

导弹目标短波红外探测模型研究

谭碧涛^{1,2,3}, 陈力子³, 贺玉³, 张新¹

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2.中国科学院研究生院, 北京 100039;
3.新疆乌鲁木齐 21 号信箱 189 分箱, 新疆 乌鲁木齐 841700)

摘要: 随着红外技术的发展, 导弹红外探测技术的研究及应用进度也在加快。基于导弹目标的辐射特性, 对其短波红外探测技术进行了研究, 给出了导弹目标在短波波段的辐射模型以及从信噪比出发的探测模型; 针对某特定红外热成像系统进行了短波红外探测的计算机仿真, 仿真结果验证了探测模型的正确性。

关键词: 红外辐射; 短波; 探测; 仿真

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2008)增(红外)-0405-04

Infrared detecting model of the missile target

TAN Bi-tao^{1,2,3}, CHEN Li-zi³, HE Yu³, ZHANG Xin¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Urumchi Xinjiang 21 mail box 189 Sep code, Urumchi 841700, China)

Abstract: With the fast developing of the infrared technology, the study schedule of the missile infrared detecting technology also gained faster development. Based on the infrared characteristic of the missile target in the air, the infrared detecting of the target is studied, and the radiation model and detecting model with signal-to-noise are presented. At last, all the models are simulated by the computer through MatLab language, the simulation result validates that the detecting model is correct.

Key words: Infrared radiation; Shortwave; Detecting; Simulation

0 引言

红外热成像技术实质上是一种波长转换技术, 即把红外辐射转换为可见光的技术, 利用景物本身各部分辐射的差异获得图像的细节。对于不同的目标, 其红外辐射特征往往不同, 目标的红外辐射特征是红外系统对目标进行探测的关键依据。由于热成像技术具有多种优点, 其在战略预警、战术报警、侦察、观瞄、导航、制导、遥感、气象、医学和科学研究等军事和民用的许多领域中得到广泛应用^[1]。

由于导弹飞行速度快、打击距离远、雷达反射截面积小, 雷达探测跟踪起来十分困难。近年来, 随着红外技术的迅猛发展, 导弹红外探测技术的研究进度也在进一步加快。导弹目标红外特征源一般是由反射地球光, 反射天空光, 表皮热辐射, 热部分的辐射和燃气流的辐射合成, 为此, 要实现对导弹目标红外辐射特性的比较深入分析研究, 必须综合考虑其红外特征源。文中针对空中导弹目标的短波红外探测进行了重点研究, 给出了探测模型, 并进行了计算机仿真。

收稿日期: 2008-03-31

作者简介: 谭碧涛 (1983-), 男, 江西丰城人, 硕士生, 主要从事光电跟踪测量技术研究。Email:tanbitao2001@yahoo.com.cn

1 探测模型

导弹在稠密大气层的飞行过程中, 由于剧烈的气动加热效应, 蒙皮温度会快速上升, 在短波红外波段具有较强的灰体辐射^[2-3]。

1.1 气动加热模型

气动加热效应引起的蒙皮温度变化可利用如下的经验公式进行计算^[4]:

$$T = T_a \{1 + k[(\gamma - 1)/2]Ma^2\}$$
 (1)

式中: T 为目标蒙皮温度; T_a 为周围大气的温度; k 为恢复系数 (取 0.82); γ 为空气的定压热容量和定容热容量之比 (取 1.3); Ma 为马赫数。代入数值得:

$$T = T_a(1 + 0.123Ma^2)$$
 (2)

1.2 大气温度模型

在 85~0 km 的高度范围, 大气温度可用 7 个连续的线性方程来描述, 形式为^[4]:

$$T_a = T_b + L_b(H_b - H)$$
 (3)

式中: T_a 为层面温度; L_b 为温度梯度; H 为目标高度; H_b 为层面高度。表 1 是大气高度在 85~0 km 内的温度梯度和由此计算得到的层面温度, 由表 1 可以求得任一高度的大气温度。

表1 85~0 km内温度梯度变化和层面温度

Tab.1 Temperature gradient and bedding surface temperature within 85 kilometer

Height/km	Temperature gradient /K·km ⁻¹	Bedding surface height/km	Bedding surface temperature/K
85~71	2.0	71	218
71~51	2.8	51	274
51~47	0	47	274
47~32	-2.8	32	232
32~20	-1.0	20	220
20~11	0	11	220
11~0	6.5	0	291.5

1.3 辐射强度模型

(1) 尾向辐射

导弹的尾向热辐射主要来自尾喷管和排除的气流, 具体随导弹的类型来决定。已知温度, 则其辐射强度为^[1]:

$$I_r = \frac{\varepsilon A \sigma T^4}{\pi} [z(x_2) - z(x_1)]$$
 (4)

式中: T 为喷气管的温度; A 为尾喷管端面面积; ε 为辐射发射率, 令其为 0.9; σ 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数, 为 $5.6\ 693 \times 10^{-8}(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-4})$; $x_1 = \lambda_1 / \lambda_m$; $x_2 = \lambda_2 / \lambda_m$; $\lambda_m = 2\ 898/T$; $z(x_1)$ 、 $z(x_2)$ 可通过查表获得。

(2) 侧向辐射

由于导弹飞行过程中与大气产生摩擦, 蒙皮升温产生热辐射, 其辐射强度可以根据公式 (4) 进行计算。目标反射太阳的辐射强度 I_f 也需要考虑, 设导弹反射太阳光反射率为 ρ , 有效反射面积为 A_s , 太阳在目标上的照度为 E_{os} , 那么目标反射太阳的光强度为^[5]:

$$I = \frac{\rho}{\pi} E_{os} A_s$$
 (5)

导弹近似为圆柱体, 其有效反射面积为 A_s 为^[5]:

$$A_s = \frac{1}{4} dh \sin \nu \sin \theta \cdot [\sin \psi + (\pi - \psi) \cos \psi]$$
 (6)

式中: d 为圆柱面地面直径; h 为圆柱高; θ 为观测方向与圆柱体轴线夹角; ψ 为太阳辐照方向与观测方向夹角; ν 为太阳入照方向与圆柱体轴线夹角。

1.4 成像像元数

观测时, 导弹在 CCD 像面上的侧向单向像元数为:

$$m = l \frac{f}{R \Delta x}$$
 (7)

式中: l 为导弹长度; f 为对应电视焦距; R 为观测斜距; Δx 为对应电视 CCD 像元尺寸。

同样, 导弹在 CCD 像面上的尾向单向像元数为:

$$n = \frac{df}{R \Delta x}$$
 (8)

式中: d 为导弹尾部口径; f 为对应电视焦距; R 为观测斜距; Δx 为对应电视 CCD 像元尺寸。总的像元数为 $N = m \cdot n$ 。

1.5 信噪比模型

经过大气辐射到 CCD 靶面上产生的电子数为^[6]:

$$N = I \frac{\pi \left(\frac{D}{R} \right)^2}{4} \tau \frac{1}{N} \eta (\lambda/hc) t_0 \quad (9)$$

式中: D 为系统口径; R 为导弹到观测点间斜距; τ 为传输路径总透过率; N 为目标所占像元数, $N = m \cdot n$; A_0 为单个像元面积。CCD 的输出信噪比为^[7]:

$$V_s/V_N = \frac{\phi D^*}{\sqrt{A_0 \Delta f}} \quad (10)$$

式中: D^* 为比探测率, 为 $10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$; A_0 为单个像元面积; Δf 为等效噪声带宽, $\Delta f = \pi/2 \times (1/2\tau_d)$, $\tau_d = T_f/m$; ϕ 为单个像元上的

光通量, $\phi = I \frac{\pi \left(\frac{D}{R} \right)^2}{4} \tau \frac{1}{N}$ 。

2 计算机仿真

针对上述探测模型, 开展了计算机仿真模拟, 假设红外热成像系统的口径为 600 mm, 焦距为 2.5 m, 短波红外 CCD 的参数: 有效波段为 $1 \sim 2 \mu\text{m}$; 像元数为 320×240 ; 像元尺寸为 0.030 mm; 积分时间为 $10 \mu\text{s} \sim 10 \text{ ms}$; 峰值 $D^* > 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$; 采样速率为 50 Hz; 制冷方式是斯特林制冷; A/D 转换位数为 14; 满阱电荷为 1.2 Me^{-1} 。同时, 设空中导弹的最大速度为 3.6 Ma , 弹长为 4.8 m, 弹径为 0.3 m, 飞行高度为 30 km。观测时, 系统正背对太阳, 假设太阳的高角为 45° , 观测仰角为 45° , 见图 1。

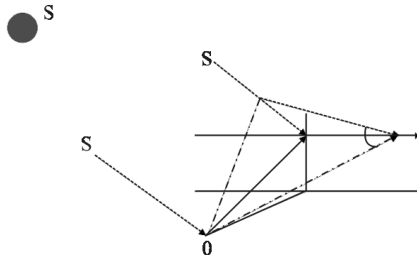


图 1 导弹平飞示意图

Fig.1 Schematic diagram for plane fly

初始时刻, θ 为 90° , ν 为 45° , ψ 为太阳方

向和观测方向夹角为 90° , 飞行时段内, θ 均匀减小到 45° ν 、 ψ 的变化分别公式 (11)、(12)。

$$\sin \nu = \frac{\sqrt{2}}{2\sqrt{1 + \cot^2 \theta + \sqrt{2}\cot \theta}} \quad (11)$$

$$\cos \psi = \frac{2\cot^2 \theta + \sqrt{2}\cot \theta}{2\sqrt{1 + \cot^2 \theta + \sqrt{2}\cot \theta}\sqrt{1 + \cot^2 \theta}} \quad (12)$$

如图 2 所示, 对 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 波段内导弹尾向辐射(温度取 550°C , 灰体, 辐射发射率为 0.9)与侧向辐射进行了分析, 通过曲线分布可以看出, 在短波红外波段, 系统接受的辐射主要来自反射的太阳光辐射和尾向辐射。为此, 在利用短波红外电视对导弹进行探测时, 采取侧向观测, 可同时接受侧向反射辐射和尾向辐射。

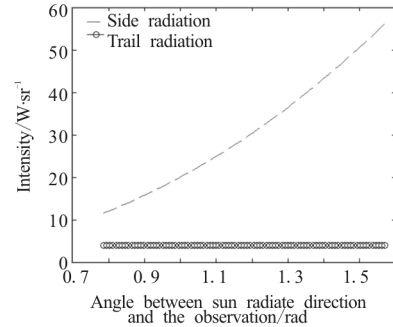


图 2 导弹尾向辐射与侧向辐射对比分析

Fig.2 Contrast analysis between the trail radiation and side radiation

侧向观测时, 在 CCD 靶面上产生的电子数分布曲线见图 3, 信噪比曲线见图 4。从仿真结果可以看出, 在 1 ms 积分时间情况下, 从在 CCD 靶面上产生的电子数和信噪比出发, 短波红外电视可以满足探测此导弹的需求。

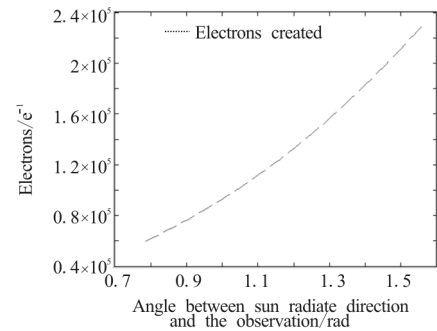


图 3 电子数分布曲线

Fig.3 Distributing curve of the electrons

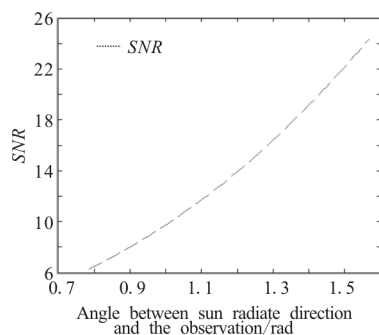


图 4 信噪比分布曲线

Fig.4 Distributing curve of the SNR

3 结 论

文中针对空中导弹目标的短波红外探测技术进行了研究,从红外辐射基本原理出发,给出了导弹目标的红外辐射模型和探测模型;结合具体的红外热成像系统和导弹参数进行了计算机仿真,通过仿真可以

看出,该系统可以实现对该导弹的探测,也进一步说明了该模型的正确性。该模型可应用于红外热成像系统的设计以及应用分析。

参考文献:

- [1] 张敬贤,李玉丹,金伟其. 微光与红外成像技术[M]. 北京:北京理工大学出版社.2004.
- [2] 杨华,凌永顺,陈昌明,等. 美国反导系统红外探测、跟踪和识别技术分析[J]. 红外技术, 2001, 23(4): 1-4.
- [3] 曹西征,郭立红,杨丽梅. 战术弹道导弹再入段红外辐射特性分析[J]. 光电工程, 2006, (9): 23-26.
- [4] 张建奇,方小平. 红外物理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2004.
- [5] 李斌成. 空间目标的光学特性分析[J]. 光学工程, 1989, (4): 21-26.
- [6] 苏毅,万敏. 高能激光系统[M]. 北京:国防工业出版社. 2004.
- [7] 许中胜. 红外探测系统参数关系及实际应用[J]. 光学精密工程, 1999, 7(4): 81-84