

文章编号 : 1003-501X(2006)09-0023-04

战术弹道导弹再入段红外辐射特性分析

曹西征^{1,2}, 郭立红¹, 杨丽梅^{1,2}

(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)

摘要 : 为了有效地获取再入段导弹的红外辐射特性, 对其测量方法进行了研究。将不同时刻的目标距离和测量角作为已知量, 利用非线性回归的方法估算目标运动参数, 根据大气在高度 85km 以内的温度分布规律来估算由于气动加热后的目标蒙皮温度, 进而分析迎头方向上的红外辐射特性。分析结果表明, 反导系统红外探测器在再入飞行段的最佳工作波段是短波和中波。

关键词 : 红外辐射; 战术弹道导弹; 测量角; 非线性回归

中图分类号 : TN219

文献标识码 : A

Infrared radiation characteristics analysis of the tactical ballistic missile in the reentry

CAO Xi-zheng^{1,2}, GUO Li-hong¹, YANG Li-mei^{1,2}

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

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

Abstract : An effective method for measuring infrared radiation of the tactical ballistic missile(TBM) in the reentry is presented. By regarding the range and the measurement angle of the target as the known quantity, according to the regularities of the temperature distribution of atmosphere within 85 kilometers in height, by estimating the motion parameters of the target using non-linear regression, the envelope temperature of the target by aerodynamic heating is obtained, and the infrared radiation characteristics of the target in the head-on direction is analyzed. The analysis results demonstrate that the infrared detector of the anti-missile system in the reentry can work well on short wave and medium wave.

Key words : Infrared radiation; Tactical ballistic missile; Measurement angle; Nonlinear regression

引 言

战术弹道导弹(TBM)突防能力强、威力大、精度高、机动性好、生存能力强。对于弹道导弹的红外辐射特性, 国内外均有人进行大量的理论或实测研究, 但往往因为测量手段和参数的引用的不同, 导致对于相近的目标, 红外辐射强度的估计结果相差很大。

事实上, 对于采用直接碰撞的动能拦截武器进行反导, 最关心的还是导弹头锥迎头方向的红外辐射特性^[1], 为此, 本文通过对弹道导弹的红外辐射和运动轨迹进行参数化建模, 利用非线性回归模型估计方法来估算目标的运动参数和导弹迎头方向上的红外辐射强度。

1 红外辐射模型

从弹头再入大气层到弹头落地的这一段弹道称为“再入段”^[2]。重新进入大气层之后,弹头受空气阻力的影响,速度急剧下降。在再入段,弹头是在稠密的大气层内高速飞行。

1.1 气动加热模型

再入飞行段,弹道导弹的红外辐射主要源于导弹蒙皮。弹道导弹高速再入稠密大气层的过程中,由于剧烈的气动加热效应,蒙皮温度会上升到几千度^[3]。

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]

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

式中 T 为目标蒙皮驻点温度, T_a 为周围大气的温度, k 为恢复系数(本文取 0.82), γ 为空气的定压热容量和定容热容量之比(取 1.3), M_a 为马赫数。代入数值得: $T = T_a(1 + 0.123M_a^2)$ 。

1.2 大气温度模型

在 85 ~ 0km 的高度范围,大气温度可用七个连续的线性方程来描述^[4],形式为

$$T_a = T_b + L_b(H_b - H) \quad (2)$$

式中 T_b 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 ~ 0km 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 ~ 0km 内温度梯度变化和层面温度

Table 1 Temperature gradient and bedding surface temperature within 85 kilometers

Height/km	Temperature gradient/(K/km)	Bedding surface height/km	Bedding surface temperature/K
		85	190
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 运动模型

由文献[2]中图 1~图 6,再入段弹道导弹的运动可假定为匀减速运动,所以目标到探测器的水平距离和竖直高度可近似表示为

$$x(t) = x_0 - (v_{0x}t - 0.5a_x t^2), \quad y(t) = y_0 - (v_{0y}t - 0.5a_y t^2)$$

式中 x_0 和 y_0 分别为初始水平距离和高度, t 为时间, v_{0x} 和 v_{0y} 分别为水平初速度和竖直初速度, a_x 和 a_y 分别为水平加速度的绝对值和竖直加速度的绝对值。

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}, \quad v_0 = \sqrt{v_{0x}^2 + v_{0y}^2}$$

所以 T 可表示为

$$T = \{T_b + L_b[H_b - y(t)]\} \{1 + 1.064[(v_{0x} - a_x t)^2 + (v_{0y} - a_y t)^2]\} \quad (3)$$

1.4 辐射强度模型

由普朗克公式

$$M(\lambda, T) = C_1 / [\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)]$$

得

$$M_{\lambda_1 \sim \lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda, T) d\lambda = f \sigma T^4$$

式中 f 为温度为 T 的绝对黑体在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段范围内辐射出射度与全波段总辐射出射度的比例, $f = [z(x_2) - z(x_1)]$, 式中 $x_1 = \lambda_1 / \lambda_m$, $x_2 = \lambda_2 / \lambda_m$, $\lambda_m = 2898/T$ 。通过查阅黑体函数表,可获取 $z(x_1)$ 和 $z(x_2)$ 的值。于是,波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内辐射强度可表示为

$$J_{\lambda} = LS = \varepsilon M_{\lambda_1-\lambda_2} S / \pi = \varepsilon [z(x_2) - z(x_1)] \sigma T^4 S / \pi$$

$$= \varepsilon [z(x_2) - z(x_1)] \sigma S / \pi \cdot \{T_b + L_b [H_b - y(t)]\}^4 \{1 + 1.064[(v_{0x} - a_x t)^2 + (v_{0y} - a_y t)^2]\}^4$$

式中 S 为导弹迎头截面积(本文在计算中取 0.25m^2)， ε 为发射率(取 0.75)。

1.5 多元参数的非线性回归模型

目标到探测器的距离可近似表示为

$$R(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} = \sqrt{[x_0 - (v_{0x}t - 0.5a_x t^2)]^2 + [y_0 - (v_{0y}t - 0.5a_y t^2)]^2}$$

目标角度的测量值为

$$\theta(t) = \arctan[y(t)/x(t)] = \arctan[y_0 - (v_{0y}t - 0.5a_y t^2)]/[x_0 - (v_{0x}t - 0.5a_x t^2)]$$

联立测量值 $R(t)$ 和 $\theta(t)$ ，可以得到：

$$\begin{cases} R(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} = f_1(t; a_x, a_y, v_{0x}, v_{0y}, x_0, y_0) \\ \theta(t) = \arctan[y(t)/x(t)] = f_2(t; a_x, a_y, v_{0x}, v_{0y}, x_0, y_0) \end{cases} \quad (5)$$

由(5)式可知，此非线性模型共有 6 个参数，理论上需要至少 3 个时刻的测量值，才能估算参数 a_x ， a_y ， v_{0x} ， v_{0y} ， x_0 ， y_0 ，从而得到目标温度。考虑到实际测量存在噪声的情况，本文利用多点的测量数据来求解目标参数。建立非线性回归模型

$$Y = f(t, \beta) + \varepsilon$$

式中 $f(t, \beta) = [f_1(t; \beta), f_2(t; \beta), f_1(t_2; \beta), f_2(t_2; \beta), \dots, f_1(t_n; \beta), f_2(t_n; \beta)]^T$ 为模型函数， t 为测量时间；

$Y = [R(t_1), \theta(t_1), R(t_2), \theta(t_2), \dots, R(t_n), \theta(t_n)]^T$ 为测量数据；

$\beta = [a_x, a_y, v_{0x}, v_{0y}, x_0, y_0]^T$ 为未知参数向量；

$\varepsilon = [\varepsilon_{R(t_1)}, \varepsilon_{\theta(t_1)}, \varepsilon_{R(t_2)}, \varepsilon_{\theta(t_2)}, \dots, \varepsilon_{R(t_n)}, \varepsilon_{\theta(t_n)}]$ 为测量随机误差。

根据文献[5]，利用 Gauss-Newton 算法可以估算参数 β ，记残差平方和为

$$S(\beta) = \varepsilon^T \varepsilon = [Y - f(t, \beta)]^T [Y - f(t, \beta)]，Z(\beta) = \partial f(t, \beta) / \partial \beta_i，(i = 1, 2, \dots, 6)，$$

$Z(\beta)$ 为 $2j \times 6$ 的矩阵， j 为测量次数。则迭代公式为

$$\beta_{n+1} = \beta_n + [Z(\beta_n)^T Z(\beta_n)]^{-1} Z(\beta_n)^T [Y - f(\beta_n)] \quad (6)$$

$Z(\beta) = [Z(t_1, \beta), Z(t_2, \beta), \dots, Z(t_n, \beta)]^T$ ，给定初值 β_1 ，可根据迭代公式求得参数值。

通过求导计算，得到 $Z(\beta)$ 的矩阵表示形式为

$$Z^T(t, \beta) = \begin{bmatrix} \partial f_1(t, \beta) / \partial a_x & \partial f_2(t, \beta) / \partial a_x \\ \partial f_1(t, \beta) / \partial a_y & \partial f_2(t, \beta) / \partial a_y \\ \partial f_1(t, \beta) / \partial v_{0x} & \partial f_2(t, \beta) / \partial v_{0x} \\ \partial f_1(t, \beta) / \partial v_{0y} & \partial f_2(t, \beta) / \partial v_{0y} \\ \partial f_1(t, \beta) / \partial x_0 & \partial f_2(t, \beta) / \partial x_0 \\ \partial f_1(t, \beta) / \partial y_0 & \partial f_2(t, \beta) / \partial y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(t)t^2 / [2\sqrt{x^2(t) + y^2(t)}] & -0.5y(t)t^2 / [x^2(t) + y^2(t)] \\ y(t)t^2 / [2\sqrt{x^2(t) + y^2(t)}] & 0.5x(t)t^2 / [x^2(t) + y^2(t)] \\ -x(t)t / \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} & y(t)t / [x^2(t) + y^2(t)] \\ -y(t)t / \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} & -x(t)t / [x^2(t) + y^2(t)] \\ x(t) / \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} & -y(t) / [x^2(t) + y^2(t)] \\ y(t) / \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} & x(t) / [x^2(t) + y^2(t)] \end{bmatrix}$$

2 仿真实验

先仿真产生测量数据(加入 1% 随机误差)如表 2 (以取 4 个测量点为例)。在上述模型中，初值的选取对估算结果的影响不大。表 3 是测量点数对估算结果的影响，根据估算的结果求得的目标运动参数和辐射参数如表 4。由表 4 可以看出，反导系统红外探测器在再入飞行段的最佳工作波段是短波和中波。

本文的计算是在 Visual C++ 6.0 和 Matlab 6.5 下进行的。

表2 仿真测量数据

Table 2 Emulation measurement data

Time/s	5	15	25	45
Distance/km	100.456	77.1594	52.6148	7.3451
Angle/rad	0.83512	0.83226	0.82997	0.79475

表3 测量点数和对应的误差

Table 3 Measurement times and corresponding errors

		$a_x/(km/s^2)$	$a_y/(km/s^2)$	$v_{0x}/(km/s)$	$v_{0y}/(km/s)$	x_0/km	y_0/km
True values No.1		0.008	0.01	1.8	2	78	85
Measurement times	3	11.21%	14.97%	9.85%	10.75%	8.13%	7.65%
	6	8.84%	9.05%	7.34%	8.02%	6.16%	5.81%
	10	4.78%	5.13%	4.39%	4.73%	3.69%	3.46%
True values No.2		0.01	0.012	2.0	1.8	75	80
Measurement times	4	11.26%	13.69	9.65%	9.92%	8.01%	7.43%
	8	7.96%	8.84%	7.03%	7.85%	5.97%	5.29%
	12	3.69%	4.53%	3.47%	3.91%	3.28%	3.12%

表4 目标运动参数和辐射参数

Table 4 Motion parameters and radiation parameters of target

Time/s	1	10	20	40	45
Velocity/ (km/s)	2.678	2.563	2.4351	2.1795	2.1157
Height/km	83.005	65.5	47.0	13	5.125
Distance/km	112.68	89.098	64.109	17.9655	7.2302
Bedding surface temperature/K	190	218	274	220	220
Temperature gradient/ (K/km)	2.0	2.8	0	0	6.5
Bedding surface height/km	85	71	51	20	11
Section temperature/K	1674.2	1864.58	2002.69	1331.97	1487.82
Head on radiation intensity /(W/sr)	1 ~ 3μm	16894.86	28634.23	40176.5	5091.78
	3 ~ 5μm	6237.55	8099.33	9581.38	3291.57
	8 ~ 14μm	951.852	1063.56	1306.65	585.874

3 结 论

本文是通过建立多个数学模型，根据多个测量值，利用非线性回归的方法获得目标的运动参数，推出目标的辐射参数。本估算结果可为反导系统红外探测器最佳工作波段的选择提供一定的参考数据。

但是，目标在水平方向和竖直方向作匀减速运动的假设在很大程度上的存在局限性，实际上目标的运动由于受末端制导的影响，并非匀减速运动。因此，在实际应用时，可以将运动轨迹进行分段讨论，在每段运动轨迹作一些匀速或者匀减速的假设。

参考文献：

[1] 朱振福, 黄培康. 战术弹道导弹红外辐射特性与反导最佳波段选择[J]. 系统工程与电子技术, 1996, (1): 9-12.
ZHU Zhen-fu, HUANG Pei-kang. TBM IR Radiant Signature and the Selection of the Best Operation Waveband for Anti-Missile[J]. **System Engineering and Electron Technology**, 1996, (1): 9-12.

[2] 北京宇航学会丛书编委会. 威力强大的弹道导弹[M]. 天津: 南开大学出版社, 2002. 12-24.
Member of an editorial board of Series of Beijing space navigation academy. **Mighty Ballistic Missile**[M]. Tianjin: Nankai University, 2002. 12-24.

[3] 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.
YANG Hua, LING Yong-shun, CHEN Chang-ming, et al. An Annlysis on IR Detecting and Tracking and Identifying Techniques of USA Ballistic Missile Defense Systems[J]. **Infrared Technology**, 2001, 23(4): 1-4.

[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. 119-129.
ZHANG Jian-qi, FANG Xiao-ping. **Infrared Physics**[M]. Xian: Xian Electron Science and Technology University Press, 2004. 119-129.

[5] 王正明, 易东云. 测量数据建模与参数估计[M]. 长沙: 国防科技大学版社, 1996. 167-169.
WANG Zheng-ming, YI Dong-yun. **Model and Parameters Estimation On Measured Data**[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1996. 167-169.