

· 仿真与评估 ·

空中目标红外辐射特性建模与测量误差分析

雷 萍^{1,2}, 马 娜², 曲卫东², 薛 挺²

(1. 军械工程学院, 河北 石家庄 050003; 2. 63880 部队, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 为了证实一种空中目标红外辐射特性测量方法的有效性, 首先利用中波和长波宽波段红外探测器的相关知识对空中目标红外辐射特性进行了建模, 并用最优化理论中较成熟算法进行了求解. 其次通过理想试验数值模拟结果与野外试验数据处理结果证实了该模型和方法具有很高的精度, 最后结合野外试验现象以及数据处理结果, 分析了空中目标辐射特性测量误差的来源以及减小其误差的方法.

关键词: 空中目标; 红外辐射特性; 最优化; 误差分析

中图分类号: O434.32

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2009)05-0073-04

Modeling and Measure Error Analysis for IR Radiation Peculiarity of Aerial Target

LEI Ping^{1,2}, MA Na², QU Wei-dong², XUE Ting²

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. 63880 Army Unit, Luoyang 471003, China)

Abstract: To prove the efficiency of the method to measure IR radiation peculiarity of aerial target, the modeling for the IR radiation peculiarity of aerial target was built with the knowledge about the wide band IR detector in medium and long wave, the mature arithmetic is calculated on the basis of optimization theory. The modeling and arithmetic were proved very precise by the results of the ideal experiment values simulation and field test data processing. Lastly, combining field experimental phenomena and processed data, the origin of measure error of radiation peculiarity for aerial target and the method to reduce the error were analyzed.

Key words: aerial target; IR radiation peculiarity; optimization; error analysis

1 模型与方法

设在地面用中波和长波红外探测器同时对空中温度为 T 和发射率为 ϵ 的目标进行测量^[1], 则探测器与之相应的像元接收到的辐射照度分别为

$$E_m(T, \epsilon) = \beta_1^m \beta_2^m \int_{\lambda_1^m}^{\lambda_2^m} R_m(\lambda) [\epsilon \alpha_m(\lambda) L_b(\lambda, T) + L_p^m(\lambda) + L_r^m(\lambda)] d\lambda$$
$$E_l(T, \epsilon) = \beta_1^l \beta_2^l \int_{\lambda_1^l}^{\lambda_2^l} R_l(\lambda) [\epsilon \alpha_l(\lambda) L_b(\lambda, T) + L_p^l(\lambda) + L_r^l(\lambda)] d\lambda \quad (1)$$

式中, β_1^m 、 β_2^m 分别为中波红外探测器单个像元在 2 个垂直方向的视场角; β_1^l 、 β_2^l 分别为长波红外探测器单个像元在 2 个垂直方向的视场角; λ_1^m 、 λ_2^m 分别为中波红外探测器测量波段的下、上限; λ_1^l 、 λ_2^l 分别为长波红外探测器测量波段的下、上限; $R_m(\lambda)$ 、 $R_l(\lambda)$ 分别为中波和长波红外探测器的相对光谱响应率; $\alpha_m(\lambda)$ 、 $\alpha_l(\lambda)$ 分别为空中目标至探测器的路径上的中波和长波红外大气光谱透过率; $L_p^m(\lambda)$ 、 $L_p^l(\lambda)$ 分别为空中目标至探测器的路径上的中波和长波红外背景光谱辐射亮度; $L_r^m(\lambda)$ 、 $L_r^l(\lambda)$ 分别为空中目标反射至探测器的来自背景的中波和长波红外光谱辐射亮度; $L_b(\lambda, T)$ 为黑体的光谱辐射亮

收稿日期: 2009-07-27

作者简介: 雷萍(1978-), 女, 陕西人, 工程师, 主要从事系统总体设计、光学测试与评估方面的研究工作.

度,其中 c_1 、 c_2 为第一、第二辐射常数.

$$L_b(\lambda, T) = \frac{c_1}{\pi\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (2)$$

利用近似公式^[2]

$$\partial L_b(\lambda, T)/\partial T \cong \frac{c_2}{\lambda T^2} L_b(\lambda, T) \quad (3)$$

可以得到

$$\partial E_m(T, \epsilon)/\partial T = \frac{c_2 \epsilon \beta_1^m \beta_2^m}{T^2} \int_{\lambda_1^m}^{\lambda_2^m} \frac{\alpha_m(\lambda) R_m(\lambda) L_b(\lambda, T)}{\lambda} d\lambda$$

$$\partial E_m(T, \epsilon)/\partial \epsilon = \beta_1^m \beta_2^m \int_{\lambda_1^m}^{\lambda_2^m} \alpha_m(\lambda) R_m(\lambda) \cdot L_b(\lambda, T) d\lambda$$

$$\partial E_l(T, \epsilon)/\partial T = \frac{c_2 \epsilon \beta_1^l \beta_2^l}{T^2} \int_{\lambda_1^l}^{\lambda_2^l} \frac{\alpha_l(\lambda) R_l(\lambda) L_b(\lambda, T)}{\lambda} d\lambda \quad (4)$$

$$\partial E_l(T, \epsilon)/\partial \epsilon = \beta_1^l \beta_2^l \int_{\lambda_1^l}^{\lambda_2^l} \alpha_l(\lambda) R_l(\lambda) L_b(\lambda, T) d\lambda$$

设中波、长波红外探测器与目标对应的单个像元测得的辐射照度分别为 \bar{E}_m 和 \bar{E}_l , 则空中目标温度和发射率的反演转化^[4]为求解下面有约束的方程组

$$\begin{aligned} r_m(T, \epsilon) &\equiv E_m(T, \epsilon) - \bar{E}_m = 0 \\ r_l(T, \epsilon) &\equiv E_l(T, \epsilon) - \bar{E}_l = 0 \\ T > 0, 0 &\leq \epsilon \leq 1 \end{aligned} \quad (5)$$

或与之等价的

$$\begin{aligned} \bar{r}_m(T, \epsilon) &\equiv E_m(T, \epsilon)/\bar{E}_m - 1 = 0 \\ \bar{r}_l(T, \epsilon) &\equiv E_l(T, \epsilon)/\bar{E}_l - 1 = 0 \\ T > 0, 0 &\leq \epsilon \leq 1 \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $E_m(T, \epsilon)$ 和 $E_l(T, \epsilon)$ 见式(1). 将式(5)转化为式(6)是为得到 T 和 ϵ 的无量纲函数 $\bar{r}_m(T, \epsilon)$ 和 $\bar{r}_l(T, \epsilon)$, 这有利于数学处理. 构造向量函数

$$r(T, \epsilon) = (\bar{r}_m(T, \epsilon) \bar{r}_l(T, \epsilon))' \quad (7)$$

则解方程组(6)可转化为求解如下带约束的最优化问题

$$\begin{aligned} \min f(T, \epsilon) &= r'(T, \epsilon) r(T, \epsilon) / 2 \\ T > 0, 0 &\leq \epsilon \leq 1 \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)可用 MATLAB 最优化工具箱中的函数 lsqnonlin 求解. 虽然本问题的变量个数是 2, 但由于

有约束条件, 应选择大规模算法^[3]. 至于停止迭代的条件, 由于这里处理的是无量纲函数 $r(T, \epsilon)$ 和 $f(T, \epsilon)$, 可采用函数 lsqnonlin 默认的条件. 另外, 为使求解更节省时间, 应提供向量函数 $r(T, \epsilon)$ 的雅可比矩阵. 当变量个数较多时, 提供雅可比矩阵尤为重要. 由式(4)、式(6)和式(7), 容易得到函数 $r(T, \epsilon)$ 的雅可比矩阵为

$$J_r(T, \epsilon) = \begin{bmatrix} \frac{\partial E_m(T, \epsilon)/\partial T}{\bar{E}_m} & \frac{\partial E_m(T, \epsilon)/\partial \epsilon}{\bar{E}_m} \\ \frac{\partial E_l(T, \epsilon)/\partial T}{\bar{E}_l} & \frac{\partial E_l(T, \epsilon)/\partial \epsilon}{\bar{E}_l} \end{bmatrix} \quad (9)$$

2 数值模拟

借助数值模拟的方法检验该模型和方法的有效性. 考虑在标准大气条件下, 海拔 0 km 至空中 3 km、天顶角为 60 ° 的一条辐射传输路径. 在该路径海拔 0 km 处布设中波、长波红外探测器各一台, 在该路径海拔 3 km 处布设一个温度为 T 、发射率为 ϵ 的均匀靶板. 为便于处理且不失实际意义, 这里采用如图 1 所示的红外探测器相对响应曲线, 并根据理想试验的条件用 LOWTRAN 计算上述辐射传输路径上背景光谱辐射和光谱透过率, 但不考虑红外探测器的定标和噪声. 即首先根据式(1)算得 \bar{E}_s^m 和 \bar{E}_s^l , 然后求解式(8)得到温度 T 和发射率 ϵ . 这种理想化的处理略去了各种人为控制的因素, 能更有效和准确地检验文中的模型和方法.

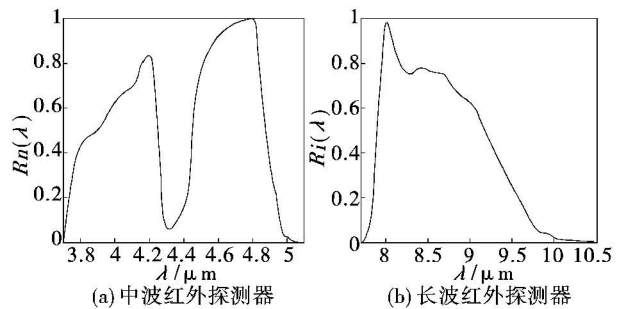


图 1 红外探测器的相对光谱响应率

表 1 给出了数值模拟的结果, 其数据部分是函数 lsqnonlin 输出的结果, 迭代的初值均为 $T = 300$ K、 $\epsilon = 1/2$. 显然, 反演的精度是很高的, 尤其是发射率. 事实上, $r(T, \epsilon)$ 是 T 的非线性函数、 ϵ 的线性函数,

所以发射率反演的精度很高,而温度反演的精度稍次.但这样的温度反演精度对试验也已经足够了.

表 1 数值模拟的结果

T/K	ε		
	0.3	0.6	0.9
300	300.000 0	300.000 1	300.000 5
	0.300 0	0.600 0	0.900 0
400	400.000 0	400.000 0	400.000 0
	0.300 0	0.600 0	0.900 0
500	499.999 6	500.000 0	500.000 0
	0.300 0	0.600 0	0.900 0

3 试验误差分析

在试验时以飞机为对象目标进行了中波、长波红外图像的拍摄,所用红外探测器的相对光谱响应曲线如图 1.受试验条件限制,没能获得完全同时拍摄的中波和长波红外图像.具体误差分析如下.

3.1 像素选取不准确导致的误差

在长波和中波红外图像中分别选取恰当的像素,使其对应于飞机的相同部位(如发动机),利用红外探测器的定标曲线得到其接收到的中波和长波红外辐射照度,然后通过求解最优化问题式(8),得到飞机该部位的温度和发射率.从上述计算过程可知,在长波和中波红外图像中选取与飞机同一部位对应的像素是准确求解的关键.

试验时中波、长波红外探测器的定标曲线分别为

$$\bar{E}_s^m = k_m P_m + b_m, k_m = 7.761 7 \times 10^{12} \text{ W/m}^2,$$

$$b_m = 2.286 7 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2;$$

$$\bar{E}_s^l = k_l P_l + b_l, k_l = 3.124 6 \times 10^{-10} \text{ W/m}^2, b_l =$$

$$2.760 7 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2; \quad (10)$$

式中, P_m 、 P_l 分别为中波、长波红外探测器的量化输出值,即图像的像素值.

试验时,选取飞机表面一个 $T = 550 \text{ K}$ 、 $\epsilon = 4/5$ 的部位,且在中波、长波红外图像中至少可占据一个像素,这相当于飞机的发动机等高温部位.利用式(1)和式(10),得到 $P_m = 60 856$, $P_l = 12 924$.先在中波红外图像上准确地确定该部位,而在长波红外图像上确定该部位时由于人为因素出现了偏差,表 2 给出了这种情况下反演的结果;相反,先在长波红外成像上准确地确定该部位,所得结果列于表 3 中.另外,选取飞机表面一个 $T = 350 \text{ K}$ 、 $\epsilon = 1/5$ 的部位,且在中波、长波红外图像中至少可占据一个像素.这相当于飞机的蒙皮等中、低温部位.利用式(1)和式(10),得到 $P_m = 4 392$, $P_l = 9 209$.通过类似的办法得到的结果分别列在表 4 和表 5 中.

分析这 4 个表中的结果可以发现,在像素值有相同偏差的条件下,长波红外图像上像素选取的不准确性会导致更大的误差;对中、低温部位,这种趋势更明显.这启示着在红外特性测量中首先在长波红外图像上选定测试部位,然后在中波红外图像上尽量选取与之对应的像素.

表 2 $P_m = 60 856$ 而 P_l 值有偏差情况下的反演结果

P_l	12 900	12 915	12 925	12 935	12 950
T/K	551.231 0	550.472 5	549.969 3	549.468 5	548.721 7
ε	0.789 3	0.795 9	0.800 3	0.804 7	0.811 3

表 3 $P_l = 12 924$ 而 P_m 值有偏差情况下的反演结果

P_m	60 830	60 845	60 855	60 865	60 880
T/K	549.917 9	549.981 5	550.015 9	550.050 1	550.101 3
ε	0.800 3	0.800 0	0.799 9	0.799 7	0.799 5

表 4 $P_m = 4 392$ 而 P_l 值有偏差情况下的反演结果

P_l	9 185	9 200	9 210	9 220	9 235
T/K	362.793 4	354.378 4	349.389 9	344.814 6	338.606 0
ε	0.144 8	0.178 7	0.203 4	0.229 8	0.272 6

表 5 $P_l=9\ 209$ 而 P_m 值有偏差情况下的反演结果

P_m	4 365	4 380	4 390	4 400	4 415
T/K	345.348 5	347.877 9	349.539 2	351.181 1	353.609 0
ϵ	0.213 9	0.206 5	0.201 8	0.197 3	0.191 0

3.2 探测器噪声导致的误差

这里试图反演拍摄图像中飞机中心轴线和沿两翼轴线上的温度和发射率.其中,飞机中心轴线主要经过机尾、机腹和机头部位的蒙皮,两翼轴线主要经过机翼的蒙皮和螺旋桨的发动机.探测器本身的噪声对图像的质量是有影响的,长波红外探测器噪声的影响尤为严重.

反演的结果与机翼蒙皮和螺旋桨发动机处的温度和发射率的理想值基本一致.其中,采用小波变换的方法对原始图像进行消噪处理后,使得温度和发射率分布更光滑,这与理想值更加接近.但在机翼两端、飞机头部等部分反演所得到的温度和发射率分布与实际情况有一定误差.事实证明,探测器噪声对反演结果的影响是很难消除的.当然,经过噪声处理后,这个因素对反演结果的影响会小很多.

3.3 其他误差

LOWTRAN 的计算误差.处理试验数据时要通过 LOWTRAN 计算辐射传输路径上的背景辐射和光谱透过率.计算时选用的大气模式是中纬度冬季,这与试验时的大气条件不可能完全一致,计算得到的背景辐射和光谱透过率与真实值有一定差异.这方面的差异最终会影响反演结果的精度.要减小这方面的误差,需要对试验进行时试验区域的相关大气光学参数,特别是大气气溶胶参数进行实时测量,并据此计算辐射传输路径上的背景光谱辐射和大气光谱透过率.

探测器空间分辨率的影响.由于红外成像探测器的空间分辨率是有限的,所得图像的一个像素对

应于目标表面有一定面积的部分.如果该部分红外特性是均匀的(即温度和发射率变化很小),那么反演结果将有很高的精度.如果该部分恰是飞机红外特性差异较大部位的连接处,与之对应的将是混合像素,反演的结果是某种平均意义下的温度和发射率,与真实值会有一定差异.要减小这方面的误差,尽量选用空间分辨率高的红外成像探测器.

另外,辐射定标的误差和 2 个波段红外图像拍摄时间的非绝对同时性也会影响反演结果的精度.

4 结 论

由空中目标红外辐射特性模型出发,采用最优化理论中较有效的算法进行求解,重点通过数值模拟和外场试验数据的处理结果来证实该方法具有很高的精度,进而结合试验从多个方面对结果误差的来源进行分析,并提出合理可行的减少误差的方法.对空中目标红外辐射特性测量具有一定的参考价值.

参考文献

(上接第 39 页)

面,提出了具体的方法并在实际中得到了验证.

参考文献

[1] 赵新民,王祁.智能仪器设计基础[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2005:56-57.

[1] 童庆喜,张兵,郑兰芬.高光谱遥感原理、技术与应用[M].北京:高等教育出版社,2006:67-68.
 [2] 张幼文.红外光学工程[M].上海:上海科学技术出版社,1982:258-269.
 [3] T F Coleman, Y Li. An interior trust region approach for nonlinear minimization subject to bounds[J]. SIAM J Optim, 1996, 6(2): 418-445.
 [4] 王彦飞.反演问题的计算方法及其应用[M].北京:高等教育出版社,2007:297-300.
 [5] 常新杰,张科,李言俊,等.飞机红外辐射特性计算研究[J].航空兵器,1998(4):2-4.

[2] 刘迎春,叶湘滨.传感器原理设计及应用[M].北京:国防科技大学出版社,2004:75-80.
 [3] 梁立凯.电阻应变片测量中温度为误差的补偿方法[J].呼伦贝尔学院学报,2001(3):23.
 [4] 孙宇宁.应变式测力传感器的非线性误差及其校正[J].传感器技术,2006(4):30.