

不同气象条件下飞机红外辐射等效折算

樊宏杰, 陈前荣, 杨淼淼, 刘连伟, 许振领, 王 敏

(中国人民解放军 63892 部队, 河南 洛阳 471003)

摘要: 阐述了红外侦察告警设备作用距离等效折算的重要性及常见方法, 推导了不同气象条件下基于飞机目标表观辐射亮度、目标背景表观辐射亮度差的红外辐射等效折算公式, 并对其中的假设近似进行了修正计算。通过折算表明: 折算后的图像与参考实测图像从灰度分布与变化趋势一致性上符合较好, 证明了提出的红外辐射等效折算方法的合理性。

关键词: 作用距离; 红外辐射; 表观辐射亮度; 等效折算; 灰度分布; 灰度差

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **文章标号:** 1001-8891(2012)11-0672-05

Equivalent Calculation on Infrared Radiation of Airplane under Different Weather Condition

FAN Hong-jie, CHEN Qian-rong, YANG Miao-miao, LIU Lian-wei, XU Zhen-ling, WANG Min

(63892 Army Unit PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract: The significance and method of equivalent calculation on warning distance of IR search & warning equipment is introduced. Equivalent infrared radiate computative formula based on apparent luminance of plane target, difference between target and background luminance under different atmosphere mode is presented, and the hypothesis in the course of calculating is corrected. The result shows computative image from atmosphere mode 1(atmosphere mode of test) is approaching about gray-distributing and disciplinarian with image of atmosphere mode 2(atmosphere mode to be computative). The result indicates that the method of equivalent infrared radiate calculation is rational.

Key words: warning distance, infrared radiation, apparent infrared luminance, gray distributing, difference of gray

0 引言

红外侦察告警设备的作用距离是在规定的威胁目标、探测概率(同时对应规定的虚警率)和气象条件下, 被试设备对逼近的威胁目标实施告警时目标与被试设备之间的距离, 是红外侦察告警设备至关重要的战技指标, 除了与设备本身的探测、告警能力有关外, 还与告警目标红外辐射特性、气象条件等客观因素息息相关。目标红外辐射越强、气象条件能见度越高、天空背景越纯净, 对应的作用距离越远。对其进行考核是红外侦察告警设备指标考核的重点内容, 由于时间、架次、人力物力等客观条件限制, 常常在实际碰到的若干气象条件下进行作用距离动态飞行实验, 与设备指标要求的气象参数有时会有一定偏差, 不利于数据结果的处理和评判, 同时飞行实验次数有

限, 得到的作用距离只能反映个别气象条件(包括温度、湿度、气压、能见度等参数)下的情况。综合评估时, 需要将实际飞行得出的作用距离, 等效折算为规定条件气象条件下或折算到其它各种气象条件下的作用距离。

不同气象条件下作用距离的折算有多种方法, 常见的有采用基于信噪比的判据^[1](如 R.D.小哈得逊的红外作用距离公式), 或者如郝继平^[2]、吴晗平^[3,4]等少数专家探讨的基于改进型信噪比作用距离等效折算。但是上面方法无法充分体现复杂背景和形状等空间信息, 也不能体现出红外侦察告警设备所采用的各种复杂的图像信息处理方法, 对于这一问题通过红外数字图像注入式仿真方法来解决, 它的前提是生成注入式实验所需的红外数字图像, 生成红外数字图像有两种方法, 一种是通过理论建模的方法生成, 另

收稿日期: 2012-05-23.

作者简介: 樊宏杰(1982-), 男, 陕西蒲城县人, 工程师, 主要从事光电对抗仿真试验技术研究。

基金项目: 装备预研项目。

一种是通过对实测数据进行不同气象条件的辐射特性折算,该文是建立在后一种方法上的,其中对目标如飞机的辐射特性折算是一难点,文章以飞机辐射特性折算为例展开论述。

1 飞机红外辐射等效折算过程

飞机红外辐射的等效折算可分为基于飞机表面辐射亮度的等效折算和基于飞机背景亮度差的等效折算两种方法,然后得到折算后的对应不同设备的目标灰度或目标背景灰度差值,最终生成注入式实验需要的灰度图像。

1.1 基于目标表面辐射亮度的等效折算

目标亮度的等效折算主要考虑两种气象条件下,相同航线相同目标的亮度折算。即已知一种气象条件下目标的图像灰度值(实测图像数据),求在另一种气象条件下处于相同航点处(目标相对成像设备的位置、姿态相同)的同一目标图像灰度。根据红外成像系统定标方程^[5,6],不同气象条件下灰度的折算实质上就是目标或背景表面辐射亮度值的推算,定标方程如下:

$$L = R_b E + L_0 \quad (1)$$

式中: R_b 、 L_0 表示定标系数; E 表示图像灰度值; L 表示图像对应的亮度值。

1.1.1 气象条件1下目标波段表面辐射亮度 L_{a1} 、背景波段辐射亮度 L_{b1} 计算

设飞机实际飞行实验时的气象条件为气象条件1,根据该气象条件下的实测图像灰度值、红外成像系统定标系数,可求得对应的目标表面辐射亮度值。精确的目标、背景辐射特性的折算需要考虑目标、大气、红外成像系统光谱特性,但由于红外成像设备是波段辐射量测量设备,测量得到的是目标的波段灰度值,即使有红外成像系统的光谱响应曲线,目标的真实光谱辐射特性也是很难获得的。因此,为了简化起见,采用波段的处理方法,求出波段内的目标表面辐射亮度值 L_a 、背景辐射亮度 L_b 。

$$L_a = a_t t_a L_t + (1 - a_t) L_b + a_t L_{path} = R_b E_t + L_0, L_b = R_b E_b + L_0 \quad (2)$$

式中: L_a 为目标表面辐射亮度值; a_t 表示象元中目标占的比例; L_{path} 、 L_b 分别为路径辐射和背景辐射亮度; t_a 为大气路径透过率; E_t 、 E_b 分别为目标和背景的灰度值; 各量均是波段值。式中定标系数在设备实验或测试前通过两点定标得到,将定标系数带入方程组(2)中计算得到测量气象条件下的目标表面辐射亮度 L_{a1} 、背景辐射亮度 L_{b1} 。更为精确的是对红外成像设备每

一像元应用定标方程,则可以得到每一个像元的定标系数。

1.1.2 气象条件1到气象条件2的目标波段表面辐射亮度折算

在气象条件1测量数据基础上根据气象条件2对目标表面辐射亮度值(用 L_{a2} 表示)进行折算,则有:

$$L_{a1} = a_t t_{a1} L_{t1} + (1 - a_t) L_{b1} + a_t L_{path1} \quad (3)$$

$$L_{a2} = a_t t_{a2} L_{t2} + (1 - a_t) L_{b2} + a_t L_{path2} \quad (4)$$

式中: t_{a1} 、 t_{a2} 、 L_{path1} 、 L_{path2} 分别表示两种气象条件下的透过率和路径辐射; L_{b2} 表示气象条件2下背景辐射亮度,均可利用 LOWTRAN 或 MODTRAN 计算得到。对于相同航线下的相同目标,由于目标位置、姿态相同,认为 a_t 不变,未知量有 L_{a2} 、 L_{t1} 和 L_{t2} ,显然求解条件不够。由上两式可以看出,当认为 LOWTRAN 或 MODTRAN 的计算结果是可信时,目标表面辐射亮度的折算,实际上是目标真实辐射亮度的折算。为了折算的方便,先作如下假设,在后面对假设带来的误差再进行修正处理。

假设: 相同航线的相同目标处于同一航迹点时,在不同气象条件下真实辐射亮度相等,即 $L_{t1} = L_{t2} = L_t$ 。带入式(3)(4)有:

$$L_{a2} = \frac{[L_{a1} - (1 - a_t) L_{b1} + a_t L_{path1}] t_{a2}}{t_{a1}} + \frac{(1 - a_t)}{L_{b2}} + a_t L_{path2} \quad (5)$$

式(5)即气象条件1到气象条件2下目标表面辐射亮度折算方程,将式(2)代入式(5)可得:

$$L_{a2} = \frac{[R_b E_{t1} + L_0 - (1 - a_t)(R_b E_{b1} + L_0) - a_t L_{path1}] t_{a2}}{t_{a1}} + \frac{(1 - a_t)}{L_{b2}} + a_t L_{path2} \quad (6)$$

式中: E_{t1} 、 E_{b1} 分别为气象条件1下的目标、背景图像灰度值。

将公式(5)和公式(6)称为从气象条件1到气象条件2的目标表面辐射亮度折算方程。在不考虑假设1带来的误差情况下,该方程折算精度与红外成像设备定标参数 R_b 和 L_0 精度有关,和两种气象条件下的 t_{a1} 、 t_{a2} 、 L_{path1} 、 L_{path2} 、 L_{b2} 的计算精度有关,即和 LOWTRAN 或 MODTRAN 的计算精度相关。针对该折算方程,下面将进一步讨论方程中路径辐射 L_{path1} 的概算方法、系数 a_t 的处理方法以及假设1所带来误差的修正方法。

1) 气象条件1下路径辐射 L_{path1} 的概算方法

实际上,路径辐射是背景辐射的一部分。由于气象条件1下的背景辐射亮度值 L_{b1} 是通过定标得出的

实测值,则气象条件1下的路径辐射 L_{path1} 若直接采用理论计算值则可能带来误差,通过实测数据转换的方法来计算 L_{path1} ,我们认为实际路径辐射在背景辐射中占的比例等于理论(LowTRAN或MODTRAN计算值)计算比例。

$$L_{\text{path}}/L_b=L_{\text{pathli}}/L_{\text{bli}}=c \quad (7)$$

式中: L_{path} 和 L_b 均为实际的路径辐射亮度值和背景辐射亮度值, L_{pathli} 和 L_{bli} 为根据LowTRAN或MODTRAN代入实际气象条件计算出的理论值,可知 $0 \leq c \leq 1$ 。从而有:

$$L_{\text{path}}=cL_b \quad (8)$$

如果令 $L_{\text{pathli1}}/L_{\text{bli1}}=c_1$, $L_{\text{pathli2}}/L_{\text{bli2}}=c_2$,则有:

$$L_{a2}=\frac{[L_{a1}-(1-a_1+c_1a_1)L_{b1}]t_{a2}+(1-a_1+c_2a_1)L_{b2}}{t_{a1}} \quad (9)$$

$$L_{a2}=\frac{[R_bE_{1t}+L_0-(1-a_1+c_1a_1)(R_bE_{1b}+L_0)]t_{a2}+(1-a_1+c_2a_1)L_{b2}}{t_{a1}} \quad (10)$$

式(9)、(10)即为实际采用的目标表观辐射亮度折算公式。

2) 系数 a_t 的概算

以飞机平飞为例,假设目标横向和纵向尺寸为 l_1 和 l_2 ,则飞机相对装备投影面积近似用 $S=l_1l_2\sin\Phi$,其中 Φ 表示目标相对装备的俯仰角,如果 $S/d^2>\Omega$ (d 表示设备到目标的距离, Ω 表示设备的角度分辨率),则 a_t 就取1;如果 $S/d^2<\Omega$,则 a_t 就取 S/d^2 。

3) 远距离近似

在特定条件下,公式(9)、(10)可进一步简化:当目标距离较远时,路径辐射与背景辐射相当,即 $L_b \approx L_{\text{path}}$,从而 $c_1 \approx c_2 \approx 1$ 。则有:

$$L_{a2}'=\frac{(L_{a1}-L_{b1})t_{a2}}{t_{a1}}+L_{b2} \quad (11)$$

$$L_{a2}'=\frac{[R_b(E_{1t}-L_{b1})]t_{a2}}{t_{a1}}+L_{b2} \quad (12)$$

公式(13)(14)即为远距离情况下,由气象条件1到气象条件2目标表观辐射亮度折算方程。通过(9)式减(10)式得到这个误差量的表达式:

$$\Delta=L_{a2}'-L_{a2}=a_t\left[\frac{(1-c_1)L_{b1}t_{a2}}{t_{a1}}-(1-c_2)L_{b2}\right] \quad (13)$$

引入的误差量比例为:

$$S=\frac{\Delta}{L_{a2}}=\frac{a_t}{L_{a2}}\left[\frac{(1-c_1)L_{b1}t_{a2}}{t_{a1}}-(1-c_2)L_{b2}\right] \quad (14)$$

上式中的误差如果在5%以内则此误差可以忽略。

1.2 基于目标背景辐射亮度差的等效折算

基于目标背景亮度差的等效折算是基于 L_a-L_b 实现,即由公式(2)中两式相减得到:

$$\Delta L=L_a-L_b=a_t(L_{t1}+L_{\text{path}}-L_b)=R_b\Delta E \quad (15)$$

与目标、背景的表观辐射亮度的折算相同,求目标背景表观辐射亮度差的前提条件也是必须进行定标,只不过由于差值消去了 L_0 的影响,目标背景表观辐射亮度差的计算精度只与成像设备的定标系数 R_b 有关。在这儿同样先作假设1的近似,并针对两种气象条件下相同航线相同目标的目标背景表观辐射亮度差的折算。即已知气象条件1下目标背景表观辐射亮度差值 ΔL_1 ,求在气象条件2下处于相同航点处(目标位置、姿态相同)的目标背景表观辐射亮度差值 ΔL_2 。由式(15)得到下面两个式子:

$$\Delta L_1=L_{a1}-L_{b1}=a_t(L_{t1}+L_{\text{path1}}-L_{b1}) \quad (16)$$

$$\Delta L_2=L_{a2}-L_{b2}=a_t(L_{t2}+L_{\text{path2}}-L_{b2}) \quad (17)$$

式(16)(17)中: ΔL_1 、 L_{b1} 通过气象条件1下的实测目标背景灰度差值 ΔE_1 和定标系数得到。

两式联立计算得到 ΔL_2 :

$$\Delta L_{b2}=\frac{[\Delta L_1+a_t(L_{b1}-L_{\text{path1}})]t_{a2}}{t_{a1}}+a_t(L_{\text{path2}}-L_{b2}) \quad (18)$$

$$\Delta L_2=\frac{[R_b\Delta E_1+a_t(R_bE_{1b}+L_0-L_{\text{path1}})]t_{a2}}{t_{a1}}+a_t(L_{\text{path2}}-L_{b2}) \quad (19)$$

同(9)(10)式计算过程有:

$$\Delta L_2=\frac{[\Delta L_1+a_t(1-c_1)L_{b1}]t_{a2}}{t_{a1}}-a_t(1-c_2)L_{b2} \quad (20)$$

$$\Delta L_2=\frac{[R_b\Delta E_1+a_t(1-c_1)(R_bE_{1b}+L_0)]t_{a2}}{t_{a1}}-a_t(1-c_2)L_{b2} \quad (21)$$

公式(20)(21)即为采用的目标背景表观辐射亮度差折算方程。

同样在远距离情况下,折算公式可近似表示为:

$$\Delta L_2=\Delta L_1t_{a2}/t_{a1} \quad (22)$$

1.3 假设1带来误差的修正

假设1认为目标本征辐射亮度或者本征温度不受气象条件改变的影响,这不是一个严格的假设,可能

带来折算误差。这个折算误差与两种气象条件下的目标本征辐射亮度差 ΔL_t 相关, 令 $L_{t2}=L_{t1}+\Delta L_t$, 则有:

$$L_{a1}=a_{t1}L_{a1}+(1-a_{t1})L_{b1}+a_{t1}L_{path1} \quad (23)$$

$$L_{a2}=a_{t2}L_{a2}+(1-a_{t2})L_{b2}+a_{t2}L_{path2} \quad (24)$$

从而式(5)可写为:

$$L_{a2}=\frac{[L_{a1}-(1-a_{t1})L_{b1}-a_{t1}L_{path1}]t_{a2}}{t_{a1}}+a_{t2}L_{a2}+(1-a_{t2})L_{b2}+a_{t2}L_{path2} \quad (25)$$

可见误差修正项为 $a_{t2}\Delta L_t$, 根据目标红外辐射特性建模理论, 可知 ΔL_t 与目标表面温度变化 ΔT_t 有关。对普朗克公式求导可以得到 ΔL_t 与 ΔT_t 之间的函数关系:

$$\Delta L_t=\Delta T_t \frac{e_t}{\pi} \int_{x_1}^{x_2} \left[M_b(x, T) \frac{1}{e^{c_2/xT}-1} e^{c_2/xT} \frac{c_2}{x} \frac{1}{T^2} \right] dx \quad (26)$$

由式(26)可知, 需要知道 ΔT_t 和气象条件 1 下的目标真实辐射温度 T 。那么, 首先要求得气象条件 1 下目标的真实辐射温度, 再求出目标表面温度变化 ΔT_t 。

1.3.1 气象条件 1 下目标的真实辐射温度 T_1 的求法

由式(3)可计算得到目标在气象条件 1 下的真实波段辐射亮度 L_{t1} , 采用二分法进行数值逼近计算, 可以得到目标在气象条件 1 下的真实辐射温度 T_1 。

$$L_{t1} \frac{\pi}{e_t} = \int_{x_1}^{x_2} [M_b(x, T)] dx \quad (27)$$

若目标发射率 e_t 、系数 a_t 已知, 则可计算出等效黑体波段内辐射出射度 M_b 。则目标的温度为 $M_b=L_t\pi/e_t$ 的温度。

设红外成像设备的响应波段为 $x_1 \sim x_2$, 由于实际中遇到的目标的辐射温度一般在 150 K~2000 K 之间, 令 $t_1=150.0$ K, $t_2=2000.0$ K, 可在此温度区间选取初始温度点, 积分计算式(27)右端积分值。按照二分法改变温度直到计算结果逼近 M_b , 当计算误差满足精度要求时, 此时温度即为所要求解的目标真实温度。

1.3.2 目标表面温度变化 ΔT_t 求法

由于目标表面温度与环境温度的关系是复杂的非线性关系, 针对目标每一个面元温度, 均需要求解高阶多元偏微分传热方程和输运方程组, 并且其解析表达式相当复杂。为求得目标表面温度变化 ΔT_t 与环境温度变化 ΔT_b 的关系, 文中进行工程上的简化。长波段红外侦察告警设备接收到辐射能量中, 大部分源于蒙皮辐射的贡献, 而尾焰的辐射在长波段较弱, 并且由于飞机机体的遮挡所占比例不大。因此, 我们认

为实测图像数据中的目标辐射均可认为是蒙皮辐射, 从而目标表面温度的变化, 也主要考虑蒙皮温度的变化, 蒙皮的温度可由气动加热公式求得。

$$T_t=T_b(1+0.16M^2) \quad (28)$$

式中: 设目标处环境温度为 T_b ; 地面温度为 T_0 , 有:

$$\Delta T_t=\Delta T_b(1+0.16M^2) \quad (29)$$

飞机目标主要在对流层内作战, 根据对流层温度随高度变化规律, 很容易得到目标处 T_b 的变化取决于地面温度的变化, 即:

$$\Delta T_b=\Delta T_0 \quad (30)$$

可得:

$$\Delta T_t=\Delta T_0(1+0.16M^2) \quad (31)$$

1.3.3 气象条件 2 下目标背景辐射亮度差计算

根据 ΔT_t 和 T 可计算得到目标表观辐射亮度修正量 ΔL_t , 则气象条件 2 下目标的表观辐射亮度、目标背景亮度差的修正表达式为:

$$L_{a2 \text{ 修正}}=L_{a2}+a_{t2}\Delta L_t \quad (32)$$

$$\Delta L_{2 \text{ 修正}}=\Delta L_2+a_{t2}\Delta L_t \quad (33)$$

1.4 折算后的目标灰度或目标背景灰度差计算

由式(2)和式(15)可以到的折算后目标灰度或目标背景灰度差

$$E_{a2}=(L_{a2 \text{ 修正}}-L_0)/R_b \quad (34)$$

$$\Delta E_2=\Delta L_{2 \text{ 修正}}/R_b \quad (35)$$

如果成像设备不同, 则需要代入不同设备的定标系数。

2 实例计算

下面以同一成像设备目标背景表观辐射亮度差折算为例, 折算前后的气象条件如下所示:

气象条件 1: 2008 年 10 月 23 日, 时间 12:48, 温度 14.8℃, 湿度 28%, 能见度 30 km, 大气压 1013 hPa。目标航迹数据 (相对于成像设备): 方位角度为 76.72°, 俯仰角度为 20.68°, 距离为 15.024 km;

气象条件 2: 2008 年 10 月 24 日, 时间 12:40, 温度 12.0℃, 湿度 18.5%, 能见度 30 km, 大气压 1013 hPa。目标航迹数据 (相对于成像设备): 方位角度为 75.38°, 俯仰角度为 17.81°, 距离为 15.044 km。

对比表 2、3 可以看出, 由气象条件 1 折算到气象条件 2 下的图像与气象条件 2 下实测图像从灰度差分布与变化趋势一致性上较好。分析表 1、2、3 中最大值, 得到折算误差为 11%, 计算结果比较理想, 目标背景灰度差总和计算误差为 18%。分析产生误差的原因有: 在目标边缘处目标往往只占探测器瞬时视场的一部分, 从前面理论推导过程可知, 在面目标折算过程中由于 a 值始终取 1, 所以造成目标边缘折算误

差比较大，使得灰度差总和计算误差变大；同时还有目标在姿态上的差别也会使得折算得到的灰度差值

表 1 气象条件 1 实测红外图像目标背景灰度差值

Fig.1 Difference of gray between target and background under atmosphere mode 1

0	0	0	0	0	0	0
0		40	50	39	0	0
0	23	120	190	115	0	0
0	45	163	327	154	38	0
0	41	147	308	144	35	0
0	0	67	142	59		0
0		48	49			0
0	0	0		0	0	0

表 2 由气象 1 折算到气象 2 下的目标背景灰度差值

Fig.2 Difference of gray between target and background computative from atmosphere mode 1 to atmosphere mode 2

0	0	0	0	0	0	0
0		59	70	59	0	0
0	43	149	227	143	0	0
0	64	202	379	191	56	0
0	65	191	359	176	54	0
0	0	93	174	83		0
0		61	62			0
0	0	0		0	0	0

表 3 气象条件 2 下实测红外图像目标背景灰度差值

Fig.3 Difference of gray between target and background under atmosphere mode 2

0		0	0	0	0	0
0	0	0	38	34	0	0
0	37	77	179	94	43	0
0	0	90	415	412	86	0
0	0	71	227	219	47	0
0	0	47	113	137	40	0
0	0	0	57	55	0	0
0	0	0	0	0	0	0

与测量值之间的存在差异（两条飞行航线设计一样，但是在飞行过程中相同航点处还是会存在姿态上的差别）；其次是设备在不同时间的工作状态、环境波动等诸多随机因素的影响也会给折算带来误差。

3 结束语

文章推导了不同气象条件下，相同航线、相同姿态、相同航点处目标表观辐射亮度及目标背景表观辐射亮度差的折算公式，并对其中的假设近似进行了修正。但是该折算方法也存在一定的局限性：一是由较差气象条件到较好条件的折算不能进行完整航线的折算。因为较好气象条件下设备的作用距离大于较差气象条件的作用距离，当实测图像拍摄时的气象条件若好于预推算的气象条件，则可用于折算的实测图像对应的最远成像距离大于折算之后的作用距离，折算后图像可用来进行作用距离实验。当实测图像拍摄时的气象条件相对于推算的气象条件较差时，则可用于折算的实测图像对应的最远成像距离小于折算之后的作用距离，折算后图像满足不了作用距离实验。简单地说，即从良好气象条件可以折算到较差气象条件，但反过来，从较差的气象条件折算到良好气象条件时，由于缺乏实测图像数据而较为困难，只能进行部分距离的折算。二是折算过程中没有考虑目标反射环境辐射的影响，在不同气象条件下环境辐射不同，则目标反射环境辐射也不同。

参考文献：

[1] R.D.小哈得逊. 红外系统原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1975.

[2] 郝继平, 黄平华, 杜成功. 红外搜索设备作用距离等效分析与应用[J]. 应用光学, 2004, 25(4): 41-44.

[3] 吴晗平. 军用红外目标图像识别跟踪系统的现状与研究[J]. 现代防御技术, 1996(8): 55-64.

[4] 吴晗平, 易新建, 杨坤涛. 红外搜索系统的作用距离及其等效检验[J]. 红外技术, 2004, 26(4): 2-5.

[5] Pieter A. Jacobs. 地面目标和背景的热红外特征[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.

[6] 吴军辉, 朱震, 李东强, 等. 基于波段处理而引起的热像仪辐射测量误差计算[J]. 红外技术, 2005, 27(1): 23-28.