

不同高度不同大气模式下红外图像仿真

李金萍, 蔡友林, 刘其涛

(1. 东华理工大学 信息工程学院, 江西 南昌 330013;
2. 江西省放射性地质大数据技术工程实验室 江西 南昌 330013)

摘要: 本文以飞机平台的红外图像为数据源, 研究了不同大气模式下成像高度对红外仿真图像的影响, 推导了随热像仪成像高度变化的辐射亮度计算公式。分别采用 MODTRAN 和 LOWTRAN 两种大气辐射传输模型进行不同高度的红外图像大气修正, 并对所得仿真数据进行了分析比较得出: 在高度低于 20km 时, 同种大气模式下两种模型仿真数据接近, 误差不大, 都很理想; 在高于 20km 时, LOWTRAN 模型仿真数据参考价值不大, MODTRAN 模型结果更接近实际情况、更实用。

关键词: 仿真; 热红外辐射; 大气模式

中图分类号: TP721 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2024)10-1218-06

Simulation of Infrared Images at Different Heights and Atmospheric Modes

LI Jinping, CAI Youlin, LIU Qitao

(1. School of Information Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
2. Jiangxi Radioactive Geology Big Data Technology Engineering Laboratory, Nanchang 330013, China)

Abstract: The atmosphere and imaging height directly affect the infrared image quality of thermal imagers. Using the infrared image of an aircraft platform as the data source, infrared simulation images at different heights and atmospheric modes were studied, and a simulation calculation formula for the height of the thermal imager was derived. By selecting different atmospheric modes, examining MODTRAN and LOWTRAN atmospheric radiation transmission models for infrared image atmospheric correction at different heights, and analyzing and comparing the obtained simulation data, it is concluded that when the distance is less than 20 km, the simulation data of the two models in the same atmospheric mode are close and that the error is small, which is ideal. When the distance was greater than 20 km, the reference value of the LOWTRAN model simulation data was small, and the results of the MODTRAN model were closer to the actual situation and therefore more practical.

Key words: simulation, thermal infrared radiation, atmospheric mode

0 引言

利用 8~12 μm 波段的红外图像进行目标探测是一种非常有效的手段^[1], 在军事和国防中有着广泛应用^[1]。我们知道影响红外成像的因素很多, 包括大气辐射、大气对红外辐射的衰减等^[2], 热像仪得到红外图像的质量既与成像条件(如成像高度、大气条件等)有关, 也与热像仪接收的大气辐射亮度有密切相关。而大气湿度、温度、压强等通常随探测系统作用距离而变化^[3]。对于红外探测系统而言, 作用距离是一个

重要的评价指标, 它反映了红外系统能发现和识别目标的最远距离。国内在红外系统作用距离的研究与我国热成像技术的发展相关, 直到 20 世纪 90 年代, 国内才开始在这方面有一定的研究。王兵学^[4]、贾庆莲^[5]、张乐^[6]、赵煜采^[7]等国内有很多学者在红外系统作用距离上取得了一定研究成果, 但还落后于国外先进水平。大气及成像高度在红外图像仿真中是必须考虑的因素。本文就成像高度以及大气模式对红外图像进行仿真研究。

收稿日期: 2023-10-30; 修订日期: 2023-11-26.

作者简介: 李金萍(1972-), 女, 副教授, 硕士, 主要从事卫星遥感图像处理, 红外图像仿真, 目标特征提取与识别, 数字图像处理算法研究等。E-mail: 379896761@qq.com.

基金项目: 江西省放射性地质大数据技术工程实验室开放基金(JELRGT202103), 江西省核地质数据科学与系统工程技术研究中心开放基金(JETRCNGDSS201806)。

1 图像仿真原理

1.1 图像随热像仪高度变换的模拟原理

根据热辐射传输方程,传感器接收到的单色热辐射亮度值^[8]由3部分组成,即:

$$L_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} L_{b\lambda}(T_s) t_{\lambda} \phi_{\lambda} + L_{a\lambda}^{\uparrow} \phi_{\lambda} + t_{\lambda} \phi_{\lambda} \int_{2\pi} \phi(\Omega' \rightarrow \Omega) L_{a\lambda}^{\downarrow}(\theta') \cos \theta' d\Omega' \quad (1)$$

式中: L_{λ} 为传感器接收到波长的热红外辐射亮度; $L_{b\lambda}(T_s)$ 为地表物理温度为 T_s (单位为 K) 时波长的普朗克黑体辐射亮度; ε_{λ} 为 λ 波长的地表比辐射率; t_{λ} 为 λ 波长从地面到传感器的大气单色透过率; ϕ_{λ} 为传感器在 λ 波长的光谱响应函数; $L_{a\lambda}^{\uparrow}$ 为 λ 波长大气上行辐射; $L_{a\lambda}^{\downarrow}(\theta')$ 为天顶角 θ' 时 λ 波长大气下行辐射; $\phi(\Omega' \rightarrow \Omega)$ 为地表双向反射分布函数; $\int_{2\pi}$ 为积分符号代表半球积分; $d\Omega'$ 为微分立体角。若只考虑大气影响而不考虑分辨率,热像仪高度变化后图像仿真辐射亮度按如下步骤计算:

步骤1): 飞机到地面距离亮度修正

假设载有传感器的飞机平台位于 h_1 处,由公式(1)得出目标黑体辐射亮度为:

$$L_{b\lambda} T_s = \left\{ \frac{L_{1\lambda} - L_{1\lambda}^{\uparrow}}{t_{1\lambda}} - \int_{2\pi} f(\Omega' \rightarrow \Omega) L_{a\lambda}^{\downarrow}(\theta') \cos \theta' d\Omega' \right\} \frac{1}{\varepsilon_{\lambda}} =$$

$$\frac{L_{1\lambda} - L_{1\lambda}^{\uparrow} - t_{1\lambda} \int_{2\pi} f(\Omega' \rightarrow \Omega) L_{a\lambda}^{\downarrow}(\theta') \cos \theta' d\Omega'}{\varepsilon_{\lambda} t_{1\lambda}}$$

步骤2): 地面到仿真平台高度亮度修正

若载有传感器的仿真平台位于 h_2 处,由公式(1)和(2),得出:

$$\begin{aligned} L_{2\lambda} &= \varepsilon_{\lambda} L_{b\lambda}(T_s) t_{2\lambda} \phi_{\lambda} + L_{2\lambda}^{\uparrow} \phi_{\lambda} + \\ & t_{2\lambda} \phi_{\lambda} \int_{2\pi} f(\Omega' \rightarrow \Omega) L_{a\lambda}^{\downarrow}(\theta') \cos \theta' d\Omega' \quad (3) \\ &= \frac{t_{2\lambda}}{t_{1\lambda}} L_{1\lambda} - \frac{t_{2\lambda}}{t_{1\lambda}} L_{1\lambda}^{\uparrow} \phi_{\lambda} + L_{2\lambda}^{\uparrow} \phi_{\lambda} \end{aligned}$$

对(3)式进行波段积分得总辐射亮度为:

$$\begin{aligned} L &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{2\lambda} d\lambda = \\ & \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(\frac{t_{2\lambda}}{t_{1\lambda}} L_{1\lambda} - \frac{t_{2\lambda}}{t_{1\lambda}} L_{1\lambda}^{\uparrow} \phi_{\lambda} + L_{2\lambda}^{\uparrow} \phi_{\lambda} \right) d\lambda \quad (4) \end{aligned}$$

式(4)就是不同高度热像仪成像仿真的辐射亮度

计算公式^[9-10]。

以上(1)~(4)式中飞机平台参数下标为1,仿真平台参数下标为2。

以上推导是假设大气上行辐射 L_{λ}^{\uparrow} 、下行辐射 L_{λ}^{\downarrow} 以及 τ 只与 λ 有关^[11],而与地表温度无关,即在相同大气模式下,不管地表温度是否变化,相同波长在相同的空间范围内大气辐射和大气透过率相同。

1.2 大气模式对图像仿真的影响

在热辐射传输方程公式(1)中,仿真实高度以及大气环境不同,从地面到仿真平台传感器的 t_{λ} 、 $L_{a\lambda}^{\uparrow}$ 和 $L_{a\lambda}^{\downarrow}$ 必然会发生变化,虽然有经验公式可以对其进行计算,而实际环境很难获得公式要求的理想条件,而且随着海拔高度的变化,大气中各成分的含量和浓度都会发生改变,这就带来了计算难度,很难求得。如今随着科技的发展,这样复杂环境的大气透过率和大气辐射亮度主要是借助经典大气辐射传输模型来计算。本文将分别利用 LOWTRAN 和 MODTRAN 两种大气传输模型来模拟计算相应的 t_{λ} 、 $L_{a\lambda}^{\uparrow}$ 和 $L_{a\lambda}^{\downarrow}$ 参数。

随高度以及大气模式不同 t_{λ} 、 $L_{a\lambda}^{\uparrow}$ 和 $L_{a\lambda}^{\downarrow}$ 有明显的变化,图1和图2分别给出了 MODTRAN 和 LOWTRAN 两种大气传输模型的相应参数变化曲线结果图。

2 仿真与实测结果比较

我们实测地点选在牡丹江地区某地,地理位置为东经 129.58°, 北纬 44.60°, 测量日期为 2019 年 9 月 29 日,晴天,天顶角为 0°, 飞机平台 h_1 为 3 km, 红外 8~12 μm 波段。

卫星平台高度 h_2 取 20 km, 采用公式(4)进行数据仿真, 大气透过率和大气辐射亮度参数利用 LOWTRAN 和 MODTRAN 大气传输模型进行计算。为了进行更好的数据结果对比,大气模式分别选择与实测地点纬度临近的中纬度冬季大气、和纬度有一定差距的热带大气两种模式,两种大气传输模型选择的共同参数: 日期选择 2019 年 9 月 28 日, 波段范围: 8~12 μm , 初始高度 0、终点高度 20 km, 天顶角为 0°, MODTRAN 气象主要参数为: 晴天, 乡村消光系数(缺省气象视距=23 km), 地面能见度为 23 km; LOWTRAN 设置主要参数为: 水平等压路径, VIS=23 km 乡村消光系数, 有多次散射, 无云或雨, 地面气象视距使用缺省。

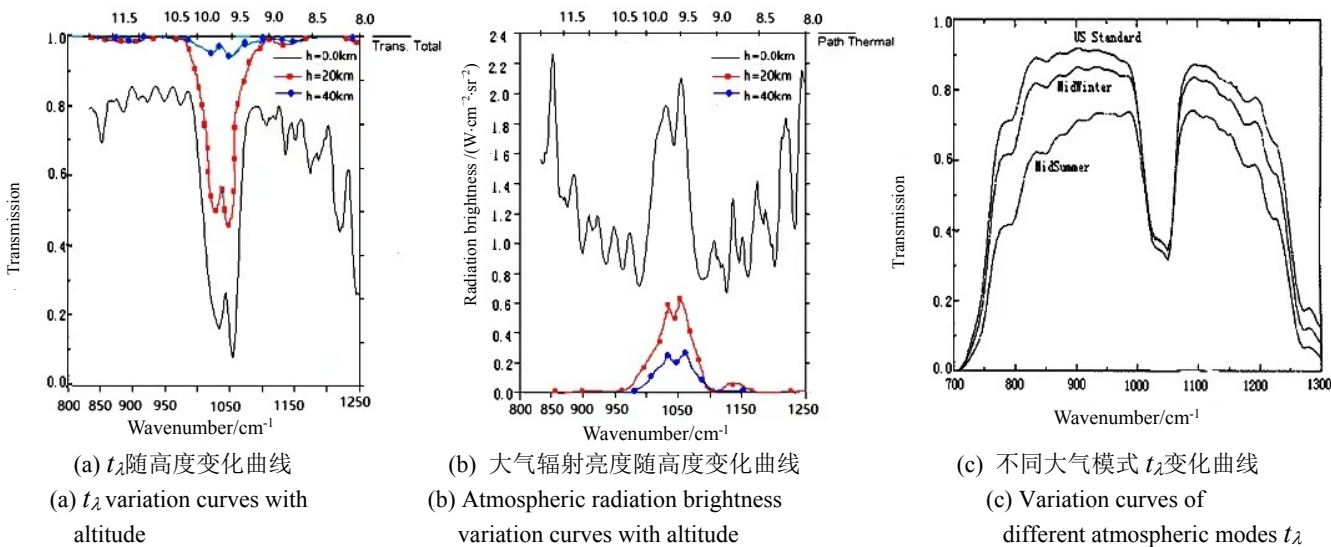


图1 MODTRAN 大气传输模型
Fig. 1 MODTRAN atmospheric transport model

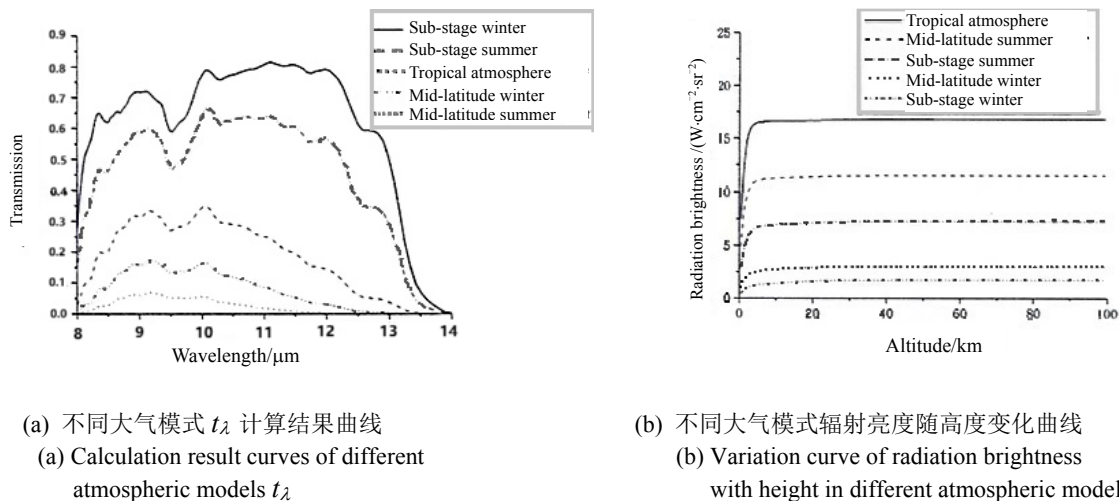


图2 LOWTRAN 大气传输模型
Fig. 2 LOWTRAN atmospheric transport model

比较分析看出，不同大气模式以及不同高度，MODTRAN 和 LOWTRAN 两种模型对大气的透过率和大气辐射都有很大的影响，这必然会影响到仿真图像的效果，因此我们进行图像仿真时，必须设置相应的高度以及指明具体的大气模式。

截取飞机平台获得的图像数据中 272×138 区域 10336 个像素点尝试仿真试验，为了便于数据统计比较，把 272×138 区域划分成 12 个小区块，每个小区块大小为 68×46 。数据仿真结果如表 1 所示。表 1 中第 1 列机载图像辐射亮度数据，是上述每个小区块内所有像素点辐射亮度的平均值，其他列数据是对应的仿真辐射亮度数据值。

通过表 1 可以看出第 1 列机载图像辐射亮度数据和其他列仿真数据相差较大，分析其主要原因如下：实测数据是机载相机接收的辐射亮度数据 L ，可以用

如下公式(5)简单表示：

$$L = \varepsilon B(T) \tau + L_{\text{atm}} \tag{5}$$

式中： L 为飞机传感器接收的总辐射亮度； $B(T)$ 为普朗克函数； L_{atm} 为大气辐射部分； ε 为辐射率； τ 为大气透过率。机载高度 3 km 是在对流层，存在大气成分和气溶胶的严重影响，利用公式(5)计算的 L 值，其结果除了目标辐射亮度部分还包含了 L_{atm} 大气辐射部分；而其他列仿真数据，是经过 MODTRAN 和 LOWTRAN 两种模型修正了大气辐射亮度 L_{atm} 和大气透过率 τ 之后得到的目标辐射亮度数据，因此第 1 列机载图像数据和其他列仿真数据会有差距，而且相差较大。

为了对比两种传输模型在同一种大气模式下，计算的辐射亮度数据之间的误差，我们采用相对误差的标准，相对误差采用如下公式(6)计算：

$$\delta = \frac{(\overline{L_{MODTRAN}} - \overline{L_{LOWTRAN}})}{\overline{L_{LOWTRAN}}} \quad (6)$$

式中： $\overline{L_{MODTRAN}}$ 为经 MODTRAN 传输模型修正后计算的辐射亮度的平均值； $\overline{L_{LOWTRAN}}$ 为经 LOWTRAN 传输模型修正后计算的辐射亮度的平均值， δ 一般用百分数给出， δ 的绝对值越接近 0，表明两者间的误差越小。

对比表 1 数据可以看出，在仿真高度低于 20 km 时，存在如下两种情况：第一，同一种大气模式下，分别利用 MODTRAN 和 LOWTRAN 修正，仿真平台图像辐射亮度数据有所不同（比如第 2 列和第 3 列），存在一定的相对误差，但相对误差很小。理论上讲，结果应该相同，但表中数据并不相同，导致这个结果的主要原因：在计算大气透过率和大气辐射亮度时，MODTRAN 和 LOWTRAN 大气传输模型输入的各种参数条件不能完全相同，它们的光谱范围也不尽相同。第二，采用同一种大气传输模型修正，不同大气模式，修正的大气透过率及大气辐射亮度不同，仿真平台图像辐射亮度数据会有一定的差距（比如第 2 列和第 4 列）。

卫星平台高度 h_2 取 100 km，选择相同的大气模式和参数设置，进行仿真数据计算，所得计算结果如表 2 所示。

通过表 2 可以看出，在仿真高度高于 20km 以上时，同一大气模式下，利用 MODTRAN 和 LOWTRAN 两种模型修正，得到的相同点图像亮度数据差别很大（比如第 2 列和第 3 列），相对误差明显；不同大气模式下，尽管是同一种大气辐射传输模型，计算得到的图像亮度数据差别也很大（比如第 2 列和第 4 列）。

通过对比表 1 和表 2，发现如下情况：

第一，利用 LOWTRAN 大气传输模型修正，得到的相同点图像亮度数据，同一大气模式下（比如中纬度冬季），不同仿真高度（比如表 1 第 3 列和表 2 第 3 列）数据结果相近，从文献[12]可知，在研究利用 LOWTRAN 大气传输模型修正大气透过率和大气辐射亮度二者与海拔高度之间关系时（设置初始高度为 0，终点高度为某一高度，观测天顶角为 0°）得出了如下结论：大气辐射亮度和大气辐射透过率变化趋势虽然相反，但二者在 20km 以上时，基本都不再变化，解释其原因是由于气溶胶和大气主要分布在低层，当高度超过 20km 到对流层，这两项含量很少，对辐射产生的衰减可以忽略不计。这和 LOWTRAN 模型中所用的近似分子谱带模型的限制有关，导致了对流层的大气区域精度严重下降^[13]。然而高于 20 km，大气透过率和大气辐射亮度几乎不变是不符合实际情况的。

表 1 20 km 高度的平台仿真结果
Table 1 Simulation results of 20 km platform

Airborne image radiation luminance data/(W·cm ⁻² ·sr ⁻²)	Simulation platform image radiation brightness data /(W·cm ⁻² ·sr ⁻²)			
	Mid-latitude winter		Tropical atmosphere	
	(MODTRAN)	(LOWTRAN)	(MODTRAN)	(LOWTRAN)
33.62	28.92	28.35	25.8	25.41
33.64	28.93	28.37	25.83	25.43
33.62	28.92	28.35	25.80	25.41
33.64	28.93	28.37	25.83	25.43
33.95	29.21	28.62	26.09	25.68
33.9	29.15	28.58	26.04	25.54
33.93	29.2	28.6	26.07	25.67
33.95	29.21	28.62	26.09	25.68
33.06	28.61	28.33	25.52	25.46
33.04	28.59	28.31	25.47	25.43
33.11	28.69	28.37	25.64	25.6
33.12	28.71	28.39	25.65	25.62
Relative error	1.67%		1.12%	

表 2 100 km 高度的平台仿真结果
Table 2 Simulation results of 100 km platform

Airborne image radiation luminance data/(W·cm ⁻² ·sr ⁻²)	Simulation platform image radiation brightness data /(W·cm ⁻² ·sr ⁻²)			
	Mid-latitude winter		Tropical atmosphere	
	(MODTRAN)	(LOWTRAN)	(MODTRAN)	(LOWTRAN)
33.62	25.26	28.33	22.81	25.4
33.64	25.61	28.36	22.83	25.43
33.62	25.26	28.33	22.81	25.4
33.64	25.61	28.36	22.83	25.43
33.95	26.58	28.59	23.09	25.66
33.9	26.55	28.54	23.04	25.54
33.93	26.57	28.57	23.07	25.65
33.95	26.58	28.59	23.09	25.66
33.06	24.67	28.32	22.18	25.46
33.04	24.61	28.30	22.16	25.43
33.11	24.70	28.38	22.34	25.61
33.12	24.73	28.41	22.35	25.63
Relative error	10.10%		11.00%	

第二，利用 MODTRAN 大气传输模型修正时，同一大气模式下（比如中纬度冬季），不同仿真高度（比如表 1 第 2 列和表 2 第 2 列），辐射亮度数据有一定差距，而且高度越高数据越小。这从图 1 的(a)~(b)可以给出合理解释：图中可以看出，在其他参数不变的情况下，大气透过率和大气辐射亮度与高度有关，在 20km 以上，气溶胶和大气虽然稀薄但依然有一定的影响，所以 20 km 和 100 km 亮度数据一定会有所不同。

通过以上比较分析可以得出，高于 20 km 时，应

用 LOWTRAN 大气传输模型修正的辐射亮度数据参考价值不大，因此高于 20km 时 LOWTRAN 大气传输模型不建议选择，MODTRAN 大气传输模型较适合。

3 仿真图像结果

本文以飞机平台获得的实际图像数据 272×138 像素区域为数据源^[9]，利用 MODTRAN 大气传输模型，选择中纬度冬季和热带大气两种大气模式，进行不同高度平台仿真，仿真图像结果如图 3 所示。

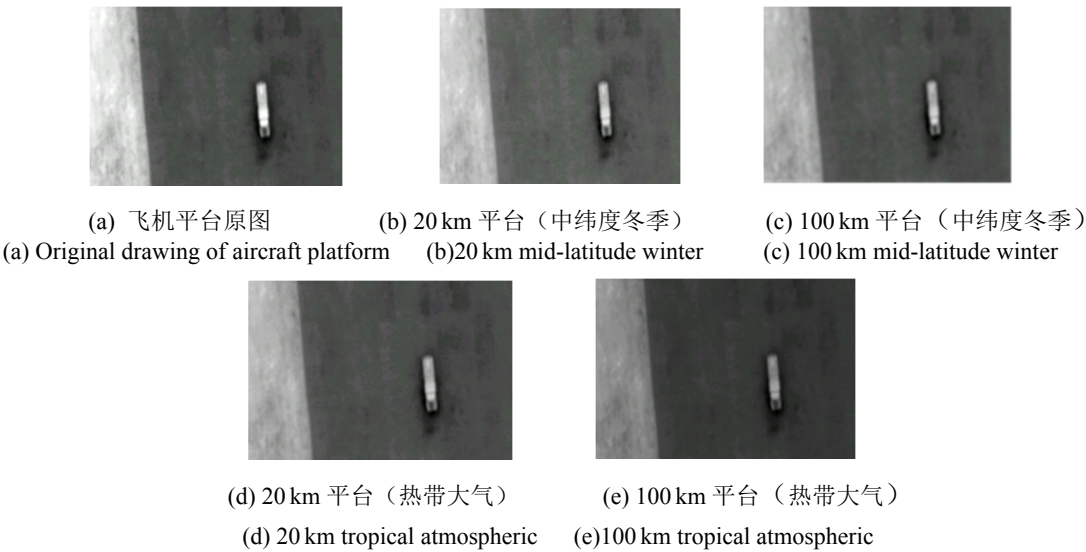


图 3 仿真图像比较

Fig. 3 Simulation image comparison

对比所有图像的明暗度发现,原飞机平台图像(a)偏亮;同一高度仿真平台,不同大气模式(如图中(c)和(e))图像亮度不同,这是由于不同大气模式对仿真数据影响不同;不同高度仿真平台,同一大气模式(如图中(b)(c)或者(d)(e)),100 km平台比20 km平台仿真图像暗一些,这是由于高度越高传感器接收到的辐射亮度会相对越小,图像自然会偏暗一些。这些情况不仅和理论分析相符,和表1、表2的数据也是相符的。

4 结论

本研究推导了红外图像随热像仪高度变换的仿真计算公式,并对大气模式和仿真高度对图像仿真的影响进行了比较分析:①根据地理位置,天气情况等因素的不同,在进行不同高度红外图像仿真时,大气模式必须根据实地情形进行考虑。②在其他主要参数相同,仿真高度低于20 km时,同一大气模式下,利用MODTRAN和LOWTRAN大气传输模型修正的仿真亮度数据相差不大,在误差允许范围内皆可以考虑选用。③仿真高度超过20 km时,LOWTRAN大气传输模型修正的仿真数值参考价值不大,MODTRAN大气传输模型更接近实际情况,因此在高于20 km高度,建议采用MODTRAN大气辐射传输模型。

参考文献:

- [1] 肖甫,吴慧中,肖亮,等.地面坦克目标红外热成像物理模型研究[J].系统仿真学报,2005(11): 2577-2579, 2585.
XIAO Fu, WU Huizhong, XIAO Liang, et al. Research on infrared imaging model of land tank target[J]. *Journal of System Simulation*, 2005(11): 2577-2579, 2585.
- [2] 姚涛,李一凡.场景红外成像仿真原理和应用[J].计算机仿真,2004,21(1): 96-98, 135.
YAO Tao, LI Yifan. Principle and application of infrared imaging simulation for scene[J]. *Computer Simulation*, 2004, 21(1): 96-98, 135.
- [3] 韩涛,朱学光.一种计算大气透过率的方法[J].红外技术,2002,24(6): 51-53.
HAN Tao, ZHU Xueguang. A method of calculating the atmosphere transmissibility[J]. *Infrared Technology*, 2002, 24(6): 51-53.
- [4] 王兵学,张启衡,陈昌彬,等.凝视型红外搜索跟踪系统的作用距离模型[J].光电工程,2004,31(7): 8-11.
WANG Bingxue, ZHANG Qiheng, CHEN Changbin, et al. A mathematical model for operating range of a staring IR search and track system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(7): 8-11.
- [5] 贾庆莲,乔彦峰,邓文渊.周视搜索系统对点目标的作用距离分析[J].光学学报,2009,29(4): 937-943.
JIA Qinglian, QIAO Yanfeng, DENG Wenyuan. Analysis for point-target detection range of panoramic searching system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(4): 937-943.
- [6] 张乐,梁冬明,姚梅,等.红外搜索跟踪系统作用距离等效折算[J].红外与激光工程,2013,42(1): 26-30.
ZHANG Le, LIANG Dongming, YAO Mei, et al. Equivalent calculation of operating range ofIRST[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 26-30.
- [7] ZHAO Y, WU P, SUN W. Calculation of infrared system operating distance by spectral bisection method[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 63(3): 198-203.
- [8] 江飞虹,吴文贤,石岩.机载热红外图像特征的提取与分析[J].烟台大学学报(自然科学与工程版),2007(4): 295-298.
JIANG Feihong, WU Wenxian, SHI Yan. Features extraction and analysis from airborne thermal infrared image[J]. *Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition)*, 2007(4): 295-298.
- [9] 李金萍.机载红外图像转换成卫星仿真图像的大气修正方法研究[J].激光与红外,2023,53(1): 75-78.
LI Jinping. Research on atmospheric correction method of airborne infrared image conversion to satellite simulation image[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(1): 75-78.
- [10] 刘其涛.大气对红外热像仪成像仿真的影响[J].红外,2006(1): 1-4.
LIU Qitao. Influence of atmosphere on simulation of infrared thermal-imager imaging[J]. *Infrared*, 2006(1): 1-4.
- [11] 刘美玲,明冬萍.遥感地学应用实验教程[M].北京:科学出版社,2018.
LIU Meiling, MING Dongping. *Experimental Course on Remote Sensing Geoscience Applications*[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [12] 田杰.目标红外辐射特征与建模仿真技术研究[D].南京:南京理工大学,2016.
TIAN Jie. Research on Target Infrared Radiation Characteristics and Modeling and Simulation Technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [13] 孟凡斌,郑丽.基于LOWTRAN7的红外大气透过率计算方法[J].光电技术应用,2009,24(3): 29-32, 66.
MENG Fanbin, ZHENG Li. LOWTRAN7-based calculation method of IR transmittance in the atmosphere[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2009, 24(3): 29-32, 66.