

低纬度地区红外波段大气透射率研究

寇人可, 王海晏, 吴学铭

空军工程大学航空航天工程学院, 陕西 西安 710038

摘要 低纬度地区、相对湿度较大的大气影响了机载红外搜索跟踪(IRST)系统的作用距离。针对此问题,根据低纬度地区近几年的大气资料,从理论上分析了影响大气透射率的主要因素,重点建立了大气透射率数学模型,修正了高度和斜程对大气透射率的影响;通过 MatLab 软件分别仿真分析了不同季节、不同天气、不同俯仰角以及不同路程和高度时 3~5 μm 波段的大气透射率,与大气透射率计算软件(LOWTRAN7)的仿真结果相比,其误差约为 5%,验证了模型的实效性,从而为指导实际作战使用 IRST 系统提供了理论依据。

关键词 大气光学; 大气透射率; 低纬度地区; 斜程衰减; 距离; 高度

中图分类号 O432.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.010102

Atmospheric Transmittance at Infrared Band in Low Latitude Areas

Kou Renke, Wang Haiyan, Wu Xueming

Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China

Abstract The action range of airborne infrared search and track (IRST) system is affected by the large humidity of atmosphere in low latitude areas. Aiming at this problem, the main factors affecting the atmospheric transmittance are analyzed based on the atmospheric data in low latitude areas in recent years. The mathematical model of atmospheric transmittance is established. The impact of height and oblique distance are also revised. Atmosphere transmittance at the wave band from 3 μm to 5 μm is analyzed by using Matlab under different seasons, weather conditions, pitching angles, heights and distances. Comparing with the simulation results of LOWTRAN7, the error is about 5%, which verifies the effectiveness of the model. The conclusion has significant reference value on guiding the practical operation of IRST system.

Key words atmospheric optics; atmosphere transmittance; low latitude areas; oblique path attenuation; distance; altitude

OCIS codes 010.1290; 010.1320; 130.3060

1 引言

机载光电探测、对抗系统是现代空军的必要补充装备,在高精度目标定位、隐蔽接敌、战场电磁隐身中的作用不可小视。对于机载光电探测、对抗系统来说,目标和背景辐射的红外辐射都要通过大气才能到达红外接收器。由于大气的吸收和散射作用,红外辐射将发生衰减,这对红外系统的探测性能有着直接的影响,特别是在雨、雪、雾、霾等恶劣条件下,衰减尤为严重,从而严重影响机载光电探测、对抗系统的性能。例如,当使用机载红外搜索跟踪(IRST)系统在低纬度地区作业时,这类地区高温多雨、相对湿度较大,故对目标的红外辐射造成严重的衰减,从而影响了机载光电探测系统的作用距离和探测精度。现有关于红外大气透射率影响的研究都是基于理论推导的经验公式,往往忽略了一些影响因素,因而严重影响了计算的准确性。

目前,我国还没有自己的标准大气模式,仅有中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心正在开展此类研究,并自主研发了大气传输软件 CART^[1],但数据库还不是很完善。很多科研工作者依然采用国

收稿日期: 2016-10-09; 收到修改稿日期: 2016-10-11; 网络出版日期: 2016-12-27

作者简介: 寇人可(1992—),男,硕士研究生,主要从事光电探测与对抗方面的研究。E-mail: 365255860@qq.com

导师简介: 王海晏(1968—),男,博士,硕士生导师,副教授,主要从事光电技术原理及应用方面的研究。

E-mail: whh_shx@sohu.com

际上比较成熟的大气传输软件,例如 LOWTRAN, MODTRAN 和 FASCODE^[2],但因我们无法解析国外的大气传输软件内部的数学模型,所以其实际应用有所限制。我国地理环境复杂,大气条件千差万别,用美国标准大气模式进行我国区域内应用场景的红外大气透射率计算会有一定误差,因此本文建立了大气透射率数学模型,并与大气传输软件 LOWTRAN7 的仿真结果进行了对比分析。

2 低纬度地区自然环境参数

根据相关文献^[3-9]报道、书籍^[10-11]记载,以及实地调研、测量考察结果,总结了近几年来我国低纬度地区的自然环境参数,并将其图形化,具体如下。

2.1 低纬度地区地理环境总体变化

地处北纬 $20^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 、东经 $100^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 热带、亚热带地区,面朝东海、南海,濒临世界最大的海洋——太平洋;处于热带海洋气团和极地大陆气团交替控制和相互角逐交绥的地带,属于典型的亚热带季风性湿润气候;年降水量一般在 1000 mm 以上,且主要集中在夏季,冬季较少;气温随季节变化,夏季高温多雨,冬季温和湿润;受水流影响较大,许多河流入海口处形成三角洲;地表水资源丰富,地表径流分布较密集。

2.2 海平面水平路程上水蒸气的光谱透射率 ($0.3\sim 6.9\ \mu\text{m}$)

在低纬度地区,常年高温多雨,相对湿度较大,故水蒸气是影响红外辐射衰减的主要因素。根据所搜集的数据和实际考察结果,将海平面水平路程上水蒸气的光谱透射率数据转化为直观的图形,如图 1 所示。图中给出了波长在 $0.3\sim 6.9\ \mu\text{m}$ 、水平路程为 $0.1\sim 200\ \text{km}$ 时,红外光谱通过水蒸气的透射率。从冷色调到暖色调依次表示 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 km 的水平路程。由图 1 可以看出:1) 距离越近,相对的可降水量越小,其透射率越高;2) 不同波段的透射率变化幅度很大,在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 处的透射率相对较高。

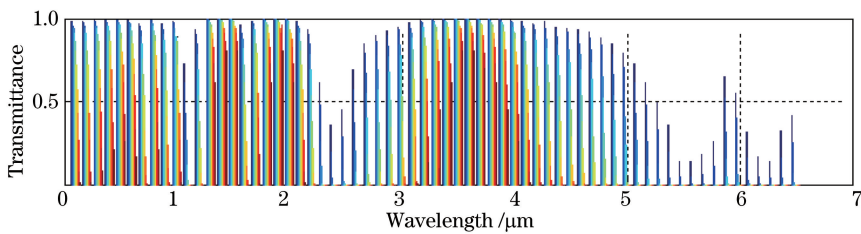


图 1 海平面水平路程上水蒸气的光谱透射率 ($0.3\sim 6.9\ \mu\text{m}$)

Fig. 1 Spectral transmittance of water vapor at horizontal distance of sea level ($0.3\sim 6.9\ \mu\text{m}$)

2.3 海平面水平路程上 CO_2 的光谱透射率 ($0.3\sim 6.9\ \mu\text{m}$)

实验研究证明, CO_2 的密度在大气近表层直到非常高的高空中保持不变,浓度在大气中近似为常数,因而它在大气中的分布随时间的变化很小。根据所搜集的数据和实际考察结果,给出了波长在 $0.3\sim 6.9\ \mu\text{m}$ 、海平面水平路程为 $0.1\sim 200\ \text{km}$ 的红外辐射通过 CO_2 的光谱透射率,如图 2(a) 所示。图 2(b) 展示了 $4.7\ \mu\text{m}$ 处的光谱局部放大图。图中从冷色调到暖色调依次表示 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 km 的水平路程。由该图可以看出:1) CO_2 吸收造成的辐射衰减,与辐射通过的距离有关,随着距离的增加,辐射透射率降低;2) 因为 CO_2 在大气中的浓度近似为常数,它在大气中的分布随时间变化很小,故光谱透射率的变化也很小,对红外辐射传输的影响要小于水蒸气的影响。

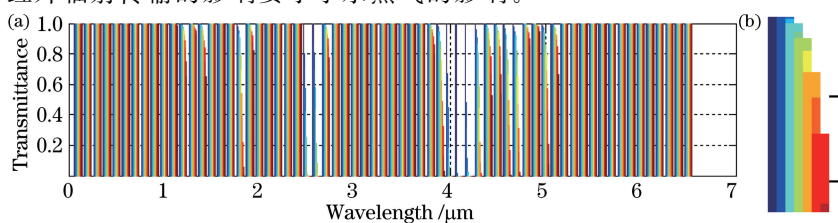


图 2 (a) 海平面上 CO_2 的光谱透射率 ($0.3\sim 6.9\ \mu\text{m}$); (b) $4.7\ \mu\text{m}$ 处的光谱局部放大图

Fig. 2 (a) Spectral transmittance of CO_2 at horizontal distance of sea level ($0.3\sim 6.9\ \mu\text{m}$);

(b) local magnification of the spectrum at $4.7\ \mu\text{m}$

2.4 不同温度下标准大气的绝对湿度

图 3 表示不同温度下标准大气的绝对湿度。由于采集的数据为每隔 1°C 采集 1 次,从而缺少了更为精确的参考数据,故采用 3 次多项式插值,推算出其他温度下标准大气的绝对湿度。由 3 图可以看出:湿度随温度的变化呈指数增长的趋势,湿度随温度的升高而增加,并且随着温度的升高,湿度增加的速率也变快。

2.5 相对湿度 $H_r=100\%$ 时,不同温度下每千米大气中的可降水量

图 4 给出了不同温度条件下每千米大气中可降水量。同样,采用 3 次多项式插值,推算出其他温度下每千米大气中可降水量。由图 4 可以看出:可降水量随温度的变化呈指数增长的趋势,可降水量随温度的升高而增加,并且随着温度的升高,可降水量增加的速率也变快。

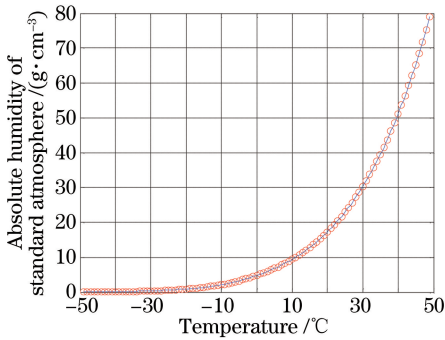


图 3 不同温度条件下标准大气的绝对湿度

Fig. 3 Absolute humidity of standard atmosphere at different temperatures

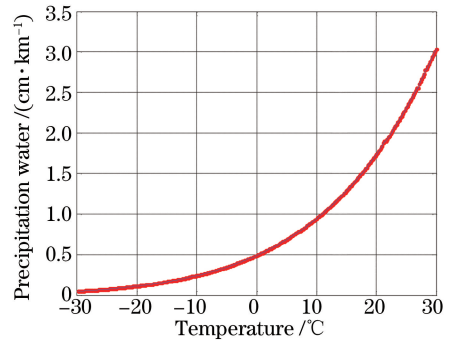


图 4 相对湿度 $H_r=100\%$ 时,不同温度条件下每千米大气中的可降水量

Fig. 4 Precipitation water in per kilometre of the atmosphere at $H_r=100\%$ and different temperatures

3 低纬度地区大气对红外辐射的衰减

在辐射通过大气的过程中,大气对辐射的吸收、散射和气象衰减对热成像系统的影响最显著。在实际应用中,探测器都有一定的响应波段,为了描述在某一波段内的大气透射性质,引入大气的平均透射率^[12-13],可表示为

$$\bar{\tau} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau(\lambda) d\lambda. \quad (1)$$

大气光谱透射率可表示为

$$\tau_a(\lambda) = \tau_1(\lambda) \cdot \tau_2(\lambda) \cdot \tau_3(\lambda), \quad (2)$$

式中 $\tau_1(\lambda)$, $\tau_2(\lambda)$, $\tau_3(\lambda)$ 分别为被吸收、散射和因气象衰减制约的大气透射率。

3.1 海平面上大气对红外辐射的吸收衰减

在低纬度地区,大气中吸收辐射能的主要成分是水蒸气、 CO_2 和臭氧,其中水蒸气和 CO_2 的含量较高,吸收也较强烈。因此,主要考虑水蒸气和 CO_2 的作用,其制约的大气透射率分别用 $\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$ 和 $\tau_{\text{CO}_2}(\lambda)$ 表示,则综合了吸收的透射率为

$$\tau_1(\lambda) = \tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) \tau_{\text{CO}_2}(\lambda). \quad (3)$$

3.1.1 水蒸气的大气透射率 $\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$ 的确定

水蒸气的大气透射率可以转化为每千米降水量的透射率来计算。根据当时飞机所处高度的温度 T 得到绝对湿度 H_a ,这样可得到每千米路程的可降水量 ω_0 ,继而得到实际空气相对湿度下的可降水量:

$$\omega = \omega_0 H_r R, \quad (4)$$

式中 R 为传输距离。

由于水蒸气对辐射的吸收会随温度和气压而变,因此对于高空情况需要进行修正:

$$H'_r = H_r \exp(-\beta_{\text{H}_2\text{O}} H) = H_r \exp(-0.45 H), \quad (5)$$

式中 H 为水蒸气所在高度,修正因子 $\beta_{\text{H}_2\text{O}}=0.45$ 。故可降水量最终结果为

$$\omega_e = \omega_0 RH'_r \beta_{H_2O} = \omega_0 RH_r \exp(-0.45H) \exp(-0.0654H) = \omega_0 RH_r \exp(-0.5154H), \quad (6)$$

式中 ω_e 表示辐射传输路程中按吸收本领折算成大气近地层水蒸气的等效可降水量的有效厚度。

根据已经测得和总结的 ω_e 所对应的大气透射率的值进行插值,便可得到水蒸气在高度为 H 、温度为 T 、传输距离为 R 、波长为 λ 时的光谱平均透射率。然后针对不同波段求解出相应波段的平均透射率 $\tau_{H_2O}(\lambda)$ 。

3.1.2 CO₂ 的大气透射率 $\tau_{CO_2}(\lambda)$ 的确定

$\tau_{CO_2}(\lambda)$ 的求解与 $\tau_{H_2O}(\lambda)$ 相似,不过其插值是根据修正后的距离确定的。吸收本领随高度而改变,对传输距离 R 进行修正,可得

$$R_e = R_H [\exp(-0.123H)] \beta_{CO_2} = R_H [\exp(-0.123H)] (p/p_0)^{1/5} = R_H [\exp(-0.123H)] [\exp(-0.19H)] = R_H [\exp(-0.313H)], \quad (7)$$

式中 R_e 为等效海平面距离, R_H 为高度 H 上的辐射传输距离, p_0 为海平面上的气压, p 为给定高度上的气压, β_{CO_2} 为修正因子。

根据已经测得和总结的 R_e 所对应的大气透射率的值进行插值,求得高度为 H 、传输距离为 R 、波长为 λ 时的光谱平均透射率,然后针对不同波段求解出相应波段的平均透射率 $\tau_{CO_2}(\lambda)$ 。

3.2 大气对红外辐射的散射衰减

大气中传输的辐射通量同样受大气分子散射和微粒散射的双重影响。依赖大气分子微粒散射的光谱系数为

$$\alpha_p(\lambda) = \alpha_v(\lambda_0) \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^q = \frac{3.912}{D_v} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^q, \quad (8)$$

式中 λ_0 取 $0.555 \mu\text{m}$, λ 为红外辐射波长;气象能见度 D_v 表征大气的模糊度:当 $D_v > 50 \text{ km}$ 时, $q = 1.6$; 当 $D_v = 10 \text{ km}$, $q = 1.3$; 如果大气中的霾很厚,以致能见度很差 ($D_v < 6 \text{ km}$) 时,可取 $q = 0.585 D_v^{1/3}$ 。

从而由(8)式求得纯粹由散射导致的透射率为

$$\tau_2(\lambda) = \exp(-\alpha_p R) = \exp\left[-\frac{3.912}{D_v} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^q \cdot R\right]. \quad (9)$$

在仿真时 D_v 为输入变量。

3.3 大气的气象衰减

因为气象(雾、雨、雪)粒子尺寸通常比红外辐射波长大多,所以根据米氏理论,这样的粒子会产生非选择的辐射散射^[10]。与其强度相关的雨、雪的衰减系数可采用经验公式

$$\alpha_y = 0.66 J_y^{0.66}, \alpha_x = 6.5 J_x^{0.7} \quad (10)$$

来计算,式中 J_y 、 J_x 分别为与气象条件有关的降雨、降雪强度,单位为 mm/h 。在没有实测数据的情况下,小雨/雪时取 2.5 mm/h ,中雨/雪时取 12.5 mm/h ,大雨/雪时取 25 mm/h 。

由雨的衰减所导致的透射率为

$$\tau'_3(\lambda) = \exp(-\alpha_y \cdot R). \quad (11)$$

由雪的衰减所导致的透射率为

$$\tau''_3(\lambda) = \exp(-\alpha_x \cdot R). \quad (12)$$

3.4 传输的斜程修正

实际中,由于机载平台对目标的探测存在一定的高度差,因此探测路径一般为斜程探测。由于红外辐射在不同高度大气的透射率不同,则大气斜程透射率计算与水平透射率不同,结合实际情况,建立红外辐射大气斜程传输模型,如图5所示。

在斜程修正问题中,通常是在知道传感器所处位置参数(温度、海拔、相对湿度等)的情况下求一定斜程上的大气透射率,此时沿途是变吸收体。

1) 可降水量的有效总厚度为

$$\omega_e = \omega_0 H_r \int_{S_1}^{S_2} \exp(-0.5154 S \cos \gamma) dS = \omega_0 H_r \frac{\exp(-0.5154 H_1) - \exp(-0.5154 H_2)}{0.5154 \cos \gamma}, \quad (13)$$

式中 $H_1 = S_1 \cos \gamma$, $H_2 = S_2 \cos \gamma$, γ 为海平面法线与辐射传输方向之间的夹角。

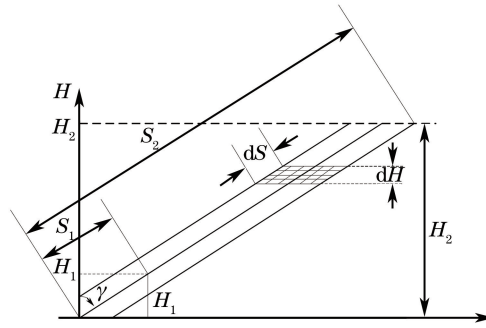


图5 斜程探测示意图

Fig. 5 Schematic of oblique path detection

2) 在倾斜路程的情况下,按 CO_2 的吸收能力折算成大气近地层路程的有效长度的计算公式,类似得到近地层的路程有效长度,对于高度从 H_1 到 H_2 的范围,有

$$R_e = \frac{\exp(-0.313H_1) - \exp(-0.313H_2)}{0.313\cos\gamma} \quad (14)$$

3.5 仿真结果及误差分析

3.5.1 不同季节和仰角下大气透射率比较

如图6所示,夏季的大气透射率相对低于冬季,这是因为夏季大气变化多端,常伴有雨、雾、多云天气,透射率受天气影响很大。从图中可知,红外辐射透射率随高度差 Δh 的增大而减小,当高度差 Δh 大于 20 km 时,透射率随高度差的变化趋于平缓。在一定的高度差下,透射率随仰角的增大而增大,当仰角大于 60° 之后,透射率变化不大,这是符合实际情况的。

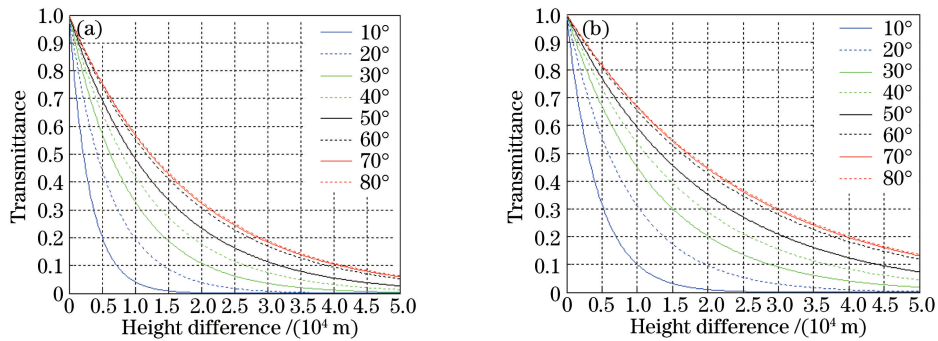


图6 不同高度差和目标仰角下的大气透射率。(a)低纬度-夏季;(b)低纬度-冬季

Fig. 6 Atmospheric transmittance at different height differences and angles. (a) Low latitude, summer; (b) low latitude, winter

3.5.2 高度和距离的变化对大气透射率的影响规律

在设定能见度为 30 km、海平面温度为 20°C 、气象条件为晴朗的条件下,当距离从 0 变化到 30 km、高度从 0 变化到 10 km 的高空时,大气传输透射率的变化规律如图7所示。由图7可得:

- 1) 总体趋势为透射率随距离的加长而减少,随高度的升高而增大,与实际情况相符合;
- 2) 随着高度的升高,在 0~3 km 低空时,大气透射率斜率的变化更明显,这是因为在低空对流层吸收和散射强烈;当在 3~10 km 高空时,透射率斜率逐渐变得平缓,这是因为所处位置越高,受到大气结构影响和天气干扰越小。

3.5.3 不同天气状况时大气透射率的比较

图8给出了晴朗天气、海平面温度为 28°C 的条件下,不同能见度所对应的大气透射率变化规律。由图8综合分析可知:

- 1) 从总体上看,当能见度由 30 km 变化到 5 km 时,随着能见度的降低,大气传输透射率也随之降低。
- 2) 随着能见度降低,透射率随距离的加长,下降得越明显。这是因为能见度越低,各种分子散射、吸收越严重,具有叠加效应,故斜率有所增加。

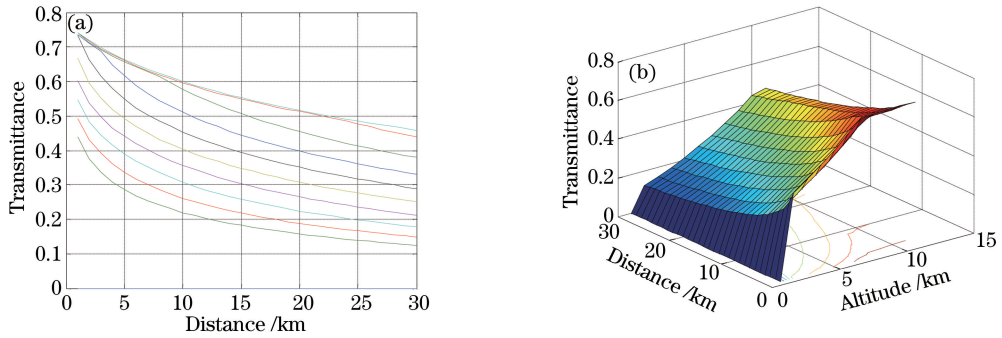


图7 不同距离和高度下的大气透射率。(a)二维图;(b)三维图

Fig. 7 Atmospheric transmittance at different distances and altitudes. (a) Two-dimension diagram; (b) three-dimensional diagram

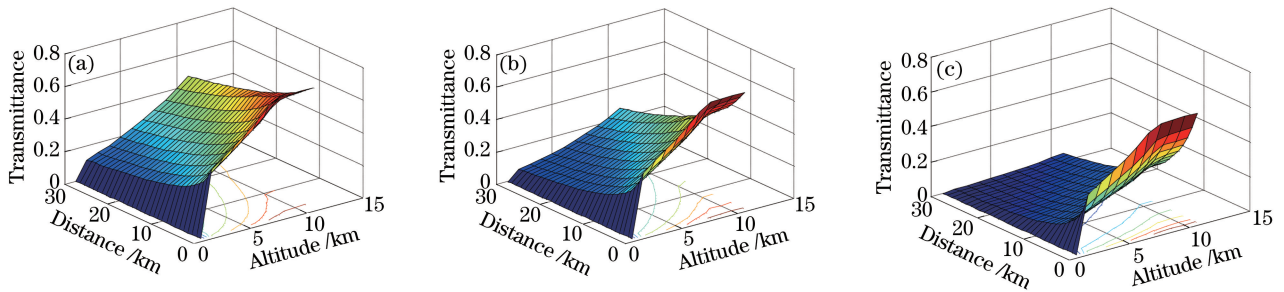


图8 晴朗天气条件下,不同能见度时的大气透射率变化规律。(a) 30 km;(b) 15 km;(c) 5 km

Fig. 8 Change rule of atmospheric transmittance for different visibilities under the clear weather condition.

(a) 30 km; (b) 15 km; (c) 5 km

图9给出了雨雪天气能见度为5 km、海平面温度为20 °C的条件下,不同降雨量所对应的大气透射率。由图9综合分析可知:

1) 从总体上看,随着雨雪量的增大,大气传输透射率也随之降低。

2) 雨雪的衰减十分严重,当雨量从0.5 mm/h到2.5 mm/h、再到12.5 mm/h变化时,最大透射率由0.39变化到0.14,最后变化到0.015。这是因为水蒸气对红外的吸收较大而造成的。故在雨中执行任务时,几乎无法使用IRST系统。

3) 从衰减距离角度来分析,在0~1 km左右,透射率由峰值衰减至几乎为0,在1~30 km已经无法透过。

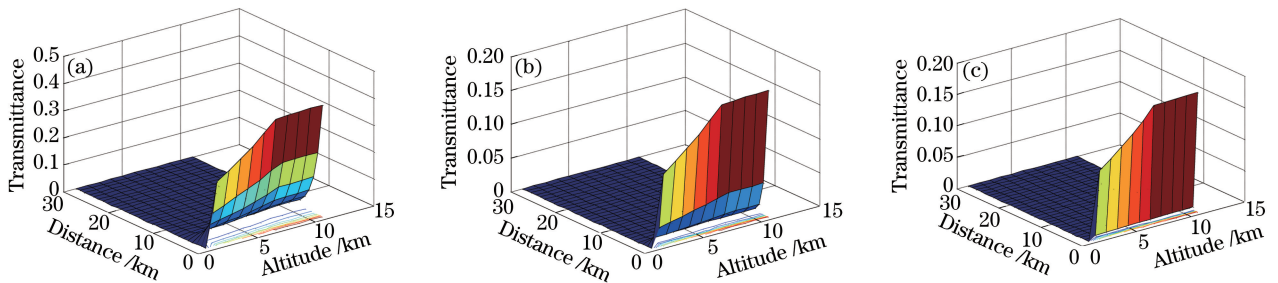


图9 雨雪天气条件下,不同降雨量时的大气透射率。(a) 0.5 mm/h;(b) 2.5 mm/h;(c) 12.5 mm/h

Fig. 9 Change rule of atmospheric transmittance for different rainfalls under rain and snow weather conditions.

(a) 0.5 mm/h; (b) 2.5 mm/h; (c) 12.5 mm/h

3.5.4 与LOWTRAN7大气透射率仿真结果的比较

在LOWTRAN7中的4个卡片中选择相关参数:大气模式选择中纬度夏季,大气路径为水平等压路径,海洋消光系数为23 km,无云或雨,初始高度和终点高度为1 km,路程长度为1 km,波长范围选择3~5 μm。由LOWTRAN7软件仿真得到的大气总透射率的平均值为0.8475,水蒸气的透射率平均值为0.8953,如图10所示。

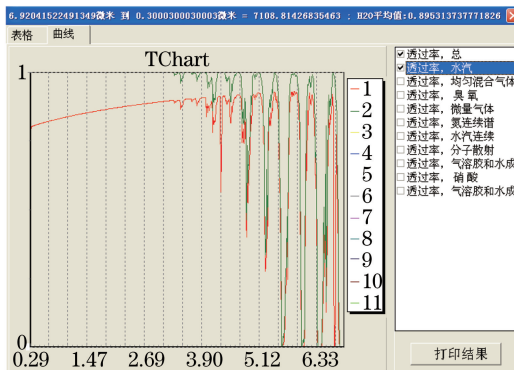


图 10 LOWTRAN7 计算的大气透射率

Fig. 10 Atmospheric transmittance calculated by LOWTRAN7

同理,将相同参数输入到本文所推导的大气透射率数学模型中,得到的大气总透射率平均值为 0.8335,水蒸气的透射率平均值为 0.8864。

改变距离,重复上述操作,分别得到不同大气透射率的值,如表 1 所示。

表 1 不同距离的大气透射率

Table 1 Atmospheric transmittance at different distances

Level of isobaric /km	Average atmospheric transmittance (LOWTRAN7/ Mathematical model)	Average transmittance of water (LOWTRAN7/ Mathematical model)	Error /%
0.5	0.8785/0.8733	0.9029/0.9003	5.9
1	0.8475/0.8471	0.8873/0.8844	4.7
1.5	0.8236/0.8224	0.8769/0.8769	1.4
2	0.8032/0.8011	0.8693/0.8691	2.6
2.5	0.7849/0.7832	0.8633/0.8612	2.1
3	0.7682/0.7681	0.8582/0.8574	1.3
3.5	0.7527/0.7527	0.8539/0.8531	0
4	0.7381/0.7377	0.8500/0.8439	5.4
4.5	0.7243/0.7233	0.8465/0.8455	1.3
5	0.7113/0.7110	0.8434/0.8431	4.2

比较使用 LOWTRAN7 和本数学模型所计算得到的大气总透射率可以发现以下结论:

1) 其误差总体控制在 5% 左右,证明了数据来源的可靠性和模型的正确性。

2) 本文模型计算出的透射率总体要低于 LOWTRAN7 软件计算得到的结果。可能的原因有: 1) LOWTRAN7 计算软件采用的是美国大气的计算模式,与中国低纬度地区的实际情况有一定区别; 2) 本文的模型数据还不是很全面,缺少一些气体透射率的准确值,只能通过插值法得到相应数据; 3) 低纬度地区相对湿度较大,故通过实际得出的数据代入数学模型中得到的结果比 LOWTRAN7 计算的结果偏低。

4 结 论

通过整理近几年低纬度地区自然环境参数,将其数据绘制成图形,得出了低纬度地区气候的一般规律。在此基础上,建立了红外大气透射率数学模型,在模型中考虑了不同高度对温度和气压的影响,以及斜程衰减的影响,并用 Matlab 分别仿真分析了不同高度、角度、距离、季节以及不同天气条件下的大气透射率,讨论了造成不同结果的关键影响因素。为验证模型的实效性,把模型计算结果与 LOWTRAN7 计算结果进行了对比分析,发现其误差在 5% 左右,证明了模型的可靠性。这为指导上述典型作战地区的机载 IRST 系统的使用,提供了理论依据;通过与 LOWTRAN7 大气传输软件的仿真数据的比对并分析误差的原因,为模型的实效性提供重要参考;有利于为进一步研发属于我国自己的标准大气模式,提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] Rao Ruizhong, Qiao Yanli, Wei Heli, *et al.* Research and application on optical properties of atmosphere in typical

- regions of China[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(6): 401-408.
- 饶瑞中, 乔延利, 魏合理, 等. 中国典型地区大气光学特性及其应用[J]. *大气与环境光学学报*, 2007, 2(6): 401-408.
- [2] Zhou Zugang, Wang Weimin, Jiang Yongqiang, *et al.* Analysis of characteristics of coastal zone atmospheric transmission value[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2003, 4(5): 88-91.
- 周祖刚, 王伟民, 姜勇强, 等. 沿海地区大气透过率的特征分析[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2003, 4(5): 88-91.
- [3] Chen Xiuhong, Wei Heli. Variation of infrared atmospheric transmittance based on atmospheric models in typical regions of China[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(11): 1090-1093.
- 陈秀红, 魏合理. 基于中国典型地区大气模式的红外透过率变化特征[J]. *激光与红外*, 2008, 38(11): 1090-1093.
- [4] Qing Chun, Wu Xiaoqing, Li Xuebin, *et al.* Research on simulating atmospheric optical turbulence in typical area[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0501001.
- 青春, 吴晓庆, 李学彬, 等. 典型地区高空大气光学湍流模拟研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0501001.
- [5] Hu Shuai, Gao Taichang, Li Hao, *et al.* Analysis on impact of atmospheric refraction on radiative transfer process at visible and infrared band[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0601005.
- 胡帅, 高太长, 李浩, 等. 大气折射对可见近红外波段辐射传输的影响分析[J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0601005.
- [6] Shi Bo, Li Rui, Liu Chunsheng, *et al.* Research on earth's atmosphere limb background infrared radiation characteristics[J]. *Laser & Optoelectronic Progress*, 2015, 52(12): 120101.
- 史波, 李瑞, 刘纯胜, 等. 地球大气临边背景红外辐射特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(12): 120101.
- [7] Gu Jilin. Research of atmosphere radiation transmission characteristics for the typical weather [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012: 21-93.
- 顾吉林. 典型天气大气辐射传输特性研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2012: 21-93.
- [8] Wang Dan, Sheng Lifang. Analysis of characteristics of sea-surface radiation and its impact factors in east china sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2010, 40(12): 8-16.
- 王丹, 盛立芳. 东海海面辐射特征及影响因子分析[J]. *中国海洋大学学报*, 2010, 40(12): 8-16.
- [9] Kou Tian, Wang Haiyan, Wang Fang, *et al.* Study of infrared detection to hypersonic vehicle based on airborneIRST system[J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(9): 748-752.
- 寇添, 王海晏, 王芳, 等. 基于机载IRST系统的高超音速飞行器红外探测研究[J]. *红外技术*, 2014, 36(9): 748-752.
- [10] Wu Hanping. Infrared search system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 66-106.
- 吴晗平. 红外搜索系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 66-106.
- [11] Zhang Jianqi. Infrared physics[M]. 2nd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2013.
- 张建奇. 红外物理[M]. 2版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2013.
- [12] Zhou Kangkang, Wang Shaoyi, Song Xiaomei, *et al.* Establishment and analysis of calculation model for atmospheric transmittance of infrared radiation[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(9): 1059-1063.
- 周康康, 王少一, 宋晓梅, 等. 红外辐射大气透射率求解模型的建立与分析[J]. *激光与红外*, 2015, 45(9): 1059-1063.
- [13] Zhang Yining, Zhang Haochun, Ma Rui, *et al.* Evaluation of infrared thermal imaging system detection distance in different cloud and rain conditions[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(2): 288-295.
- 张亦宁, 张昊春, 马锐, 等. 不同云雨条件下红外热成像系统作用距离评估[J]. *应用光学*, 2016, 37(2): 288-295.