

天空背景红外图像仿真

花文波 杨东升

(西北工业大学, 西安 710072)

摘要 为了使天空背景辐射强度光谱分布最终生成红外探测器焦平面上背景辐射功率分布图像,需要对天空背景辐射各影响因素进行分析,建立准确的背景辐射到探测器光学系统焦平面的辐射能量传输模型。本文利用 MODTRAN 软件计算不同天候条件下的天空背景辐射强度光谱分布,建立了背景辐射到探测器光学系统焦平面的辐射能量传输模型,给出了天空背景在焦平面上的辐射功率计算方法,利用天空背景辐射功率分布生成其红外图像。最后编写了仿真软件,生成不同天候天空背景图像,并与红外热像仪拍摄的天空背景图像进行了比对,其变化趋势有较高的一致性。

关键词 红外探测 红外图像 天空背景 仿真

中图法分类号 TP391.9; **文献标志码** A

采用红外探测器的红外制导空空导弹、红外告警系统等武器系统,其探测距离不仅与目标的辐射强度有关,而且与所处的天空背景环境密切相关。对于同一目标而言,在不同的天空背景下,其探测距离可能不同。为了更好地研究天空背景对红外探测器探测距离的影响,需要不同天候的天空背景红外图像,由于天候环境非常复杂,并且对于不同高度、不同距离,用红外探测器拍摄的图像都不同,且工作量大,成本太高,最好通过仿真的方式获取该分布图像。

以往对天空背景的研究大多建立的仅仅是云雨气溶胶的模型,把天空背景模型和探测器模型分别单独研究,没有考虑探测器看到的天空背景情况,建立准确有效的从天空背景到探测器焦平面辐射传输模型^[1-5],而影响天空背景辐射的因素有很多,要生成探测器接收到的背景红外辐射功率分布图像,就需要对天空背景各影响因素做全面深入的分析,建立准确的背景辐射到探测器光学系统焦平面的辐射能量传输模型,以生成探测器焦平面上天空背景红外图像。

本文以 MODTRAN 为基础,根据红外辐射传输能量守恒定律,并考虑光学系统透过率及探测器响

应等因素建立了准确的背景辐射到探测器光学系统焦平面的辐射能量传输模型,最后编写了仿真软件,生成不同天候下探测器焦平面上的天空背景红外图像,并对其进行了分析评估。

1 图像生成原理

天空背景红外图像生成方法如图1所示,在导引头垂直视场中选择若干典型点,利用 MODTRAN 计算每个点对应角度入射到导引头上的大气背景辐射亮度值,然后对每个角度计算的大气背景辐射亮度进行积分,利用插值的方法得到垂直方向每一个像素对应的大气辐射亮度值。由于空空导弹导引头视场较小,可认为水平方位具有较高一致性。因此认为同一俯仰角,不同方位角的辐射亮度相同,从而获得最终天空背景图像。

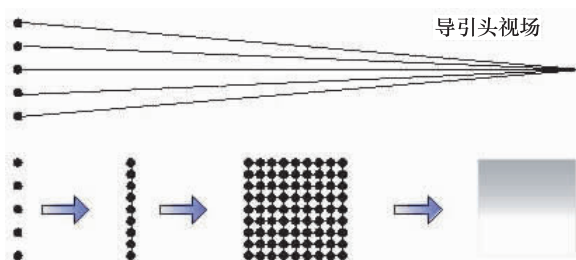


图1 天空背景图像生成示意图

2 天空背景红外图像仿真建模方法

2.1 天空背景辐射计算

影响天空背景辐射的因素有太阳天顶角、观察

2011年9月16日收到,11月28日修改 航空基金(20100153002)

及航天支撑基金(1014002)资助

第一作者简介:花文波(1986—),男,汉族,河南省焦作市人,硕士研究生,研究方向:导航、制导与控制。E-mail: mzhua wenbo@163.com。

高度、温度、地面材质、海拔高度、气溶胶云、雨、风速、太阳方位角、区域性差异,不同天数、不同时间等^[6]。

MODTRAN 软件把天空背景辐射分为路径热辐射、热散射、表面辐射、太阳散射、单一散射、总的地面反射、直接地面反射、反射太阳的辐射几部分。

对天空背景辐射测定计算,分两种情况。首先是同一模型下,对 $0^{\circ} \sim 93^{\circ}$ 天顶角范围内的一年里天数、区域、时间、方位角、海拔高度各个考察,如对时间、方位角进行测定计算,需在—同一地点、—同一海拔高度、观测高度、气溶胶条件下对当天不同时刻以及不同太阳方位角进行测量计算,方位角的测定方法可通过角度仪测定(下同);其次在 $93^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 天顶角范围考察除以上各因素外的边界层温度和地面背景两参数,如图 2、图 3 所示,均以中纬度夏季模型为例考察天空背景的辐射散射,计算路径为倾斜至太空,执行在观察者位置的多重散射。温度、压力、水汽、臭氧、甲烷、一氧化碳等气体都采用中纬度夏季模型里的默认参数,二氧化碳混合比为 365×10^{-6} U(ppmV),能见度为 50 km。积云气溶胶,观测高度 6 km。其光谱响应范围为 $8 \sim 14 \mu\text{m}$,天数为第 200 d,时间 12:00,方位角为 180° ,经纬度以 $39^{\circ}\text{N}98^{\circ}\text{E}$ 为例,在 $93^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 天顶角范围时,边界层温度为 300 K,地表反照材质为沙漠,考察的天顶角为 80° 和 120° 。

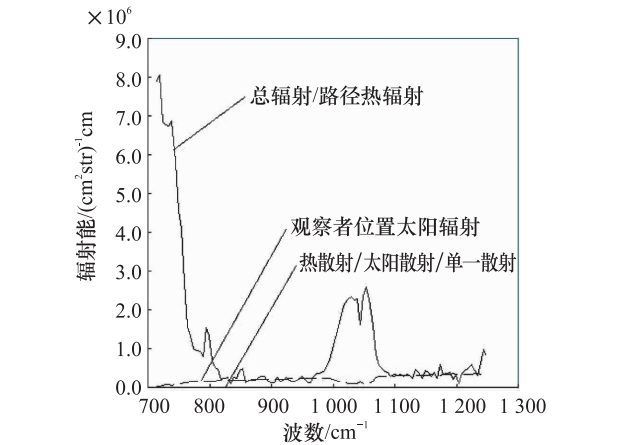


图 2 80°天顶角各因素辐射曲线

从图 2、图 3 中可以看出,当大气模型确定以后,天顶角在 $0^{\circ} \sim 93^{\circ}$ 范围内,天空背景辐射主要跟路径热辐射有关,其它因素对总辐射影响较小;在

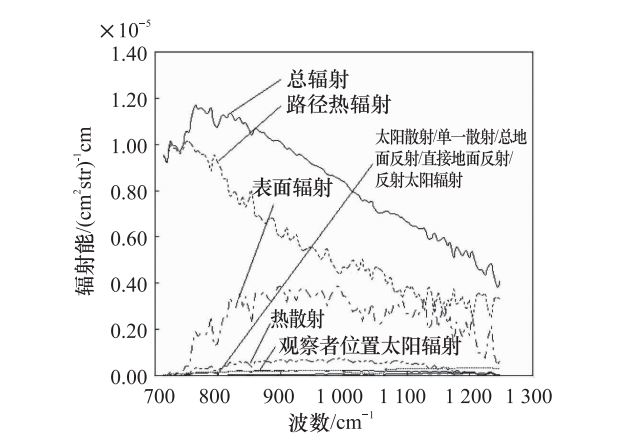


图 3 120°天顶角各因素辐射曲线

$93^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 范围内,对天空背景辐射起主要影响的是路径上的热辐射和表面辐射,其它因素影响较小。在 $0^{\circ} \sim 93^{\circ}$ 天顶角范围内,天空背景辐射主要考察的是大气分子的辐射散射,而在 $93^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 天顶角内,由于会看到部分的地面背景,所以地表温度和地面材质就会影响路径上的热辐射。

图 4、图 5 是对影响天空背景辐射的天顶角、天数、区域、时间、方位角等因素各个考察时的辐射曲线。从中可以看出,天顶角的变化对天空背景辐射影响最大,其它影响因素影响较小。这主要因为不同天数、区域、观测时间以及不同太阳方位角在 MODTRAN 里影响的主要是表面辐射、热散射、太阳散射,单一散射,总的地面反射、直接地面反射、反射太阳辐射、在观察者处的太阳辐射,而这些参数对天空背景辐射影响较小。

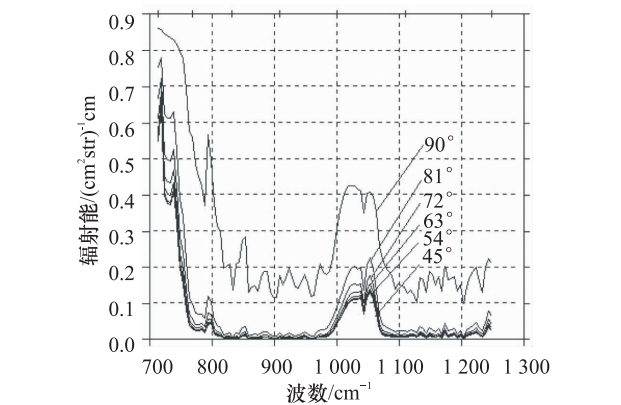


图 4 不同天顶角的总辐射曲线

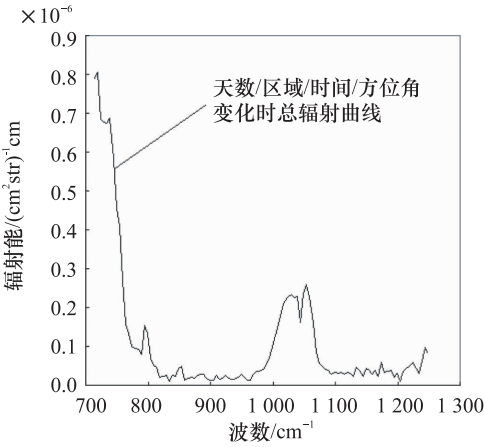


图5 各因素下的总辐射曲线

表1 不同季节积云模型总辐射差异

中纬度	μm						
	8	9	10	11	12	13	14
夏季积云	1.51	0.78	0.82	0.27	0.23	0.68	4.01
冬季积云	0.67	0.24	0.81	0.15	0.10	0.42	2.82

当考察不同模型时的天空背景辐射时,以中纬度夏、冬两季积云天空为例进行研究,表1为中纬度夏、冬两季80°天顶角典型波段的总辐射值对比表,观察波段为8~14 μm的典型值,对应不同有积云的季节,其辐射值单位为W/(cm²·str·micr·10⁻⁴)。可见不同季节在有云情况下对背景辐射也会引起较大变化。

2.2 天空背景辐射影响因素分析结果

综上所述,在0~93°,影响天空背景辐射的主要因素就是路径热辐射,而天顶角的变化是影响路径热辐射的主要原因;在93~180°,路径热辐射和表面辐射一起成为影响天空背景辐射的主要因素,而边界层温度和地表反照率以及天顶角是影响路径热辐射和表面辐射的,所以此时主要考虑这三方面因素的影响;其它因素在上述情况中之所以表现得不明显,主要是跟MODTRAN软件的建模方法有关,它做不到完全细致的对天空背景辐射的模拟计算。

当大气模型发生变化时,也会对总辐射造成较大影响,这主要是季节变化会引起大气温度整体变化,从而影响大气分子、微粒的辐射散射特性。

2.3 天空背景辐射传输建模方法

上一节为我们提供了如何利用MODTRAN软

件准确计算天空背景辐射亮度的思路和方法,要生成导引头所观察到的天空背景红外辐射图像,需要把MODTRAN计算的不同天顶角天空背景辐射亮度转化成辐射功率,通过插值计算,利用水平方向上辐射亮度的一致性,最终生成天空背景红外图像。

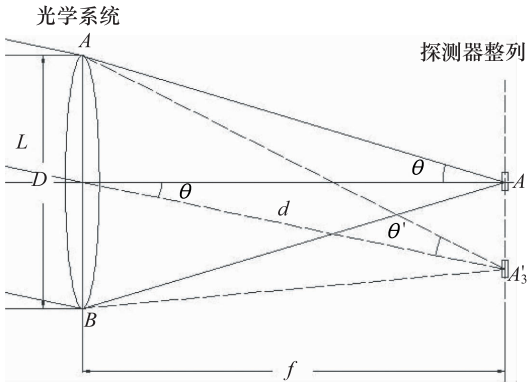


图6 像的辐射亮度

天空背景经过光学系统后得出的辐射亮度在实际应用中很重要。天空背景通过透射系统所形成的像的辐射亮度,可以从基本辐射亮度守恒定理得出,但由于可能存在相差,因此会引入某些微小差别^[7]。如图6所示,天空背景发出的红外辐射经过大气及导引头光学系统,最终传到探测器。对于天空背景辐射,设其辐射亮度为L,辐射功率为P₁,由于它距光学系统的距离很远,故可认为其到达光学系统AB的辐射光线是平行的,且与光学系统AB水平轴的夹角为θ,光学系统接收到的辐射功率为P₁₂,辐射亮度为L₂,像平面A₃接收到的辐射功率为P₂₃,辐射亮度为L₃。

如果忽略空气和光学系统对红外辐射的吸收和散射影响,则由能量守恒定律可知,天空背景辐射功率P₁(λ)、光学系统接收到的功率P₁₂(λ)和像平面接收到的功率P₂₃(λ),这三者相等,即

$$P_1(\lambda) = P_{12}(\lambda) = P_{23}(\lambda)$$
 (1)

如果考虑光学系统的透过率为τ₀,则

$$P_{23}(\lambda) = P_{12}(\lambda) \tau_0 = P_1(\lambda) \tau_0$$
 (2)

根据互易定理,像面源A₃的辐射亮度为L₃,则

$$P_{2 \rightarrow 3} = P_{3 \rightarrow 2}$$
 (3)

即光学系统与接收面A₃之间相互传递的辐射功率相等。而接收面A₃向光学系统发射的辐射功率为

$$P_{3 \rightarrow 2} = \int_{\Omega} L_3 A_3 \cos \theta d\Omega$$
 (4)

立体角元 $d\Omega = \sin\theta_0 d\theta_0 d\varphi$, 则(4)式可写成

$$P_{3 \rightarrow 2} = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\theta_0} L_3 A_3 \sin\theta \cos\theta d\theta = \pi L_3 A_3 \sin^2 \theta_0 \quad (5)$$

设轴外像点 A'_3 与探测器光学系统之间的距离为 d , d 与光轴夹角为 θ , 且光学系统孔径为 D , 焦距为 f , 则面积 $A_2 = \pi D^2/4$ 。处于焦平面的探测源面积 $A_3 = a \times b$, 其中 a 和 b 为探测元的长、宽。由于

$$\sin^2 \theta_0 = \left(\frac{D/2}{f} \right)^2 = \frac{1}{4} \left(\frac{D}{f} \right)^2 \quad (6)$$

又因为出射光瞳可以认为是朗伯辐射面, 所以轴外像点的辐射强度为

$$I'_3 = I_3 \cos\theta \quad (7)$$

式(7)中 I_0 为出射光瞳沿轴方向的辐射强度。

假定出射光瞳的直径和出射光瞳离开像平面的距离比较是很小的, 则

$$E'_{A'_3} = \frac{I'_3}{d^2} \cos\theta \quad (8)$$

d 与焦距 f 的关系为

$$d = \frac{f}{\cos\theta} \quad (9)$$

轴外像点的辐射照度与轴上像点辐射照度关系为

$$E'_3 = E_3 \cos^4 \theta \quad (10)$$

则轴外像点的辐射功率为

$$P_{23} = \frac{\pi}{4} L(\lambda) a \cdot b \cdot \left(\frac{D}{f} \right)^2 \cos^4 \theta \quad (11)$$

如果考虑光学系统的透过率为 τ_0 , 则

$$P_{23} = \frac{\pi}{4} \tau_a(\lambda) \tau_0 L(\lambda) ab \left(\frac{D}{f} \right)^2 \cos^4 \theta \quad (12)$$

$L(\lambda)$ 是天空背景的辐射亮度。

对于不同的红外探测器而言, 其响应频率 R 也是波长的函数, 再考虑响应率的影响, 在某一波长范围 (λ_1, λ_2) 内, 探测器接收到的总功率为

$$P = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_{23}(\lambda) R(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\pi}{4} \tau_0 R(\lambda) L(\lambda) ab \times \left(\frac{D}{f} \right)^2 \cos^4 \theta d\lambda \quad (13)$$

3 仿真结果

本文采用中纬度夏季模型, 温度、压力、水汽、臭氧、甲烷、一氧化碳等气体都采用 MODTRAN 对

应大气模型里的默认参数, 二氧化碳混合比为 365×10^{-6} mV(ppmV); 能见度为 50 km; 其光谱响应范围为 $8 \sim 14 \mu\text{m}$; 所生成的灰度等级为 256, 图像大小为 256×256 。

3.1 中纬度夏季不同天候天空背景红外图像

图 7 为中纬度夏季在不同天候下的天空背景红外图像仿真, 天顶角变化范围 $45^\circ \sim 93^\circ$, 观测高度为 6 km, 括号内为其辐射亮度的数量级。

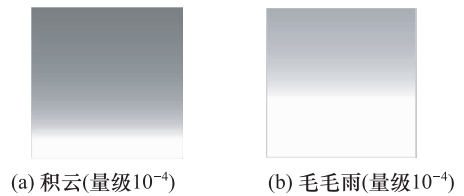


图 7 中纬度夏季各天候天空背景红外图像

3.2 中纬度不同季节天空背景红外图像

图 8 为中纬度夏季和中纬度冬季在有积云时的天空背景红外图像仿真结果, 天顶角变化范围在 $45^\circ \sim 93^\circ$, 观测高度为 6 km, 辐射亮度的数量级均为 10^{-4} 。

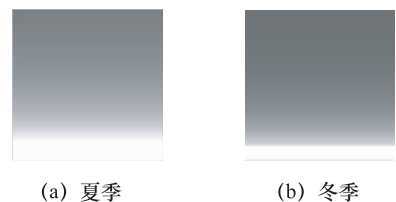


图 8 中纬度不同季节天空背景红外图像

3.3 仿真图像与实际图像的对比

图 9 为中纬度夏季晴空条件下仿真图像与红外热像仪拍摄的实际图像, 由于这两幅图直观差异不明显, 故给出这两个图像随天顶角变化时辐射亮度、灰度趋势, 如图 10。由于图 10(a) 没有考虑探测器因素, 所以曲线比较光滑, 对比可以看出, 仿真图像与实际图像具有很高的一致性。

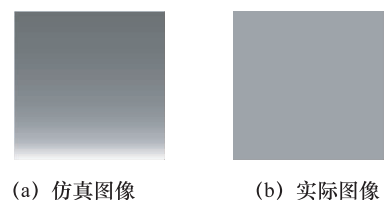


图 9 晴空背景对比

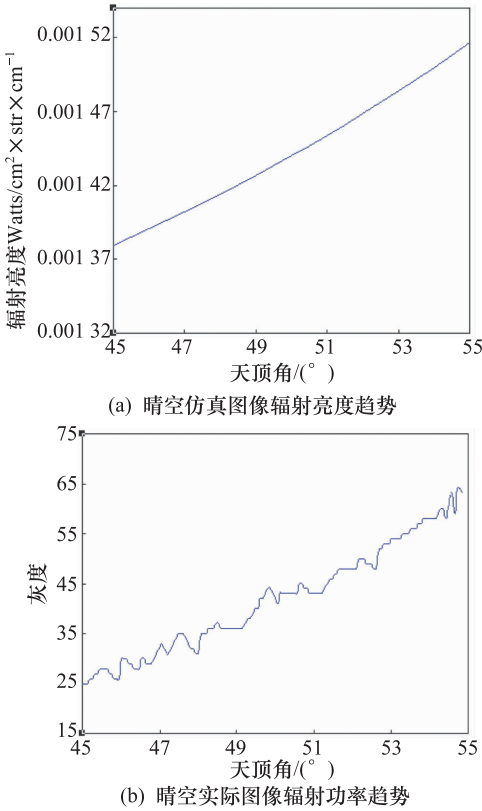


图 10 仿真图像与实际图像趋势对比

4 结 论

本文通过 MODTRAN 软件对天空背景辐射的各个影响因素进行分析计算,建立了背景辐射到探测器光学系统焦平面的辐射能量传输模型,给出了天空背景在焦平面上的辐射功率计算方法,生成探测器接收到的背景红外辐射功率分布图像,仿真结果与红外热像仪拍摄的天空背景图像变化趋势有较高的一致性,初步表明建模方法的正确性。

参 考 文 献

1 朱安宏. 基于 OpenGL 的 3D 天空仿真. 计算机应用. 2007;12. 82—84
2 霍 娟,吕达仁. 晴空与有云大气辐射分布的数值模拟及其对全天空图像云识别的应用. 气象学报,2006;64(1):32—37
3 桑 农,刘 畅,吴家伟. 云背景红外天空图像的统计模型与仿真. 华中科技大学学报(自然科学版),2005;33(11):5—8
4 孙毅义,董 浩,毕朝辉,等. 大气辐射传输模型的比较研究. 强激光与粒子束,2004;15(3):75—81
5 吴 健,杨春平. “天空背景光谱辐射建模及仿真”技术总结报告. 四川成都大学学报,2006;8(4):101—107
6 PC-ModWin Manual. Ontar Corporation, North Andover. Ma 1845, USA, May. 1995
7 张建奇,方小平. 红外物理. 西安:西安电子科技大学出版社,2004

The simulation of Sky Background IR image

HUA Wen-bo ,YANG Dong-sheng

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China)

[Abstract] In order to make the sky background radiation spectrum distribution generate the infrared detector focal plane power distribution image, it needs to analyze the factors of the sky background radiation and establish an accurate energy transfer model of the background radiation to the detector optical system focal plane of the radiation energy. In this paper, it calculates the sky background radiation spectral distribution under the different weather conditions by MODTRAN software, and establishes an energy transfer model of the background radiation to the detector optical system focal plane of the radiation energy, and gives out of the calculation method of the focal plane of the sky background radiation power, using the sky background radiation power distribution to generate their infrared images. Finally, we compile the simulation software to generate images of different weather and sky background. And compared with sky background image which IR imaging instrument take, the trends have a higher consistency.

[Key words] infrared detection infrared image sky background simulation