

〈系统与设计〉

空中目标反射辐射特性工程算法

樊宏杰, 刘连伟, 许振领, 杨淼淼, 姚 梅
(中国人民解放军 63892 部队, 河南 洛阳 471003)

摘要: 仿真试验中, 目标辐射特性计算精度影响红外成像设备作用距离的测试精度, 反射辐射是目标辐射特性的重要组成部分, 针对空中目标的反射辐射特性进行建模并给出了工程计算方法, 该方法考虑了空中目标反射天空背景辐射、反射太阳直射辐射、反射地面背景辐射。针对某空中目标进行了理论计算, 并与实测数据进行了对比, 结果表明该方法精度较高。

关键词: 空中目标; 反射辐射; 红外辐射特性; 工程算法

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2013)05-0289-06

The Engineering Arithmetic of the Reflected Infrared Radiation Characteristic for Air-target

FAN Hong-jie, LIU Lian-wei, XU Zhen-ling, YANG Miao-miao, YAO Mei
(63892 Unit of PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract: The calculation precision of target radiation characteristic affects the test precision of IR imaging equipments' operating distance in the simulation tests. The infrared reflected radiation is an important component of infrared radiation characteristic. In this paper, the modeling of infrared reflected radiation and the engineering arithmetic are presented. The infrared reflected radiation came from the solar, the sky and the earth is calculated. According to the contrast of calculating data and test data from the same air-target, the result shows that the precision of this arithmetic is accurate.

Key words: air-target, infrared reflected radiation, infrared radiation characteristic, engineering arithmetic

0 引言

对空中目标的探测告警、搜索跟踪是地空红外侦察告警、捕获跟踪等成像设备的主要任务, 对空中目标的作用距离是红外成像设备的一项重要指标, 作用距离的大小决定留给防御方进行防御反击时间的长短, 决定防御方重要目标、设施、阵地存活概率的大小, 作用距离越大, 防御方越有足够的时间进行反应而采取相应的对抗措施对敌方的光电武器实施对抗, 降低敌光电武器的毁伤效率, 提高己方目标、设施、阵地的存活概率。对作用距离的考核采取仿真的方法是大势所趋, 但是在作用距离考核试验中, 对目标的辐射特性计算要求较高。

目前国内在空中目标辐射特性^[1-3]计算及建模方面做了大量的研究工作, 分别对空中目标的蒙皮^[1-3,5,7,8]、尾喷口^[1,6]、尾焰^[2-3,6]进行了建模及辐射特

性计算, 蒙皮的辐射特性计算主要依靠气动加热公式来计算, 考虑对环境辐射计算的比较少, 这样计算得到的辐射特性精度不高, 其主要是基于仿真实时性的考虑, 且认为空中有动力目标的辐射主要来自尾焰部分。但是在考核地面红外成像设备对空中目标的作用距离时主要是在迎头的情况下进行, 则尾焰在很大程度上被遮挡, 目标的辐射主要还是来自于蒙皮的辐射。所以对空中目标蒙皮辐射特性进行高精度建模尤为重要, 蒙皮的辐射包括 3 部分: 由自身温度产生的辐射、反射辐射(反射太阳直射辐射、反射天空背景辐射、反射地面背景辐射)、大气的路径传输效应。文中着重对目标反射辐射进行了建模, 并在此基础上计算目标的表现辐射特性。

1 空中目标反射辐射计算

反射辐射(反射环境辐射)是目标辐射特性的重

收稿日期: 2013-1-29; 修订日期: 2013-2-16.

作者简介: 樊宏杰(1982-), 男, 陕西蒲城县人, 本科, 主要从事光电对抗仿真试验技术研究。Email: fanhongjie1982@sina.com。

要组成部分,而空中目标反射辐射特性计算可由下式得到:

$$L_{bg}'(\lambda_1 \sim \lambda_2) = L_{sky}'(\lambda_1 \sim \lambda_2) + L_{sun}'(\lambda_1 \sim \lambda_2) + L_{earth}'(\lambda_1 \sim \lambda_2) \quad (1)$$

式中: λ_1 、 λ_2 表示起止波长; $L_{bg}'(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 表示总的反射辐射; $L_{sky}'(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 表示反射天空背景部分辐射; $L_{sun}'(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 表示反射太阳直射部分辐射; $L_{earth}'(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 表示反射地面背景部分辐射。

在计算反射环境辐射过程中需要确定一些几何关系,如图 1 所示,图中各个变量定义为: $OXYZ$ 表示地面坐标系, dS 表示目标上的某一面元; n 表示面元法线方向; β 表示面元倾角,为 n 与天顶之间的夹角,角度范围为 $[0, \pi]$, 垂直向上为 0° , 垂直向下为 π ; α 表示面元俯仰角,为 n 与水平面之间的夹角,其范围 $[-\pi/2, \pi/2]$, 向上为正(天顶方向), 向下为负(天底方向); ϕ 表示面元方位角,为 n 在水平面投影 n' 与正北方向夹角,角度范围为 $[0, 2\pi)$, 正北方向为 0 。

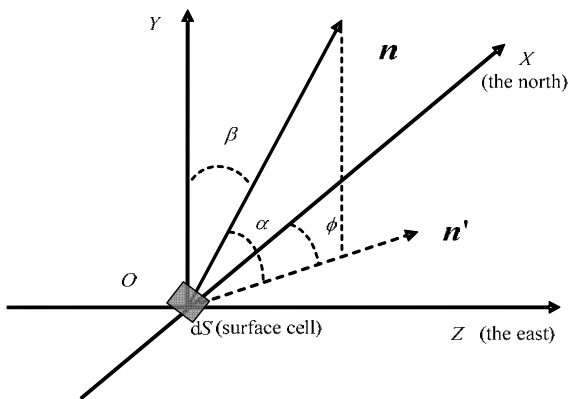


图 1 目标面元法向与地面坐标系中的几何关系

Fig.1 The relationship between the ground reference frame and normal of target surface cell

1.1 目标反射天空背景辐射计算

1.1.1 目标高度处天空背景辐射特性计算

目标高度处的天空背景辐射计算与地面处的天空背景辐射计算方法相同,对应大气长度为从目标到无穷远处。根据地面气象参数对大气进行分层,通过 Modtran 软件可计算得到。由于红外侦察告警、搜索跟踪设备作用距离有限,因此对空中目标探测告警、搜索跟踪一次有效时间也比较短(几分钟),因此在其仿真试验中仿真生成红外图像时,可认为天空背景的辐射在这段时间内不变,这样可事先对目标高度处半球天空背景辐射亮度进行计算,以数据表的形式存储,仿真试验时通过读取表格相应数据的形式进行应用。

1.1.2 目标面元反射天空背景辐射计算

目标面元反射天空背景与面元法线方向有关,在

讨论下面情况时一些近似和经验知识可为我们所用,为工程计算提供方便。

第一:目标上各面元近似用朗伯体(漫发射体)来表示,这样该面元也可以看成漫反射体,即:

$$\rho(\lambda, \theta, \phi) = \rho(\lambda) \quad (2)$$

第二:天空背景的辐射亮度与方位无关^[4], 只与仰角有关,随着仰角的增大,天空辐射亮度变大。

$$L(\lambda, \theta, \phi) = L(\lambda, \theta) \quad (3)$$

根据面元法线方向范围分为以下几种情况计算目标反射天空背景辐射。

1) 面元法线正向上 ($\beta=0$, $\alpha=\pi/2$)

面元法线正向上时看到的天空背景为整个上半球天空,则在面元上产生的辐射照度计算公式如下:

$$E_{sky}(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{sky}(\lambda, \theta, \phi) d\lambda \sin \theta \cos \theta d\theta d\phi \quad (4)$$

式中: θ 表示俯仰角; ϕ 表示方位角。当 $\alpha \geq 0$ 时, θ 与 α 方向相同; 当 $\alpha \leq 0$ 时, θ 与 $-\alpha$ 方向相同。

则该面元反射天空背景的总辐射亮度计算公式为:

$$L_{sky}'(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_r \times L_{sky}(\lambda, \theta, \phi) d\lambda \sin \theta \cos \theta d\theta d\phi \quad (5)$$

式中: f_r 表示光谱的 BRDF, 是与材料、波长、入射、散射角度等参数有关的函数。当入射面是朗伯面时, $f_r = \rho_{tar}(\lambda)/\pi$, 该面元反射天空背景的总辐射亮度表示为:

$$L_{sky}'(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_{tar}(\lambda) \times L_{sky}(\lambda, \theta, \phi) d\lambda \sin \theta \cos \theta d\theta d\phi / \pi \quad (6)$$

在工程计算过程中, $\rho_{tar}(\lambda)$ 取波段平均值(用 ρ_{tar} 表示), 则上式可变为:

$$L_{sky}'(\lambda_1 \sim \lambda_2) = 2\rho_{tar} \sum_{i=1}^I \Delta\theta L_{sky}(\lambda_1 \sim \lambda_2)(\theta_i) \sin \theta_i \cos \theta_i \quad (7)$$

式中: $\Delta\theta$ 表示俯仰角变化间隔; $\theta_i = i\Delta\theta$; $I = \pi/2/\Delta\theta$, θ 表示俯仰角(等于 $\pi/2$ - 天顶角)。

后面各种情况仅给出各个情况的反射辐射亮度公式。

2) 面元法线向上 ($0 < \beta < \pi/2$, $0 < \alpha < \pi/2$)

如图 2 所示: 法线向上时对天空背景的观察仰角范围为 $[0, \pi - \beta]$, 面元反射天空背景的辐射亮度分别用 $L_{1sky}'(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 、 $L_{2sky}'(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 表示。 $L_{1sky}'(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 对应天空背景分范围: ϕ 为 $[0, \pi]$ 、 θ 为 $[0, \pi/2]$; $L_{2sky}'(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 对应天空背景分范围: ϕ 为 $(\pi, 2\pi)$ 、 θ 为 $[\beta, \pi/2]$ 。

两部分反射辐射亮度分别如下:

$$L_{\text{sky}}'(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \rho_{\text{tar}} E_{\text{sky}}(\lambda_1 \sim \lambda_2) / \pi =$$

$$\frac{\rho_{\text{tar}}}{\pi} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J L_{\text{sky}}(\lambda_1 \sim \lambda_2)(\sin \theta_i \sin \alpha + \cos \theta_i \sin \varphi_j \cos \alpha) \cos \theta_i \Delta \theta \Delta \varphi$$

(8)

式中: $\Delta \theta$ 表示俯仰角变化间隔; $\theta_i = i \Delta \theta$; $I = (\pi/2) / \Delta \theta$;
 $\Delta \varphi$ 表示方位角变化间隔, $\varphi_j = j \Delta \varphi$; $J = \pi / \Delta \varphi$ 。

$$L_{\text{sky}}'(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \rho_{\text{tar}} E_{\text{sky}}(\lambda_1 \sim \lambda_2) / \pi =$$

$$\frac{\rho_{\text{tar}}}{\pi} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J L_{\text{sky}}(\lambda_1 \sim \lambda_2)(\lambda, \theta)(\sin \theta_i \sin \alpha - \cos \theta_i \sin \varphi_j \cos \alpha) \cos \theta_i \Delta \theta \Delta \varphi$$

(9)

式中: $I = (\pi/2 - \alpha) / \Delta \theta$; $J = \arcsin(\sin \theta / \sin \beta) / \Delta \varphi$ 。
则总的反射天空背景辐射亮度为:

$$L_{\text{sky}}'(\lambda_1 \sim \lambda_2) = L_{\text{sky}}'(\lambda_1 \sim \lambda_2) + L_{\text{sky}}'(\lambda_1 \sim \lambda_2) \quad (10)$$

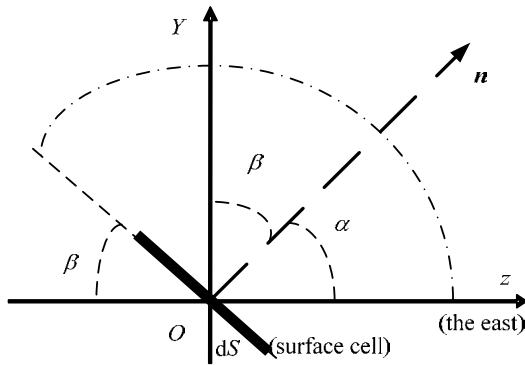


图2 目标面元在地面坐标系中的侧视图

Fig.2 Side-glance for the target surface cell in the ground reference frame

3) 面元法线水平 ($\beta = \pi/2$, $\alpha = 0$)

该情况面元只能看见一半的天空背景, 则天空背景在面元上产生的辐射照度计算如下:

$$E_{\text{sky}}(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \int_0^\pi \int_0^{\pi/2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\text{sky}}(\lambda, \theta) d\lambda \cos \theta \sin \varphi \cos \theta d\theta d\varphi$$

(11)

则该面元反射天空背景的总辐射亮度计算公式如下:

$$L_{\text{sky}}'(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \int_0^\pi \int_0^{\pi/2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_{\text{tar}}(\lambda) \times L_{\text{sky}}(\lambda, \theta) d\lambda \cos^2 \theta d\theta \sin \varphi d\varphi / \pi$$

$$= \frac{2\rho_{\text{tar}}}{\pi} \sum_{i=1}^N \Delta \theta L_{\text{sky}}(\lambda_1 \sim \lambda_2)(\theta_i) \cos^2 \theta_i$$

(12)

4) 当面元法线向下时 ($\pi/2 < \beta < \pi$, $-\pi/2 < \alpha < 0$)

该情况下, 面元所能看到的天空范围如图3阴影区域所示。

对应的俯仰角范围为 $[0, \pi/2 + \alpha]$, 方位角范围为 $[\phi - \pi/2, \phi + \pi/2]$, 同前面因为天空背景与方位角无关, 则方位角范围可以等效到 $[0, \pi]$ 。则面元反射的天空辐射亮度计算公式如下:

$$L_{\text{sky}}'(\lambda_1 \sim \lambda_2) =$$

$$\frac{\rho_{\text{tar}}}{\pi} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J L_{\text{sky}}(\lambda_1 \sim \lambda_2)(\theta_i)(\sin \theta_i \cos \alpha + \cos \theta_i \sin \varphi_j \cos \alpha) \cos \theta_i \Delta \theta \Delta \varphi$$

(13)

式中: $I = (\pi/2 + \alpha) / \Delta \theta$;

$J = \{\pi - 2\arcsin[\sin \theta / \sin(\pi/2 + \alpha)]\} / \Delta \varphi$ 。

5) 当面元法线垂直向下时 ($\beta = \pi$, $\alpha = -\pi/2$)

此种情况下, 面元反射的天空背景辐射为 0, 只反射地面背景辐射。

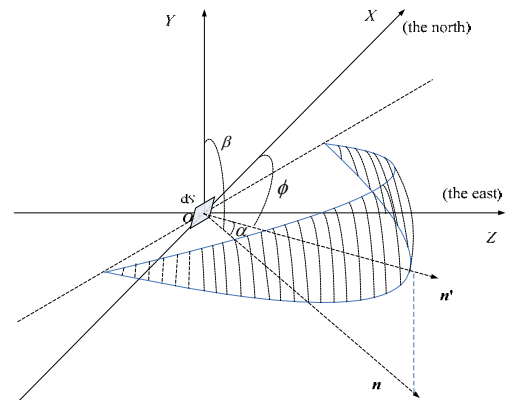


图3 面元法线向下时天空背景辐射积分区域图示

Fig.3 The sky can be seen by target surface cell when the normal line is adown

1.2 目标反射太阳辐射计算

目标反射太阳辐射计算步骤与目标反射天空背景辐射步骤类似, 首先需计算太阳在目标位置处的直射辐射, 然后根据面元法向计算反射太阳辐射。目标位置处太阳直射辐射也是通过 Modtran 计算得到, 计算输入为目标位置经度、纬度、高度、日期时间等参数以及大气参数等, 得到波段内的太阳直射辐射照度 $E_{\text{sun}}(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 表示, 则目标面元反射太阳直射辐射亮度用下式表示:

$$L_{\text{sun}}'(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \rho_{\text{tar}} E_{\text{sun}}(\lambda_1 \sim \lambda_2) / \pi \quad (14)$$

计算时需根据蒙皮面元法向进行判断, 决定是否进行蒙皮反射太阳辐射计算。判别方法如下, 图4表示太阳与接收面元之间的夹角关系。图中, h 表示太阳高度角, γ 表示太阳方位角, 正南为 0, θ 表示太阳与面元法线之间的夹角。根据图中几何关系可知, 如果面元法线方向和太阳方向夹角 $\geq \pi/2$, 则反射太阳辐射为 0, 如果夹角 $< \pi/2$, 则用式(14)可计算得到面元反射太阳辐射亮度。

1.3 目标反射地面背景辐射计算

空中目标接收来自地面背景辐射组成如图 5 所示。

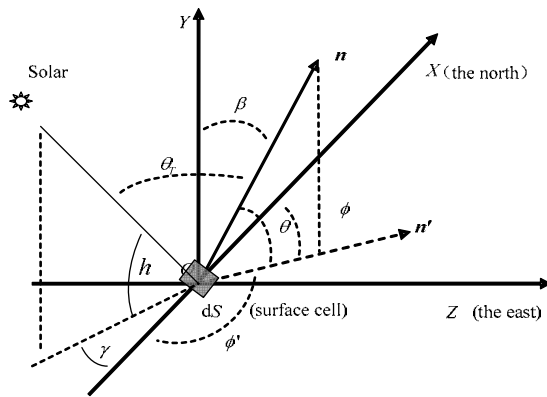


图 4 太阳与接收面元之间的角度关系示意图

Fig.4 The angle between sun and surface cell

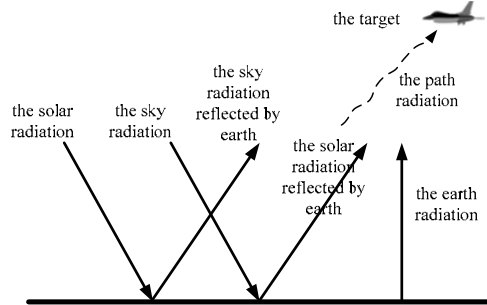


图 5 地面背景到目标处的辐射组成

Fig.5 The components of infrared radiation from the earth background

目标反射地面背景辐射亮度计算公式如下：

$$L_{\text{earth}}'(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \rho_{\text{tar}} [(L_{\text{earth}} + L_{\text{sunbyearth}} + L_{\text{skybyearth}}) \times \tau + L_{\text{path}}] \quad (15)$$

式中： L_{earth} 表示地表温度产生的辐射亮度； $L_{\text{sunbyearth}}$ 表示地面反射天空背景辐射亮度； $L_{\text{skybyearth}}$ 表示地面反射太阳直射辐射亮度。

从式(15)可以看出，要计算目标反射地面背景辐射需要计算以下几个量：地表温度产生的辐射，地面反射太阳辐射，地面反射天空背景辐射，地面到目标的大气路径辐射及大气路径透过率。

1.3.1 地面温度产生的辐射计算

地面温度工程上可近似用地面环境温度表示，用 T_{earth} 来表示，近似认为地表附着物都具有灰体特性，则其发射率为一常数，则地表的辐射亮度计算如下：

$$L_{\text{earth}}(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \frac{\varepsilon_{\text{earth}}}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 (\exp(c_2 / \lambda T_{\text{earth}}) - 1)} d\lambda \quad (16)$$

式中： $\varepsilon_{\text{earth}}$ 为地表平均发射率，根据不同植被、土壤等覆盖率及其各自发射率加权计算得到。

1.3.2 地面反射太阳直射辐射、反射天空背景辐射计算

地面反射太阳直射辐射、反射天空背景辐射计算与前面计算目标反射太阳直射、反射天空背景辐射的计算方法相同，将目标位置替换为地面坐标位置，为了工程上简化，将地面面元近似认为漫发射体，面元法向为垂直向上，即可计算地面反射太阳直射辐射、反射天空背景辐射。

1.3.3 地面到空中目标的大气路径辐射、路径透过率计算

空中目标处接收到的地面反射辐射是对可观测到的地面区域反射辐射的总和，所以需要计算各个角度、距离下的路径辐射和大气透过率。假设目标的高度为 H ，地面某一面元到目标的俯仰角度为 θ_1 ，面源到目标的距离为：

$$R = H / \sin \theta_1 \quad (17)$$

则路径辐射为 $L_{\text{path}}(H, \theta_1)$ ，路径透过率为 $\tau_{\text{path}}(H, \theta_1)$ ，同前面，其变化同样受俯仰角的影响较大，而在方位上的变换可以忽略，即： $L_{\text{earth}}(\lambda, \theta, \varphi) = L_{\text{earth}}(\lambda, \theta)$ ，其中 θ_1 取值范围为： $[0, \pi/2]$ 。

1.3.4 目标面元反射地面辐射亮度计算

目标面元反射地面辐射同样分以下 5 种情况计算。

1) 面元法线正向上 ($\beta=0, \alpha=\pi/2$)

反射地面辐射为 0，反射的全是天空背景的辐射。

2) 面元法线向上 ($0 < \beta < \pi/2, 0 < \alpha < \pi/2$)

此时目标面元反射地面背景辐射亮度计算公式如下：

$$L_{\text{earth}}'(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \frac{\rho_{\text{tar}}}{\pi} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J L_{\text{earth}}(\lambda_1 \sim \lambda_2)(\theta_i) (-\sin \theta_i \cos \alpha + \cos \theta_i \sin \varphi_i \cos \alpha) \cos \theta_i \Delta \theta \Delta \varphi \quad (18)$$

式中： $I = (\pi/2 - \alpha) / \Delta \theta$;

$J = \{\pi - 2 \arcsin[\sin \theta \sin(\pi/2 - \alpha)]\} / \Delta \varphi$ 。

3) 面元法线沿水平方向 ($\beta=\pi/2$)

该情况面元只能看见一半的地面背景，则该面元反射地面背景的总辐射亮度计算公式如下：

$$L_{\text{earth}}'(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \int_0^{\pi/2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_{\text{tar}}(\lambda) \times L_{\text{earth}}(\lambda, \theta, \varphi) d\lambda \cos^2 \theta \sin \varphi d\theta d\varphi / \pi = \frac{2\rho_{\text{tar}}}{\pi} \sum_{i=1}^I \Delta \theta L_{\text{earth}}(\lambda_1 \sim \lambda_2)(\theta_i) \cos^2 \theta_i \quad (19)$$

式中： $I = \pi/2 / \Delta \theta$ 。

4) 面元法线向下 ($\pi/2 < \beta < \pi, -\pi/2 < \alpha < 0$)

如图6所示:法线向上时对地面背景的观察仰角范围为 $[0, \pi/2 - \alpha]$, 反射地面背景的辐射亮度分别用 $E_{1\text{earth}}(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 、 $E_{2\text{earth}}(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 表示。 $E_{1\text{earth}}(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 对应地面背景范围: φ 为 $[0, \pi]$ 、 θ 为 $[0, \pi/2]$; $E_{2\text{earth}}(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 对应地面背景范围: φ 为 $(\pi, 2\pi)$ 、 θ 为 $[\pi/2 + \alpha, \pi/2]$ 。

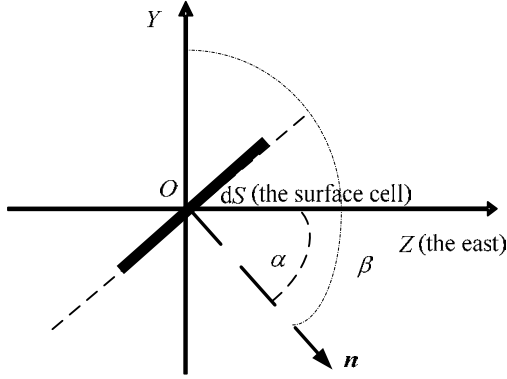


图6 面元在地面坐标系中的侧视图

Fig.6 Side-glance for the target surface cell in the ground reference frame

两部分的反射辐射亮度分别为:

$$L_{1\text{earth}}'(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \rho_{\text{tar}} E_{1\text{earth}}(\lambda_1 \sim \lambda_2) / \pi = \frac{\rho_{\text{tar}}}{\pi} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J L_{\text{earth}}(\lambda_1 \sim \lambda_2) (-\sin \theta_i \sin \alpha + \cos \theta_i \sin \varphi_j \cos \alpha) \cos \theta_i \Delta \theta \Delta \varphi \quad (20)$$

式中: $I = \pi/2 / \Delta \theta$; $J = \pi / \Delta \varphi$ 。

$$L_{2\text{earth}}'(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \rho_{\text{tar}} E_{2\text{earth}}(\lambda_1 \sim \lambda_2) / \pi = \frac{\rho_{\text{tar}}}{\pi} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J L_{\text{earth}}(\lambda_1 \sim \lambda_2) (\lambda, \theta) (\sin \theta_i \sin \alpha + \cos \theta_i \sin \varphi_j \cos \alpha) \cos \theta_i \Delta \theta \Delta \varphi \quad (21)$$

式中: $I = -\alpha / \Delta \theta$; $J = \arcsin[\sin \theta / \sin(\pi/2 + \alpha)] / \Delta \varphi$ 。

则总的反射地面背景辐射亮度为:

$$L_{\text{earth}}'(\lambda_1 \sim \lambda_2) = L_{1\text{earth}}'(\lambda_1 \sim \lambda_2) + L_{2\text{earth}}'(\lambda_1 \sim \lambda_2) \quad (22)$$

5) 面元法线垂直向下 ($\beta = \pi$, $\alpha = -\pi/2$)

此种情况下, 面元只反射地面背景辐射。该面元反射地面背景的总辐射亮度计算公式如下:

$$L_{\text{earth}}'(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_{\text{tar}}(\lambda) \times L_{\text{earth}}(\lambda, \theta) d\lambda \sin \theta \cos \theta d\theta d\varphi / \pi = (23) \\ 2\rho_{\text{tar}} \sum_{i=1}^I \Delta \theta L_{\text{earth}}(\lambda_1 \sim \lambda_2)(\theta_i) \sin \theta_i \cos \theta_i$$

式中: $I = (\pi/2 - \alpha) / \Delta \theta$ 。

1.4 目标总的反射辐射计算

以上内容具体分析了空中目标反射天空背景辐射、反射太阳辐射和反射地面背景辐射的计算方法,

计算目标反射环境辐射亮度时, 根据蒙皮面元法向, 分别计算目标反射天空背景辐射 $L_{\text{sky}}'(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 、反射太阳辐射 $L_{\text{sun}}'(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 和反射地面背景辐射 $L_{\text{earth}}'(\lambda_1 \sim \lambda_2)$, 根据公式(1)得到目标反射环境辐射亮度。

2 目标红外辐射特性计算

2.1 目标本征辐射计算 (零视距目标红外辐射)

目标本征红外辐射亮度来源包括两部分, 目标自身温度产生的红外辐射亮度和目标反射环境辐射亮度。目标的反射环境辐射亮度由通过章节1中的方法计算得到, 目标自身温度产生的红外辐射亮度 $L_t(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 根据普朗克公式计算得到。

$$L_{\text{tT}}(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda / \pi \quad (24)$$

式中: $L_{\text{tT}}(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 表示由目标的温度产生的辐射亮度; ε 为目标发射率, 取波段平均值。

则目标的本征辐射亮度 $L_t(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 为:

$$L_t(\lambda_1 \sim \lambda_2) = L_{\text{bg}}'(\lambda_1 \sim \lambda_2) + L_{\text{tT}}(\lambda_1 \sim \lambda_2) \quad (25)$$

2.2 目标表观红外辐射亮度计算

表观辐射亮度 $L_a(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 为本征辐射亮度 $L_t(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 经过大气传输效应修正后的值:

$$L_a(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \tau \times L_t(\lambda_1 \sim \lambda_2) + L_{\text{path}} = \tau \times (L_{\text{bg}}'(\lambda_1 \sim \lambda_2) + L_{\text{tT}}(\lambda_1 \sim \lambda_2)) + L_{\text{path}} \quad (26)$$

式中: τ 为路径大气透过率; L_{path} 为大气路径辐射亮度; $L_a(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 表示目标表观辐射亮度。 τ 、 L_{path} 可通过在 MODTRAN 中设置相应参数 (如气象条件、观测位置、日期及时间、目标视线、计算波段等) 计算得到。

3 数据计算对比

表1中数据分别为实测目标辐射亮度数据与理论计算目标辐射亮度数据, 亮度均取平均值, 计算波段为 $7.7 \sim 9.3 \mu\text{m}$ 。

从表中可以看出, 误差绝对值最大值为 20.14%, 最小值为 0.10%, 误差绝对值的平均值为 8.41%。分析误差来源主要有: ①计算模型中的误差。目标蒙皮温度计算时, 由于部分条件计算繁杂, 采用了一定的近似, 如地面背景辐射的近似计算, 同时调用 Modtran 软件计算天空背景辐射、太阳直射、大气路径辐射和透过率时, 软件计算结果自身也存在误差, 这些均会导致目标红外辐射计算的误差。②计算输入条件的误差。目标红外辐射计算输入包括高空温度、湿度等气象数据, 由于缺乏探空数据, 高空的温湿度等气象数据是根据地面气象数据推算得到, 与实际高空气象条

件存在偏差，因而也会引起目标红外辐射计算的误差。

4 结束语

本文对空中目标的反射辐射组成进行分析，并建立不同其对应情况下的物理模型，通过一些工程近似

及简化，实现了空中目标反射辐射特性的工程计算，最后对目标的总辐射特性进行了理论计算，与外场实测飞行数据进行比对，也证明了该方法具有较高的计算精度。因此在红外成像设备作用距离指标考核试验中，可提高红外图像目标辐射特性的仿真精度，提高试验结果的可信度。

表 1 目标实测辐射亮度和理论计算辐射亮度数据 Table1 The test and calculating datum for the infrared radiation of target

时刻（月-日- 时-分）	地面温度 /℃	地面湿度 /%	能见度 /km	目标视线处天空背景 辐射亮度/(W·sr ⁻¹ ·m ⁻²)	目标实测辐射亮 度/(W·sr ⁻¹ ·m ⁻²)	目标理论计算辐射 亮度/(W·sr ⁻¹ ·m ⁻²)	相对误差 /%
6-07 T17:20	39	14	18	9.40	19.33	23.23	20.14
6-07 T17:24				9.82	22.96	22.98	0.10
6-07 T17:29				9.60	20.40	23.06	13.04
6-07 T17:33				10.50	24.38	22.93	−5.94
6-15 T16:34	32	38	8.9	12.85	20.47	20.55	0.38
6-15 T16:38				11.67	18.70	20.43	9.22
6-15 T16:43				10.97	18.93	20.08	6.05
6-15 T16:47				11.85	22.89	20.05	−12.42

参考文献：

[1] 李彦志, 孙波, 王大辉. 飞机红外辐射建模与仿真[J]. 红外技术, 2008, 30(5): 252-255.

[2] 林杰, 江勇, 方浩百, 等. 飞机整机蒙皮自身红外辐射特性建模与分析[J]. 红外技术, 2012, 34(5): 286-291.

[3] 王明明, 郝颖明, 朱枫, 等. 空中目标红外辐射特性计算与实时仿真[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 1979-1984.

[4] Pieter A Jacobs. 地面目标和背景的热红外特征[M]. 吴文健, 胡碧茹, 满亚辉, 译. 国防工业出版社, 2004: 68.

[5] 石磊, 华祖耀, 饶颖. 飞机红外辐射图像仿真研究[J]. 计算机仿真, 2007, 4(10): 184-187.

[6] 张亮, 赵锋, 王雪松. 视线方向上飞机红外特性及大气衰减模型研究[J]. 红外技术, 2011, 33(6): 367-371.

[7] 翟泉慧, 王强, 额日其太. 高速飞机红外成像特性数值模拟研究[J]. 激光与红外, 2002, 32(3): 146-148.

[8] 单勇, 张靖周, 郭荣伟. 导弹蒙皮红外辐射特性的数值计算机与分析[J]. 航空动力学报, 2008, 23(2): 251-255.

[9] 汪中贤, 樊祥, 马东辉. 飞机全向红外辐射特征研究[J]. 电子对抗, 2009(3): 42-46.