

# 基于热物理仿真分析的红外点目标特征提取与识别\*

安玮 徐晖 李宏 孙仲康

(国防科技大学电子工程学院 长沙 410073)

**摘要** 根据弹道中段空间目标和诱饵的表面温度分布规律,从热物理的角度分析了目标和诱饵的红外光谱辐射特性,指出了弹道中段目标和诱饵红外辐射特性的本质差别,并据此提出了红外目标识别中的特征基函数,用特征基函数构造红外点目标识别的四维特征矢量。仿真实验表明,这一特征矢量用于红外点目标识别非常成功。

**关键词** 红外点目标,热物理,特征基函数,特征提取

**分类号** TN911

## IR Point Target Feature Extraction and Recognition Based on Thermophysics Analysis

An Wei Xu Hui Li Hong Sun Zhongkang

(Institute of Electronic Engineering, NUDT, Changsha, 410073)

**Abstract** In this paper, characteristics of IR radiation spectrum of target and decoy in space are discussed in detail using thermophysics theory based on their surface temperature field. The essential difference in IR radiation and mid-trajectory target is pointed out and a fundamental feature function (FFF) of IR target recognition is extracted. A 4-dimension feature vector for IR point target recognition is constructed with FFF. Emulator experiment of IR point target recognition meets with success by using this feature vector.

**Key words** IR point target, thermophysics, fundamental feature function, feature extraction

空间目标在弹道飞行的大部分时间内,距离探测器(天基或地基)较远,在红外图像上仅占据一个像素,称之为红外点目标。点目标的全部信息都集中在图像平面的一个点上,包括点的位置和灰度,损失了目标的形状和表面局部辐射功率信息,如此有限的信息量使得点目标的识别成为一个较为棘手的问题。特别是系留诱饵环境下,诱饵与目标的运动特征完全相同,包含运动特征的点目标位置失去了作用,灰度成为唯一可利用的信息,更增加了识别的难度。但是,在点目标阶段将目标从诱饵中成功地识别出来,可以为后续的拦截提供充裕的反应时间,提高拦截成功率,这正是点目标识别的重大意义所在。

有鉴于此,本文尝试从空间目标和诱饵的热物理仿真特性出发,分析目标和诱饵的红外光谱辐射差异,从中提取有效的特征,识别红外点目标和诱饵。

## 1 目标和诱饵的红外热物理特性分析

为了分析弹道中段空间目标的红外辐射特性,文献[1,2]建立了空间目标表面温度场的热平衡微分方程,在中纬度标准椭圆弹道环境下,选取空间目标较典型的表面材料的热物理参数,进行了大量的仿真计算。理论分析和仿真实验结果表明,弹道中段的目标和诱饵(假设它们为有一定辐射率的灰体)的表

\* 国家自然科学基金资助  
1998年3月24日收稿  
第一作者:安玮,女,1969年生,博士生

面温度场具有如下特点:

(1) 目标表面温度较诱饵稳定。目标的固有特征使其具有较大热容, 其表面温度场随外界热源(如太阳等)热辐射变化较小, 具有时间稳定性, 诱饵的表面温度依赖于外界辐射, 在太阳照射区, 诱饵表面等效温度可高于目标, 但在地球阴影区, 诱饵温度下降很快, 远低于目标。图 1 给出了某典型目标和诱饵的表面等效温度曲线。

(2) 目标表面温度场较诱饵均匀。在各种条件下, 目标表面各处温度分布都较均匀, 温差小, 而诱饵表面各处温差比目标大得多。

根据普朗克定律, 黑体的红外辐射光谱的分布由温度唯一确定。维恩位移定律揭示了光谱辐射峰值波长  $\lambda_m$  与温度  $T$  的关系:

$$\lambda_m T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (1)$$

因此, 目标的第一个特点使得它的红外光谱辐射的峰值波长随时间变化很小, 而诱饵光谱辐射的峰值波长随时间波动较大。第二个特点使得目标在不同观测方向上的红外光谱辐射的峰值波长较一致, 而诱饵则有一定的差异, 差异大小由温度分布的不均匀程度决定。

同时, 必须指出, 空间目标红外辐射的有效面积、辐射率、探测距离等都影响探测器所接收到的目标辐射功率, 因此, 同一帧图像上, 温度相同的物体所成的像的灰度未必相同。同理, 我们不能依据红外探测所得的绝对功率大小判定目标和诱饵。

由此看来, 红外光谱辐射的峰值波长充分反映了目标和诱饵的不同特征。如果能找到一个统计量, 使其能够从红外辐射功率的测量值中得到目标峰值波长(或与之等价的表面等效温度), 则可有效地提取特征, 识别目标和诱饵。

## 2 红外点目标的特征提取与识别

### 2.1 特征基函数

图 2 给出了黑体的红外光谱辐射曲线, 不妨在  $\lambda_0 = 5 \mu\text{m}$  处将红外光谱分为长波和短波两部分, 记  $E_{bs}(\lambda_0, T)$  和  $E_{bl}(\lambda_0, T)$  分别为温度为  $T$  的黑体在短波和长波波段的辐射出射度, 则

$$E_{bs}(\lambda_0, T) = \int_0^{\lambda_0} \frac{C_1 d\lambda}{\lambda^5 (\exp(C_2/\lambda T) - 1)} \quad (2)$$

$$E_{bl}(\lambda_0, T) = \int_{\lambda_0}^{\infty} \frac{C_1 d\lambda}{\lambda^5 (\exp(C_2/\lambda T) - 1)} \quad (3)$$

温度越高, 能量越向短波集中, 定义函数  $f_b(\lambda_0, T)$ :

$$f_b(\lambda_0, T) = \frac{E_{bl}(\lambda_0, T)}{E_{bs}(\lambda_0, T)} \quad (4)$$

$f_b(\lambda_0, T)$  随着温度的升高而单调减小。对于表面辐射率为  $\epsilon$  的灰体, 有

$$f_g(\lambda_0, T) = \frac{E_{gl}(\lambda_0, T)}{E_{gs}(\lambda_0, T)} = \frac{\epsilon \cdot E_{bl}(\lambda_0, T)}{\epsilon \cdot E_{bs}(\lambda_0, T)} = f_b(\lambda_0, T) \quad (5)$$

记  $f(\lambda_0, T) = f_g(\lambda_0, T) = f_b(\lambda_0, T)$ , 则  $f(\lambda_0, T)$  是一个无量纲的量, 仅是温度的函数, 与物体表面的辐射率无关, 本文称之为特征基函数。图 3 给出了  $\lambda_0 = 5 \mu\text{m}$  时,  $f(\lambda_0, T)$  的函数曲线。

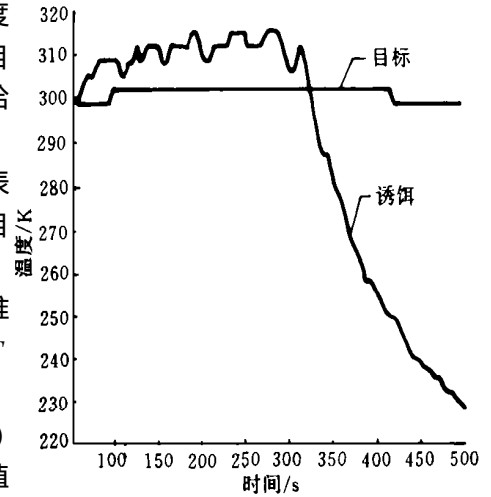


图 1 目标和诱饵的表面等效温度

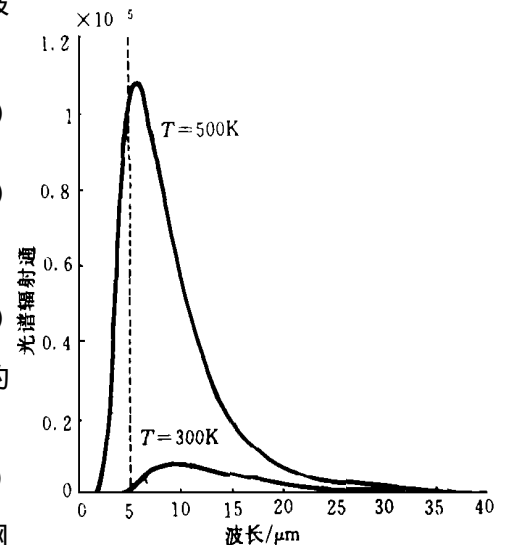
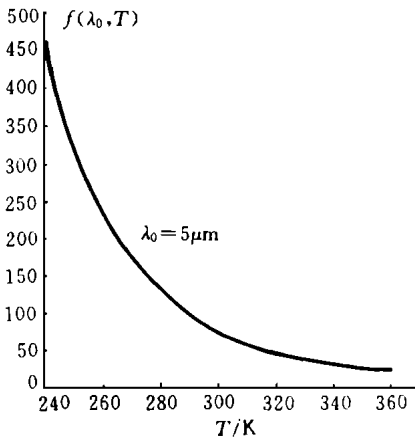
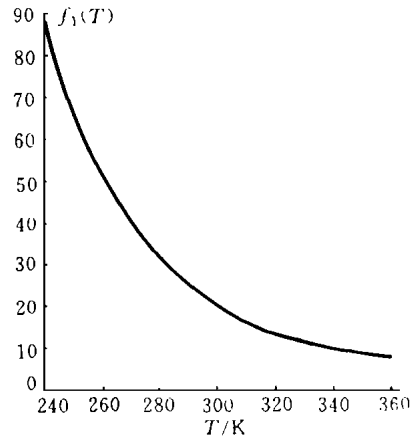


图 2 黑体的光谱辐射曲线

从图3看出,当红外光谱辐射的峰值波长向短波移动(温度升高)时, $f(\lambda_0, T)$ 迅速下降, $\lambda_0$ 一定时, $f(\lambda_0, T)$ 是温度的单调下降函数。由此,可以考虑使用以 $\lambda_0$ 为分界的长、短波两个红外探测器,从同一位置和方向探测目标所得红外辐射能量相比,即得函数 $f(\lambda_0, T)$ ,它刻画了目标的表面等效温度。

图3 特征基函数 $f(\lambda_0, T)$ 图4 特征基函数 $f_1(T)$ 

然而实际中很难做到两个如此理想的长、短波探测器,经常使用的长、短波段分别为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 和 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ ,我们不妨定义一个类似于 $f(\lambda_0, T)$ 的函数 $f_1(T)$ :

$$f_1(T) = \frac{\int_3^{12} C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot (\exp(C_2/\lambda T) - 1)^{-1} \cdot d\lambda}{\int_3^8 C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot (\exp(C_2/\lambda T) - 1)^{-1} \cdot d\lambda} \quad (6)$$

其函数曲线见图4。函数 $f_1(T)$ 的曲线表明,它与 $f(\lambda_0, T)$ 有非常相似的性质,不妨亦称之为特征基函数。需要说明的是,上述曲线是在假设长、短波红外探测器都是理想的带通滤波器的条件下得到的,实际的红外探测器都有其各自不同的光谱响应函数 $R(\lambda)$ ,实测的特征基函数可能与理想的特征基函数略有差异,但曲线的大致形状应该是相同的。

## 2.2 点目标特征提取与识别

基于特征基函数 $f_1(T)$ ,我们依照如下方式确定了点目标特征矢量:

设在同一观测点,同一时间 $t$ ,对同一空间目标的探测强度,长波为 $E_l(t)$ ,短波为 $E_s(t)$ ,则其特征基函数值为:

$$f_1(T, t) = \frac{E_l(t)}{E_s(t)} \quad (7)$$

$f_1(T, t)$ 反映了空间目标在观测点所在方向的表面等效温度。

定义时间稳定性描述子 $F_1(t)$ 为

$$F_1(t) = \left[ \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t}^t (f_1(T, t) - \bar{f}_1)^2 dt \right]^{1/2} \quad (8)$$

其中:

$$\bar{f}_1 = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t}^t f_1(T, t) dt \quad (9)$$

$F_1(t)$ 体现了空间目标表面温度的时间稳定性,可以作为第一个特征量。

为了反映目标表面温度的空间分布均匀性,在 $N$ 个不同的位置 $P_i, i=1, 2, \dots, N$ ,各放置一组长、短波探测器 $\text{detector}_i (LW/SW)$ ,从 $N$ 个不同的方向观测目标,设在同一时间 $t$ , $N$ 组探测器所测得的特征基函数值分别为 $f^i(T, t), i=1, 2, \dots, N$ ,定义空间均匀性描述子 $F_2(t)$ 为

$$F_2(t) = \left[ \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (f^i(T, t) - \bar{f})^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

其中:

$$\bar{f} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N f^i(T, t) \quad (11)$$

$F_2(t)$  体现了空间目标表面温度的空间均匀稳定性, 可以作为第二个特征量。

$N$  组探测器在同一时刻可得到 1 个空间均匀性描述子和  $N$  个时间稳定性描述子, 从而形成  $N+1$  维特征矢量。

据目标表面温度场的时间稳定性和空间均匀性, 目标的特征矢量  $F_T$  和诱饵的特征矢量必满足:

$$F_T < F_D \quad (12)$$

由此可判定目标和诱饵。

### 3 点目标仿真实验结果

在本节的仿真实验中, 我们取  $N=3$ , 这样, 在每次观测中, 共有四个特征分量: 空间特征分量  $F_2$  和三个观测点的时间特征分量  $F_1^{(1)}$ 、 $F_1^{(2)}$ 、 $F_1^{(3)}$ , 它们构成了识别目标和诱饵的四维特征矢量  $F(F_2, F_1^{(1)}, F_1^{(2)}, F_1^{(3)})$ 。

表 1 和表 2 给出了一组典型目标和诱饵的特征矢量数据, 诱饵和目标相伴飞行, 它们的轨道经过了太阳照射区和地球阴影区, 从而保证实验数据涵括较大的范围。利用本文提取的四维特征矢量, 对这组实验数据进行仿真计算和识别, 达到了 100% 的识别率。

当目标和诱饵表面材料的内、外表面辐射率(或反射率)、比热等热物理参数及诱饵几何尺寸在合理的范围内变化, 在不考虑噪声影响时, 大量仿真实验表明该特征矢量对目标和诱饵均有很好的区分度。

表 1 目标的特征矢量计算结果

时间	$F$				
	$F_1^{(1)}$	$F_1^{(2)}$	$F_1^{(3)}$	$F_2$	$F$
263. 3000	0. 0168	0. 0169	0. 0171	0. 0003	0. 0294
273. 3000	0. 0141	0. 0148	0. 0139	0. 0026	0. 0248
278. 3000	0. 0147	0. 0164	0. 0144	0. 0033	0. 0265
283. 3000	0. 0244	0. 0192	0. 0213	0. 0070	0. 0383
288. 3000	0. 0253	0. 0212	0. 0232	0. 0008	0. 0403
293. 3000	0. 0280	0. 0235	0. 0266	0. 0021	0. 0453
298. 3000	0. 0285	0. 0244	0. 0267	0. 0014	0. 0460
303. 3000	0. 0229	0. 0221	0. 0258	0. 0055	0. 0413
308. 3000	0. 0153	0. 0171	0. 0177	0. 0031	0. 0292
313. 3000	0. 0190	0. 0214	0. 0227	0. 0060	0. 0370
318. 3000	0. 0157	0. 0214	0. 0170	0. 0122	0. 0338
323. 3000	0. 0142	0. 0187	0. 0178	0. 0121	0. 0319
328. 3000	0. 0436	0. 0182	0. 0412	0. 0418	0. 0753
333. 3000	0. 0495	0. 0260	0. 0493	0. 0041	0. 0747
338. 3000	0. 0587	0. 0382	0. 0580	0. 0014	0. 0910
343. 3000	0. 0696	0. 0482	0. 0691	0. 0019	0. 1093
348. 3000	0. 0792	0. 0539	0. 0800	0. 0007	0. 1248
353. 3000	0. 0880	0. 0616	0. 0857	0. 0028	0. 1375
363. 3000	0. 0449	0. 0441	0. 0446	0. 0011	0. 0771
373. 3000	0. 0392	0. 0378	0. 0399	0. 0050	0. 0677

表2 诱饵特征矢量计算结果

时间	$F$				
	$F_1^{(1)}$	$F_1^{(2)}$	$F_1^{(3)}$	$F_2$	$F$
263. 3000	0. 5270	0. 4019	0. 5346	0. 1365	0. 8623
273. 3000	0. 5881	0. 3445	0. 5296	0. 1059	0. 8696
278. 3000	0. 4606	0. 2594	0. 4156	0. 0663	0. 6757
283. 3000	0. 4494	0. 3299	0. 3859	0. 7899	1. 0410
288. 3000	0. 4244	0. 3859	0. 4446	0. 6701	0. 9878
293. 3000	0. 4581	0. 3217	0. 4234	0. 3994	0. 8076
298. 3000	0. 4390	0. 2253	0. 3627	0. 5728	0. 8385
303. 3000	0. 5104	0. 1519	0. 3130	0. 9388	1. 1238
308. 3000	0. 4313	0. 1689	0. 3108	0. 3956	0. 6838
313. 3000	0. 7752	0. 2338	0. 6332	0. 9951	1. 4307
318. 3000	0. 9418	2. 2981	0. 7394	3. 3892	4. 2663
323. 3000	1. 0291	3. 1298	0. 7842	3. 1218	4. 6060
328. 3000	1. 4464	3. 4022	1. 2215	2. 1971	4. 4706
333. 3000	2. 7539	3. 7053	2. 0027	1. 9261	5. 3883
338. 3000	3. 5460	3. 3214	2. 6832	1. 2480	5. 6889
343. 3000	4. 3411	2. 5232	3. 8610	0. 9458	6. 4042
348. 3000	4. 1298	2. 7149	4. 0998	0. 9051	6. 4849
353. 3000	4. 2271	3. 2493	4. 1879	0. 7376	6. 8197
363. 3000	4. 0997	3. 7178	3. 9388	0. 7223	6. 8312
373. 3000	4. 6229	4. 5201	4. 5173	0. 7396	7. 9218

## 参考文献

- 1 徐晖. 空间点目标红外和可见光特性及其应用研究:[博士学位论文]. 长沙:国防科技大学电子技术系, 1994
- 2 王慧频. 大气层外目标和诱饵的红外辐射特性及其识别方法研究:[博士学位论文]. 长沙:国防科技大学电子技术系, 1996
- 3 陈衡. 红外物理学. 北京:国防工业出版社, 1985