测距离最大。文中工作可为提高我国天基预警系统参数的设计及评估提供理论依据与数据支持。

参考文献:

- [1] Independent Working Group. Missile defense, the space relationship, and the twenty-first century [D]. Washington: The Institute for Foreign Policy Analysis, 2007.
- [2] Long Yunli. Research on target detection and tracking technologies for space-based infrared surveillance system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [3] Lewis G N, Postol T A. Future challenges to ballistic missile defense[J]. *IEEE Spectrum*, 1997, 34(9): 60–68.
- [4] Lu Xiaofei, Sheng Jie. Review of surface temperature of ballistic missile in flight[J]. *Infrared*, 2016, 37(1): 1–6. (in Chinese)
- [5] Zhang Yi, Zhao Jingquan, Zhong Yuzhou. Infrared radiation characteristics of missiles in desert background [J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(7): 653–658. (in Chinese)
- [6] Shen X. Influence of background radiation on space target detection in the long wave infrared range [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(8): 6402.
- [7] Liu Zunyang, Ye Qing, Li Xiuhe, et al. Choice and detectability of see-to-ground waveband of infrared warning satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(2): 0204003. (in Chinese)
- [8] Liu Tao, Chen Haowen, Li Xiang. Study of midcourse target discrimination based on space based IR sensor[J]. *Electronics Optics & Control*, 2009, 16(3): 6–8. (in Chinese)
- [9] Yuan Guibin. Research on infrared radiation signature of missile plume and cloud scene [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [10] Wang Lei. Research on the simulation of ballistic missile's infrared imaging on the middle course of the flight [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)
- [11] She Eryong, Peng Hao. The analysis of detection performance for STSS IR sensor [J]. *Aerospace Control*, 2012, 30(4): 81–83. (in Chinese)
- [12] Xing Hui, Lei Ping, Liu Rong, et al. Analysis of technical characteristics of the early warning detection unit in the space tracking and surveillance system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013(8): 29–35. (in Chinese)
- [13] Xu Yuannan, Li Junwei, Wu Kaifeng, et al. Detection band selection for mid-wave infrared spectrum using synthetic signal-to-noise ratio [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2126–2131. (in Chinese)
- [14] Chen Zuolong, Huang Fuyu, Li Peijun, et al. Modified model of operating range for cooled infrared detection system [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(12): 1513–1516. (in Chinese)
- [15] McDonough R N, Whalen A D. Detection of Signals in Noise[M]. 2nd ed. San Diego: Academic Press, Inc, 1995.
- [16] Nichols J M, Miller C. Analytical expression for the average ensquared energy [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2015, 32(4): 654–659.
- [17] Wu Hanping. Infrared Search System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [18] Liu Tao, Lv Kangfeng. The requirement and application analysis of ground-based air defense to early-warning satellite of near-earth Orbit [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2006(4): 317–319. (in Chinese)