

文章编号:1001-9014(2007)06-0425-04

# 导弹助推段天基红外探测的像面照度模型及其应用

张光明<sup>1,2</sup>, 孙胜利<sup>3</sup>, 张伟<sup>2</sup>, 裴云天<sup>3</sup>, 樊士伟<sup>2</sup>

(1 哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;  
3. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:**波段选择是导弹助推段天基红外探测系统设计首先需要解决的问题. 无论是中心波长的确定, 还是波段宽度的设定, 都应有合理的依据. 本文提出了导弹助推段天基探测的像面照度模型, 并根据模型得到导弹助推段天基红外探测系统的目标与背景信杂比作为目标函数, 利用信杂比的最大化作为波段宽度选择的依据, 进行探测波段的选择. 分析结果表明, 以 H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> 吸收带 2.7 μm 和 4.3 μm 为作为红外探测系统的中心波长有其固有的合理性, 不同的波段宽度选择将使信杂比产生显著变化. 本文所建立的像面照度模型对遥感器设计和性能估计亦有重要意义.

**关键词:**吸收带; 红外探测; 像面照度

**中图分类号:** TP722.5 **文献标识码:** A

## MODEL AND APPLICATION OF IMAGE PLANE ILLUMINATION FOR THE SPACE-BASED INFRARED DETECTING OF BOOST-PHASE MISSILE

ZHANG Guang-Ming<sup>1,2</sup>, SUN Sheng-Li<sup>3</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, PEI Yun-Tian<sup>3</sup>, FAN Shi-Wei<sup>2</sup>

(1. Research Center of Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China;

3. Shanghai Institute of Technology and Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** Infrared band selection for boost-phase missile detection is fundamental to space based infrared system. Decision of central wavelength and band width of the infrared detecting band should be subject to some reasonable rules. A model for calculating the illumination of the image plane caused by missile and other various infrared radiations was proposed, and then the right waveband and the related central wavelength was got by using an object function of signal to clutter rate (SCR) in missile's boost-phase. Results shows that absorption band of H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> at 2.7 μm and 4.3 μm are suitable to be selected as detecting band, and SCR varies largely with the width of detecting band. The radiometry model can also be used as the design and performance evaluation for many infrared remote instruments.

**Key words:** absorption band; infrared detecting; image plane illumination

### 引言

天基红外预警探测系统采用大口径多波段红外探测方式, 这样可以有效地从存在各种杂波中提取目标<sup>[1,2]</sup>. 系统设计前首先必须确定探测波段. 合适的波段选择可以提高探测概率、降低虚警率; 反之, 则易使目标信号湮没于杂散背景信号之中, 发出错误的探测信息. 20 世纪 60 年代, 美国的“米达斯”卫星选用 2.3 μm 波段来探测导弹发射, 波段选择不当是该计划失败的一个重要原因.

本文尝试以目标与背景信号之间的信杂比作为波段选择的目标函数, 首先建立导弹助推段红外探测的像面照度模型, 然后导出了天基红外探测过程中目标辐射与背景辐射的信杂比公式, 按照系统信杂比最大化的原则, 确定系统的中心波长及波段宽度. 本文采用此种方法对美国 DSP 预警卫星的参数进行实例计算和分析, 结果符合预期.

### 1 像面照度物理模型

弹道导弹助推段天基红外探测的模型结构如图

收稿日期: 2006-10-23, 修回日期: 2007-07-06

基金项目: 863 创新基金(2003AA005029)资助项目

作者简介: 张光明(1967-), 男, 浙江宁波人, 高工, 博士研究生, 主要从事空间光学工程总体设计.

Received date: 2006-10-23, revised date: 2007-07-06

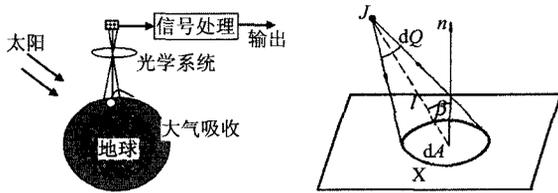


图1 导弹助推段天基探测的模型结构图和点目标产生的辐照度计算图

Fig. 1 Model structure of space-based infrared detecting of phase-boost missile and calculation of irradiance caused by point target

1 所示. 根据图 1, 导弹助推段天基红外探测器接收的能量包括: 1. 地球的红外辐射部分透过吸收带产生的像面辐射照度  $E_{earth}$ ; 2. 导弹助推段的高温气体及高温本体红外辐射产生的像面辐射照度, 简称目标辐照度  $E_{missile}$ ; 3. 大气的红外辐射产生的像面辐射照度, 简称大气背景辐照度  $E_{atmosphere}$ ; 4. 在探测器视场内的仪器背景所产生的红外辐射形成的像面辐射照度, 简称仪器背景辐照度  $E_{instrument}$ . 5. 太阳照射仪器和大气所产生的反射和散射形成像面辐射照度  $E_{Sun}$ .

因此, 总的像面照度模型为

$$E_T = E_{earth} + E_{missile} + E_{atmosphere} + E_{instrument} + E_{Sun} \quad (1)$$

定义仪器输出信号中目标信号与杂散背景(含地球辐射、大气背景、仪器背景和太阳散射)之比为信杂比 SCR

$$SCR = \frac{E_{missile}}{E_{earth} + E_{atmosphere} + E_{instrument} + E_{Sun}} \quad (2)$$

### 1.1 导弹助推段产生的像面照度

导弹本体及其尾焰相对于 36000km 的高度上分辨率为 1km 的探测仪器可以认为是一个点目标, 如图 1 所示. 由图 1 得到入瞳处的辐照度

$$E_0 = \frac{Jd\Omega \cdot \tau_a}{dA} = J \cdot \tau_a \cdot \frac{\cos\theta}{l^2} \quad (3)$$

式中:  $d\Omega$  为点源对入瞳所张的立体角;  $J$  为点源辐射强度;  $l$  为点源到光学系统入瞳  $dA$  的距离;  $\theta$  为入瞳法线(光轴)与入射光线的夹角,  $\tau_a$  为大气透过率.

轴上点入瞳辐照度  $E_0$  与像面辐照度  $E$  的关系为

$$E_0 \cdot \frac{D_0^2 \cdot \tau_0 \cdot \pi}{4} = E \cdot d_0^2 \quad (4)$$

因此, 由于导弹助推段高温气体及本体的红外辐射产生的像面辐射照度  $E_{missile}$

$$\begin{aligned} E_{missile} &= E_0 \cdot \tau_0 \cdot \pi \cdot \frac{D_0^2/4}{d_0^2} \\ &= \frac{J}{l^2} \cdot \tau_0 \cdot \tau_a \cdot \pi \cdot \frac{D_0^2/4}{d_0^2} \cdot \cos(\theta) \quad (5) \end{aligned}$$

式中:  $D_0$  为光学口径;  $d_0$  为探测器尺寸,  $f$  为光学系统

焦距;  $\tau_0$  为光学系统效率;  $\tau_a$  为大气透过率, 不同的高度和探测波段, 大气透过率不相同.

由该物理数学模型可知道, 在探测器尺寸一定的情况下, 增加口径  $D_0$  和降低卫星高度  $l$  都可以增加由于导弹助推段高温气体及本体的红外辐射产生的像面辐射照度. 当目标的飞行高度在改变时, 大气透过率也在改变, 探测的距离也在改变, 对于 36000km 的高度, 导弹飞行高度的改变所引起的照度变化远低于透过率的改变. 而对于轨道高度大约 800km 太阳同步轨道卫星, 导弹飞行高度的改变和大气透过率的改变同时也在起作用, 除非知道绝对高度, 否则是无法得到绝对辐射强度的.

### 1.2 大气背景产生的辐照度

大气背景充满了探测器光学瞬时视场, 因此按照面目标进行大气背景产生的辐照度计算.

对于面源黑体  $dA$ , 入瞳辐照度  $E_0$

$$E_0 = N \cdot \Omega_0 \cdot \frac{dA}{D_0^2 \cdot \pi/4} = N \cdot \sin^2(U) \cdot \frac{dA}{D_0^2/4} \quad (6)$$

式中:  $N$  为大气背景辐亮度,  $\Omega_0$  为视场立体角,  $U$  为光学系统物方孔径角.

轴上点入瞳辐照度  $E_0$  与像面辐照度  $E_{atmosphere}$  的关系为

$$E_0 \cdot \frac{D_0^2 \cdot \tau_0 \cdot \pi}{4} = E_{atmosphere} \cdot d_0^2 \quad (7)$$

因此像面辐射照度为

$$\begin{aligned} E_{atmosphere} &= \frac{E_0 \cdot D_0^2 \cdot \tau_0 \cdot \pi}{4 \cdot d_0^2} \\ &= \frac{N \cdot dA \cdot \tau_0 \cdot \pi \cdot \sin^2 U}{4 \cdot d_0^2} \quad (8) \end{aligned}$$

当系统满足正弦条件时, 垂轴放大率

$$\beta^2 = \left( \frac{n \sin U}{n' \sin U'} \right)^2 = \frac{d_0^2}{dA} \quad (9)$$

式中:  $U'$  为光学系统像方孔径角,  $n$  和  $n'$  分别为物方、像方介质折射率. 因此, 有

$$E_{atmosphere} = \frac{N \cdot \tau_0 \cdot \pi \cdot \sin^2 U'}{4} \quad (10)$$

如表达为与  $F$  数的关系, 并考虑到轴外视场

$$E_{atmosphere} = \tau_0 \pi N \cdot \left( \frac{1}{2F} \right)^2 \cdot \cos(\omega)^4 = \frac{\pi \tau_0 N}{4F^2} \cdot \cos(\omega)^4 \quad (11)$$

由该物理数学模型可知道, 在探测系统确定的情况下, 降低卫星高度不改变由于大气背景红外辐射产生的像面辐射照度, 且与大气透过率无关. 因此在相同的光学系统  $F$  数和光学透过率情况下, 静止卫星探测仪器与太阳同步卫星探测仪器的大气背景像面辐

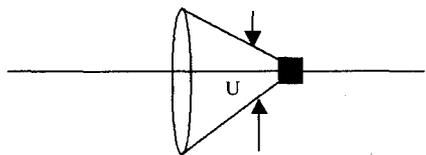
图2 仪器背景红外辐射几何模型<sup>[3]</sup>

Fig.2 Geometric model of instrument background's infrared radiation

照度相同.大气背景辐亮度可以使用 Lowtran7 很方便的计算,无论是有云情况还是无云情况.

### 1.3 仪器背景产生的像面照度

仪器背景产生的辐射可以按照标准黑体光谱辐射计算<sup>[3]</sup>,其通量密度根据普朗克定理可表示为

$$W_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{ch/\lambda kT} - 1}, \quad (12)$$

通常也可写成

$$W_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1}, \quad (13)$$

式中: $W_{\lambda}$ 为光谱辐射通量密度,单位  $W \cdot cm^{-2} \cdot \mu m^{-1}$ ;  $\lambda$ 为波长,单位  $\mu m$ ;  $h$ 为普朗克常数,  $h = 6.6256 \times 10^{-34} W \cdot s^2$ ;  $T$ 为绝对温度,单位为  $K$ ;  $c$ 为光速,  $c = 2.997925 \times 10^{10} cm \cdot s^{-1}$ ;  $c_1$ 为第一辐射常数,  $c_1 = 3.7415 \times 10^4 W \cdot cm^{-2} \cdot \mu m^4$ ;  $c_2$ 为第二辐射常数,  $c_2 = 1.43879 \times 10^4 K \cdot \mu m$ ;  $\kappa$ 为玻耳兹曼常数,  $\kappa = 1.38054 \times 10^{-25} W \cdot s \cdot K^{-1}$ ;

一般来说,仪器背景辐射符合朗伯体辐射条件,即有标准黑体光谱辐亮度  $N$  与光谱通亮密度  $W$  关系

$$W_{\lambda} = \pi \cdot N \quad (14)$$

如图3所示,仪器背景到达探测器像面后产生的照度为

$$E_{instrument} = \varepsilon \cdot \frac{\Omega}{\pi} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{ch/\lambda kT} - 1} \cdot d\lambda \quad (15)$$

式中: $\Omega$ 为探测器看到背景的立体角,  $\Omega = \frac{\pi}{4F^2}$ ,  $\varepsilon$ 为镜面黑体辐射率.

于是

$$E_{instrument} = \varepsilon \cdot \frac{1}{4F^2} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{ch/\lambda kT} - 1} \cdot d\lambda \quad (16)$$

由此模型可以看出,加大  $F$  数或降低后光路温度都可以有效的减少仪器背景温度.

## 2 像面照度模型的应用

信杂比反映了目标信号与复杂背景信号的相对大小,只有在目标信号显著地突出于背景信号,目标信号才容易被鉴别和提取.因此,中心波长及波段宽

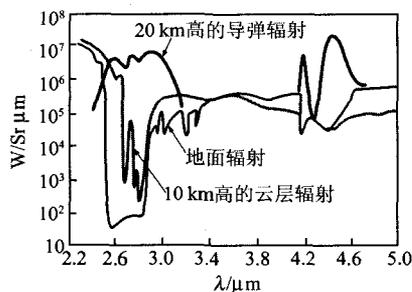
图3 H<sub>2</sub>O和CO<sub>2</sub>的吸收与发射

Fig.3 Absorption and emission intensity of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> in different bands

度的选择应使系统的信杂比取得最优.

### 2.1 中心波长的选择

中心波长选择时,我们关注导弹燃料形成的 2.7  $\mu m$  和 4.3  $\mu m$  为中心波长的 H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> 吸收带.根据基尔霍夫定律,良好的吸收体一定是良好的发射体,因此导弹尾焰在 H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> 辐射带有十分强烈的红外辐射,同时大气层中的 H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> 将对 2.7  $\mu m$  和 4.3  $\mu m$  的红外辐射有强烈的吸收.如图3所示<sup>[4]</sup>

当导弹处于大气层之外时,在 2.7  $\mu m$  和 4.3  $\mu m$  波段,地面目标到卫星的透过率为 0,而导弹在此波段具有强烈的辐射,系统在 2.7  $\mu m$  和 4.3  $\mu m$  波段无疑具有很高的信杂比.总的像面照度模型和信杂比均可简化

$$E_T = E_{missile} + E_{atmosphere} + E_{instrument} \\ = \frac{J}{l^2} \cdot \tau_0 \cdot \tau_a \cdot \pi \cdot \frac{D_0^2}{4d_0^2} \cdot \cos(\theta) + \frac{\pi \tau_0 N}{4F^2} \cdot \cos(\omega)^4 \\ + \varepsilon \cdot \frac{1}{4F^2} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{ch/\lambda kT} - 1} \cdot d\lambda \quad (17)$$

$$SCR = \frac{E_{missile}}{E_{atmosphere} + E_{instrument}} \\ = \frac{\frac{J}{l^2} \cdot \tau_0 \cdot \tau_a \cdot \pi \cdot \frac{D_0^2}{4d_0^2}}{\frac{\pi \tau_0 N}{4F^2} + \varepsilon \cdot \frac{1}{4F^2} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{ch/\lambda kT} - 1} \cdot d\lambda} \quad (18)$$

### 2.2 波段宽度的选择

首先以低轨道测量仪器为例进行像面照度和信杂比计算.计算中,  $J = 5 \times 10^4 W/Sr$ ; 轨道高度  $l = 400 km$ ; 光学口径 100mm, 焦距为 140mm, 光学系统视场 5°; 光学系统效率 0.5; 大气透过率按照 20km 高度计算, 2.65 ~ 2.9 波段透过率 0.8, 4.18 ~ 4.48 波段透过率 0.52, 仪器背景温度 300K, 大气背景在 2.65 ~ 2.9 波段的辐亮度度  $2 \times 10^{-3} W/(m^2 Sr)$ , 在 4.18 ~ 4.48 波段为  $2 \times 10^{-2} W/(m^2 Sr)$ . 根据上述计算模型计算关于轴上点 ( $\omega = 0$ ) 的结果如表 1 所列.

表 1 利用 2.7 和 4.3 $\mu\text{m}$  为中心波长的吸收带探测时像面照度计算结果

Table 1 Calculation result of image plane illumination using absorption band for detecting with central wavelength of 2.7 and 4.7 $\mu\text{m}$

波段 $\mu\text{m}$	目标像面 辐照度 $\text{W}/\text{m}^2$	大气背景 像面辐照 度 $\text{W}/\text{m}^2$	仪器背景 像面辐照 度 $\text{W}/\text{m}^2$	目标像面 辐照度 $\text{W}/\text{m}^2$
2.65 ~ 2.9	1.370	$4.2 \times 10^{-4}$	$2.18 \times 10^{-4}$	1.371
4.18 ~ 4.48	1.370	$3.5 \times 10^{-3}$	$2.32 \times 10^{-3}$	1.384

表 2 不同波段宽度下的信杂比计算结果

Table 2 Signal to clutter ratio (SCR) in different bands (near 2.7 and 4.7 $\mu\text{m}$ )

波段 $\mu\text{m}$	目标辐射 强度 $10^4 \text{W}/\text{sr}$	大气透过率	背景辐亮度 $10^{-6} \text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$	SCR
4.18 ~ 4.4	0.44	0.28	1.138	0.751
4.18 ~ 4.45	0.54	0.375	1.565	0.898
4.18 ~ 4.5	0.64	0.456	2.52	0.804
4.2 ~ 4.5	0.6	0.442	2.437	0.755
4.2 ~ 4.55	0.7	0.512	4.284	0.581
4.21 ~ 4.4	0.38	0.242	1.028	0.621
4.21 ~ 4.5	0.58	0.446	2.41	0.745
4.21 ~ 4.55	0.68	0.518	4.257	0.574
2.6 ~ 2.8	0.4	0.86	0.01073	222
2.6 ~ 2.82	0.44	0.87	0.01277	208
2.6 ~ 2.85	0.5	0.88	0.02077	147
2.65 ~ 2.85	0.4	0.85	0.0164	144
2.65 ~ 2.9	0.5	0.88	0.244	12.5

我们选择文献中美国 DSP 卫星相近的系统参数<sup>[4]</sup>进行像面照度和信杂比计算. 算例为: 对于地球同步轨道, 轨道高度为 36000Km, 光学系统口径为 600mm, 瞬时视场 40 $\mu\text{rad}$ , 仅研究轴上星下点  $\omega = 0, \theta = 0$ , 计算出不同波段宽度下的信杂比如表 2 所列. 由表中可以看出, 4.18 ~ 4.45 $\mu\text{m}$ 、2.60 ~ 2.80 $\mu\text{m}$  为信杂比最大的波段宽度.

### 2.3 信杂比与仪器背景温度关系

根据信杂比模型, 分析中、短波信杂比与温度关系, 得到图 5 和图 6 中所示曲线. 由图可以看出, 降

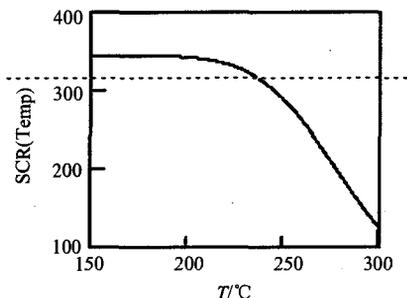


图 4 中波信杂比与温度关系曲线

Fig. 4 Relation between SCR of mid wave infrared and temperature.

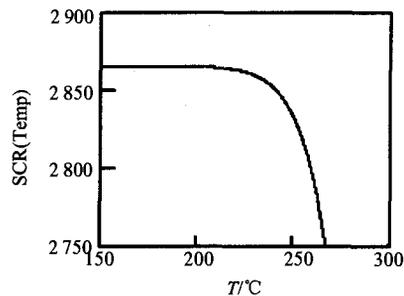


图 5 短波信杂比与温度关系曲线

Fig. 5 Relation between SCR of short wave infrared and temperature

低温度对于提高信杂比有好处, 但对于短波, 仪器背景温度降低到 250K 以后, 信杂比无明显提高, 而中波降低到 200K 以后温度再无明显提高.

### 3 结语

由目标像面辐照度、大气背景像面辐照度、仪器背景辐照度建立起来的导弹助推段天基红外探测的像面照度模型, 表达了到达像面的辐照度与光学系统口径、系统 F 数、探测器尺寸、目标强度、仪器背景温度和大气背景辐亮度的关系, 在此基础上所的信杂比公式可以作为助推段导弹天基红外探测系统波段选择的目标函数. 此方法解释了美国 DSP 卫星选择 2.7 $\mu\text{m}$  和 4.3 $\mu\text{m}$  作为中心探测波长的合理性, 同时也可以作为波段带宽选择的一个工具. 根据该公式还可以估计出仪器温度、系统 F 数对信杂比的影响. 采用本文提出的模型, 结合 Lowtran7 的大气计算软件, 可以很方便的计算出探测系统的像面照度, 成为系统辐射度学仿真、动态范围设计的基础.

### REFERENCES

- [1] CHANG Jun, LIU Li-Ping, WANG Yong-Tian, et al. Dual-band infrared optical system with large field-of-view and aperture[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (常军, 刘莉萍, 王涌天, 等. 大视场、大口径双波段红外非制冷光学系统. 红外与毫米波学报), 2006, 25(3): 170—172.
- [2] XU Jiang-Feng, ZHANG Yong, TANG Xin-Yi, et al. Research on real-time signal processing technology of large view field infrared image detecting system [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (徐江丰, 张涌, 汤心溢, 等. 大视场红外成像探测系统实时信号处理技术研究. 红外与毫米波学报), 2006, 25(6): 421—425.
- [3] CHEN BO-Ruo. *Infrared System* [M]. Beijing: National Defence Industry Press (陈玻若. 红外系统. 北京: 国防工业出版社), 1988.
- [4] BALLISTIC MISSILES; THREAT AND RESPONSE Available via the World Wide Web: <http://www.access.gpo.gov/congress/senate>.