

文章编号:1001-5078(2016)10-1256-05

· 红外技术及应用 ·

# 基于实测大气参数的水蒸气吸收衰减的仿真计算

宋福印<sup>1</sup>, 路远<sup>1</sup>, 乔亚<sup>1</sup>, 陶会锋<sup>1</sup>, 杨星<sup>1</sup>, 陈杰<sup>2</sup>

(1 解放军电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室红外与低温等离子体安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230037;

2. 安徽建筑大学电子与信息工程学院, 安徽 合肥 230037)

**摘要:**针对红外辐射在大气传输过程中,水蒸气的吸收衰减,只利用经验公式计算,存在较大的误差;利用MODTRAN等专业软件,使用过程复杂且移植和兼容较困难。因此,文中基于实测的大气参数,利用分子单线吸收法计算得到不同温度下的水蒸气吸收系数,拟合各月温度的高度分布解析式;仿真计算了水蒸气的光谱透过率和平均透过率,仿真结果表明,海拔高度、天顶角和传输距离等对水蒸气透过率具有较大影响,本方法计算的水蒸气透过率具有很高的准确度,在工程应用上具有一定的参考价值。

**关键词:**红外辐射;水蒸气透过率;吸收衰减;实测数据

中图分类号:TN211 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2016.10.017

## Simulation and calculation of water vapor absorption attenuation based on measured data

SONG Fu-yin<sup>1</sup>, LU Yuan<sup>1</sup>, QIAO Ya<sup>1</sup>, TAO Hui-feng<sup>1</sup>, YANG Xing<sup>1</sup>, CHEN Jie<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province, State Key Laboratory

of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;

2. Institute of Electronics and Information Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230037, China)

**Abstract:** In calculating infrared radiation transmission, it often has large deviations by only using empirical formula. It is complicated to use MODTRAN and difficult to transplant it to other infrared systems. Therefore, by using molecular single absorption method a new calculating method is proposed based on lots of measured atmospheric data, absorption coefficients of water vapor at different temperatures. The analysis formula of temperature vertical distribution was fitted in different months. Spectrum transmittance and average transmittance were simulated and calculated. The results show that height, zenith angle and distance have great influence on the transmittance of water vapor. The transmittance calculated by the method is accurate and has referent value in the project application.

**Key words:** infrared radiation; water vapor transmittance; absorption attenuation; measured data

### 1 引言

红外辐射大气透过率的计算,对红外探测、红外成像等红外技术的应用具有重要的意义。物体发出

的红外辐射在大气传输中,因吸收散射而衰减,其中水蒸气的吸收衰减是红外辐射在大气传输中重要的衰减因素。

**基金项目:**国家自然科学基金项目(No. 61503394);安徽省自然科学基金项目(No. 1408085QF131, No. 15008085QF121);安徽高校自然科学研究重大项目(No. KJ2015ZD14);脉冲功率激光技术国家重点实验室主任基金项目(No. skl2013zr03)资助。

**作者简介:**宋福印(1993-),男,研究生,主要从事红外及红外技术应用方面的研究工作。E-mail:songfuyin333@163.com

**收稿日期:**2016-01-22

水蒸气的吸收衰减由于我国标准的大气模型并没有建立,目前计算红外辐射传输过程中的水蒸气透过率主要有两种方式:1)利用 LOWTRAN(低分辨率传输)、FASCODE(快速大气信息码)、MODTRAN(中分辨率传输)以及 HITRAN(高分辨率传输)等专业大气传输软件进行计算<sup>[1]</sup>,但是使用软件具有过程复杂、移植困难等缺点;2)利用经验公式和查表法进行粗略的计算,虽然采用此方法具有使用简单、灵活的优势,但是对倾斜路径以及高度的实际大气参数考虑的不全面,使得公式具有一定的局限性。因此,本文基于我国实际的大气参数,利用分子单线吸收法计算吸收系数,拟合温度垂直分布解析式,结合公式计算大气光谱透过率、平均透过率,仿真对比了拟合温度值与实测温度值,准确度比较高;分析了倾斜路径上透过率随传输距离和天顶角的变化情况,对研究水蒸气对红外的作用具有一定的参考价值。

## 2 水蒸气对红外传输吸收衰减的物理基础

分子的带吸收是红外辐射衰减的重要原因。大气中的某些分子具有与红外光谱区域相应的振动-转动共振频率,同时还有纯转动光谱带,因此能对红外辐射产生吸收。其中水蒸气能引起很大的吸收量,这是因为它具有强烈的吸收带,而且水蒸气在大气中都具有相当高的浓度<sup>[2]</sup>。水蒸气在 0.7  $\mu\text{m}$ 、0.8  $\mu\text{m}$ 、0.94  $\mu\text{m}$ 、1.1  $\mu\text{m}$ 、1.38  $\mu\text{m}$ 、1.87  $\mu\text{m}$ 、2.7  $\mu\text{m}$ 、3.2  $\mu\text{m}$  和 6.3  $\mu\text{m}$  附近均有吸收带,能吸收相当一部分太阳辐射和长波辐射能。

计算红外辐射通过一定大气路程长度内水蒸气的光谱透过率,首先要计算出该路程长度内水蒸气的含量,而水蒸气的含量是用可凝水量来计量的。可凝水量,又称为可降水量,是沿着光线方向上所有的水蒸气在与光束有相同截面的容器内凝结成水层的厚度<sup>[3]</sup>,其单位为  $\text{mm} \cdot \text{km}^{-1}$ ,可以通过大气温度和相对湿度计算获得。然后,通过得到的可凝结水量得到水蒸气的光谱吸收系数,进而通过一定距离  $X$  内的水蒸气的光谱透过率:

$$\tau_{\text{H}_2\text{O}} = e^{-\mu(\lambda)X} \quad (1)$$

## 3 基于实测大气参数的计算模型

### 3.1 海平面上水平路程水蒸气的透过率

根据文献[4]得,温度  $T_1$ ,相对湿度  $f_1$  时的吸收系数  $\mu'$  与温度  $T_2$ ,相对湿度  $f_2$  时的吸收系数  $\mu''$  的关

系为<sup>[4]</sup>:

$$\mu'' = A \frac{f_2}{f_1} \mu' \quad (2)$$

其中,  $A$  为温度为  $T_2$  时饱和可凝结水毫米数  $\omega_{T_2}$  与温度为  $T_1$  时的饱和可凝结水毫米数  $\omega_{T_1}$  的比值,  $\omega_{T_2} = A\omega_{T_1}$ ,在文献[3]中给出了大气中的饱和水蒸气量的具体数值,通过查表和利用插值法精确计算得到不同温度所对应的饱和可凝结水量,然后可得  $A$  的值;

根据测量得到的我国地区大气参数,利用分子单线吸收法,经过计算,按照季节性温湿度分布规律,处理得到 2 $^{\circ}\text{C}$  - 86%、9 $^{\circ}\text{C}$  - 80%、16 $^{\circ}\text{C}$  - 62%、23 $^{\circ}\text{C}$  - 70%、31 $^{\circ}\text{C}$  - 82% 下的光谱吸收系数,波长分辨率为 1  $\text{cm}^{-1}$ 。根据温度  $T_2$  的大小可自主选择较近的吸收系数表格,然后利用式(2)计算温度  $T_2$ 、相对湿度  $f_2$  的光谱吸收系数  $\mu_2(\lambda)$ 。知道了传输距离,可利用式(1)计算得到红外在海平面水平方向上水蒸气的光谱透过率。

### 3.2 不同高度上水平路程水蒸气的透过率

水蒸气的透过率与温度和相对湿度紧密有关<sup>[5]</sup>,所以准确地计算不同高空处的水蒸气衰减,需要知道高空中的凝结水量,现在以合肥地区为例,根据大气高空轮廓参数,建立了垂直温湿度数据库,通过对数据的拟合,得出了不同月份垂直温度分布的解析模式:

$$T = -aH + b \quad (3)$$

图1和图2分别为4月和11月份实测垂直温度分布和解析模式温度分布。从曲线可以看出,垂直分布模式能较好地描述实测温度的分布。

根据不同高度值,查询按月统计的湿度高度分布数据库,利用插值法计算出某高度的精确湿度值,利用温度分布式(3)和表1计算温度值,再利用式(2)计算吸收系数,最后利用式(1)计算得到了不同高度水平路程的水蒸气光谱透过率。

### 3.3 倾斜路径上水蒸气的透过率

计算倾斜路径的大气透过率时,由于不同高度的水蒸气的含量不同,所以对红外的吸收效果不同,可以把斜程路径均分  $n$  等分,计算每一小段路径的透过率,总的为各个小段透过率的乘积<sup>[6]</sup>。

设斜程路径如图3所示,图中  $X$  为所要计算的斜程路径,  $\theta$  为斜程与水平路程的夹角。

表 1 不同月份垂直温度分布模式的系数

Tab. 1 Coefficient of vertical temperature distributed model in different month

| 月份 | <i>a</i> | <i>b</i> | 拟合度    |
|----|----------|----------|--------|
| 1  | 4.964    | 5.71     | 0.9813 |
| 2  | 7.025    | 19.38    | 0.9867 |
| 3  | 6.121    | 14.59    | 0.9889 |
| 4  | 6.36     | 25.94    | 0.9963 |
| 5  | 5.439    | 22.68    | 0.9951 |
| 6  | 5.696    | 28.37    | 0.9953 |
| 7  | 5.421    | 28.72    | 0.9977 |
| 8  | 5.324    | 27.36    | 0.9946 |
| 9  | 5.328    | 23.79    | 0.9886 |
| 10 | 3.687    | 8.346    | 0.9433 |
| 11 | 6.305    | 10.91    | 0.9833 |
| 12 | 5.7347   | 9.3679   | 0.9916 |

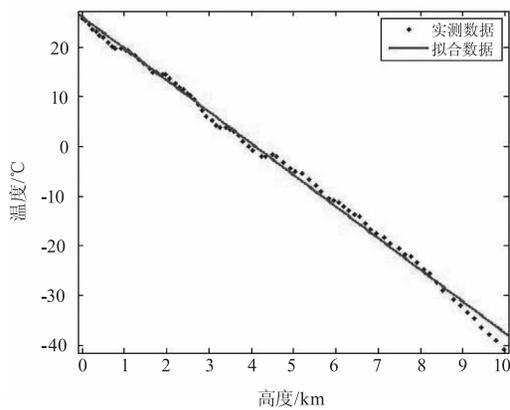


图 1 四月份垂直高度温度分布

Fig. 1 Vertical high temperature distribution in April

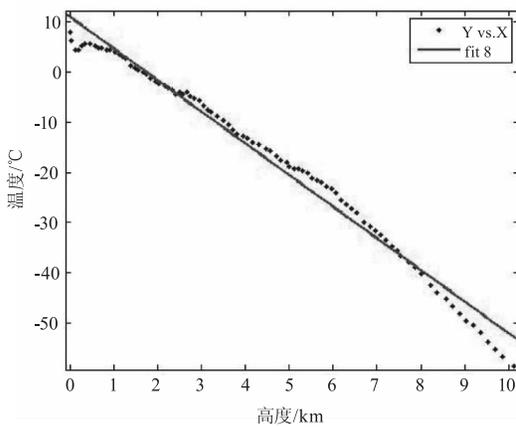


图 2 十一月份垂直高度温度分布

Fig. 2 Vertical high temperature distribution in November

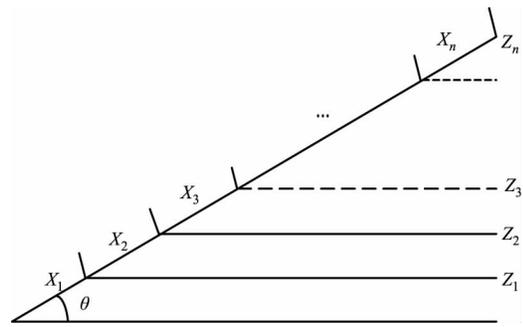


图 3 斜程透射路径示意图

Fig. 3 Sketch map of slanting route

对于图 3 中的斜程路径来说,按等高度 *h* 划分,间隔不能太大,约为 10 m,每一个小段的倾斜路径等效为水平路径,可以认为其衰减系数为该小段中间高度的衰减系数,其衰减系数分别为  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ ;各小段透射距离分别为  $X_1, X_2, \dots, X_n$ ;各小段所对应的高度分别为  $z_1, z_2, \dots, z_n$ ;则斜程总体的透射比为各小段的乘积:

$$\tau = e^{-\mu_1 X_1} \cdot e^{-\mu_2 X_2} \cdot e^{-\mu_3 X_3} \dots e^{-\mu_n X_n} \quad (4)$$

取各小段相等,即:

$$X_1 = X_2 = \dots = X_n = \frac{X}{n} = h/\sin\theta, \text{ 则有:}$$

$$\tau = e^{-(\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n) \cdot h/\sin\theta} \quad (5)$$

把式(2)代入式(5),即可得到:

$$\tau = e^{-(A_1 f_1 + A_2 f_2 + \dots + A_n f_n) \frac{\mu_0 \cdot h}{f_0 \cdot \sin\theta}} \quad (6)$$

其中,  $\mu_0$  为地面上的吸收系数;  $f_0$  为地面上的此时的湿度,在计算每小段的衰减系数时,按照不同高度处水蒸气透过率计算方法,通过循环分别算出每个高度的吸收系数,然后再相加。

#### 4 仿真计算与分析

以合肥地区为例,基于以上计算模型和数据,用 MATLAB 进行仿真,可以对不同高度水平上和倾斜路程上红外辐射传输一定距离的水蒸气透过率进行计算。

##### 4.1 不同高度上水蒸气的透过率

以合肥地区 2014 年三月为例,对不同高度水平路程上 3~5  $\mu\text{m}$  波段红外辐射传输 1 km 后的水蒸气光谱透过率进行仿真,表 2 为不同高度的温度拟合值和实测值的对比,图 4 为三月份从地面到 5 m 高度,水蒸气的光谱透过率的曲线图,为了显示清楚,光谱分辨率定为  $20 \text{ cm}^{-1}$ ,表 3 为地面到 5 km 高度的水蒸气平均透过率。

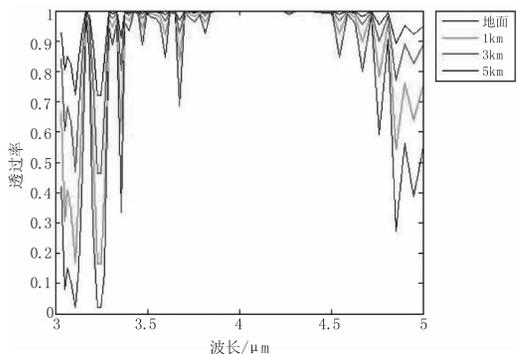


图4 不同高度的水蒸气的中红外光谱透过率

Fig.4 Mid-infrared spectrum transmittance of water vapor in different high

表2 不同高度的温度值

Tab.2 Temperature of different high

| 高度     | 地面      | 1 km   | 3 km    | 5 km     |
|--------|---------|--------|---------|----------|
| 拟合值    | 14.5985 | 8.4693 | -3.7732 | -16.0151 |
| 实测值    | 13.9646 | 8.8405 | -3.6619 | -15.6154 |
| 相对误差/% | 4.53    | 3.79   | 3.04    | 2.56     |

表3 不同高度的平均透过率

Tab.3 Average transmittance of different high

| 高度    | 地面     | 1 km   | 3 km   | 5 km   |
|-------|--------|--------|--------|--------|
| 平均透过率 | 0.8181 | 0.8863 | 0.9441 | 0.9756 |

可以看出,三月份不同高度的温度拟合值与实测温度的相对误差在5%以内,拟合温度解析式能够较好的反映实际温度分布;水蒸气的光谱透过率随着高度的增加,越来越大,在3~3.4 μm和4.8~5 μm波段,曲线峰值的位置明显的上移,在4~4.5 μm波段,水蒸气透过率几乎为1;从地面到5 km高度,平均透过率从0.8181增加到0.9756。

#### 4.2 倾斜路径上水蒸气的透过率

以合肥2014年七月份为例,地面温度为28.5℃,湿度为78%,设天顶角为75°,传输距离为1 km,光谱分辨率为10 cm<sup>-1</sup>,仿真得出斜程的水蒸气光谱透过率曲线图,如图5所示。

倾斜路径上红外辐射的衰减情况与天顶角和传输路径有关<sup>[7]</sup>,分别研究了水蒸气的平均透过率随天顶角和传输距离变化的关系,如图6和图7所示。在地平面上和倾斜路径上,计算水蒸气的平均透过率随不同传输距离的变化值,结果列于表4;设传输距离为5 km,计算水蒸气在不同天顶角下的平均透过率,计算结果列于表5,特

别指出,天顶角为0°时,即为垂直高度上的水蒸气透过率。

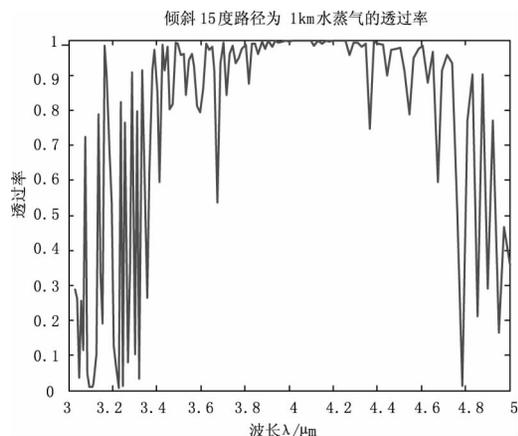


图5 倾斜路径上水蒸气的透过率

Fig.5 The transmittance of water vapor in slanting route

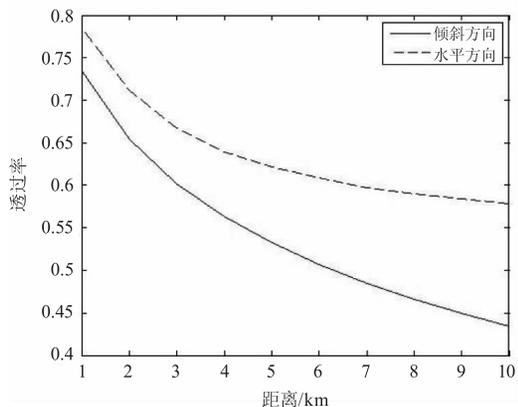


图6 七月份水蒸气平均透过率随传输距离的变化

Fig.6 The change of average transmittance along with route in July

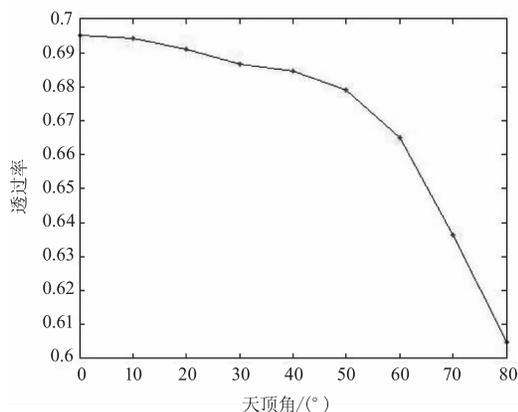


图7 七月份水蒸气平均透过率随天顶角的变化

Fig.7 The change of average transmittance along with zenith angle in July

从曲线图可以看出,传输相同距离,斜程上水蒸气的平均透过率大于地平面上,斜程的水蒸气平均透过率随天顶角的增大而减小,主要是因为随高度的增加,可凝结水量变少了,对红外的吸收少了,透

过率就相应的增加;另外,地平面上的平均透过率随距离的变化程度比倾斜路径上的小,在天顶角 0 ~

50° 区间,斜程的水蒸气的平均透过率变化程度较小,在 50° ~ 80° 区间,变化程度大。

表 4 不同传输距离上水蒸气的中红外波段平均透过率

Tab. 4 Mid-infrared average transmittance of water vapor in different route

| 距离/km | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 水平    | 0.7347 | 0.6539 | 0.6022 | 0.5636 | 0.5326 | 0.5069 | 0.4851 | 0.4661 | 0.4493 | 0.4344 |
| 倾斜    | 0.7849 | 0.7115 | 0.6677 | 0.6386 | 0.6224 | 0.6091 | 0.5975 | 0.5905 | 0.5842 | 0.5787 |

表 5 不同天顶角的水蒸气的中红外波段平均透过率

Tab. 5 Mid-infrared average transmittance of water vapor in different zenith angle

| 天顶角/(°) | 0      | 10     | 20     | 30     | 40     | 50     | 60     | 70     | 80     |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 平均透过率   | 0.6952 | 0.6942 | 0.6911 | 0.6867 | 0.6846 | 0.6791 | 0.6650 | 0.6365 | 0.6048 |

## 5 结束语

在水蒸气对红外的吸收衰减计算方法中,本文采用我国实时的大气参数作为计算基础,对温度进行月平均处理,拟合温度的高度分布解析式,计算结果与实测值的相对误差在 5% 以内,又编制了不同温湿度的吸收系数表,仿真计算了 3 ~ 5 波段不同高度上水蒸气的光谱透过率和平均透过率,分析了倾斜路径上平均透过率随着天顶角和传输距离的增大而变小。文中的工作对红外在大气中传输的研究做了进一步贡献。

## 参考文献:

- [1] ZHOU Guohui, IU Xiangwei, XU Jiwei. A math model of calculate the atmospheric transmittance of infrared radiation[J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(6): 331 - 334. (in Chinese)  
周国辉,刘湘伟,徐记伟. 一种计算红外辐射大气透过率的数学模型[J]. *红外技术*, 2008, 30(6): 331 - 334.
- [2] WANG Chong, WANG Weihua. Summarization on atmospheric transmittance of infrared radiation[J]. *Equipment Environment Engineering*, 2011, 8(4): 73 - 76. (in Chinese)  
王充,汪卫华. 红外辐射大气透过率研究综述[J]. *装备环境工程*, 2011, 8(4): 73 - 76.
- [3] ZHANG Jianqi. *Infrared physics*[M]. 2nd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2013. (in Chinese)  
张建奇. *红外物理*[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2013.

- [4] LU Yuan, LING Yongshun. The simple method to calculate the atmosphere transmittance of infrared radiation [J]. *Infrared Technology*, 2003, 25(5): 45 - 49. (in Chinese)  
路远,凌永顺. 红外辐射大气透射比的简易计算[J]. *红外技术*, 2003, 25(5): 45 - 49.
- [5] 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. (in Chinese)  
陈秀红,魏合理. 基于中国典型地区大气模式的红外大气透过率变化特征[J]. *激光与红外*, 2008, 38(11): 1090 - 1093.
- [6] LU Yuan, LING Yongshun. Simple method calculate the atmosphere transmittance of infrared radiation on slanting route[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(supplement): 423 - 426. (in Chinese)  
路远,凌永顺. 斜程红外辐射大气透射率的简易计算[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(增刊): 423 - 426.
- [7] GAO Sifeng, WU Ping, HE Manli, et al. Estimation on the operating range of infrared system under complex atmosphere condition [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 941 - 944. (in Chinese)  
高思峰,吴平,何曼丽,等. 复杂大气条件下红外系统作用距离的估算[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(6): 941 - 944.
- [8] CHEN Xiuhong, WEI Heli, XU Qingshan. Infrared atmospheric transmittance calculation model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 811 - 816. (in Chinese)  
陈秀红,魏合理,徐青山. 红外大气透过率的计算模型[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(5): 811 - 816.