

引用格式:王婷,徐军,高旸,等.雾中红外辐射传输衰减特性分析[J].电光与控制,2019,26(3):65-68. WANG T, XU J, GAO Y, et al. Analysis on attenuation characteristics of infrared radiation transmitting in fog[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(3):65-68.

## 雾中红外辐射传输衰减特性分析

王婷, 徐军, 高旸, 杨建清, 孙琦云  
(火箭军工程大学理学院, 西安 710025)

**摘要:** 研究雾中红外辐射衰减特性,有助于提高武器装备雾天条件下的红外对抗能力。基于大气辐射传输软件(CART)、Beer-Lambert定律、Mie散射理论和雾滴谱分布函数,计算雾滴粒子群红外辐射透过率,对红外辐射在平流雾和辐射雾中的传输衰减特性进行研究。以近红外辐射 $1.064\ \mu\text{m}$ 、中红外辐射 $3.8\ \mu\text{m}$ 和远红外辐射 $10.6\ \mu\text{m}$ 在轻雾条件下为例,结合3个地区实测数据,分析了能见度、传输距离、入射光波长和晴朗大气透过率计算值对平流雾和辐射雾总透过率的影响。结果显示在轻雾条件下,辐射雾衰减小于平流雾衰减,远红外辐射 $10.6\ \mu\text{m}$ 具有很好的传输性能,地区气象参数不同对其有显著影响。

**关键词:** 红外辐射; 雾滴谱分布; 透过率; CART

中图分类号: TN215 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.03.014

## Analysis on Attenuation Characteristics of Infrared Radiation Transmitting in Fog

WANG Ting, XU Jun, GAO Yang, YANG Jian-qing, SUN Qi-yun  
(College of Science, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** Fog droplet particles have severe absorption and scattering effects on infrared radiation. Researching its attenuation characteristics is important for improving the performance of weapons in fog. Based on the CART software, the Beer-Lambert law, the Mie scattering theory and the spectral distribution function of the particle group of fog droplets, the transmittance of infrared radiation through the fog particle group was calculated. The attenuation characteristics of infrared radiation in advection fog and radiation fog were analyzed respectively. Taking the  $1.064\ \mu\text{m}$  near-infrared radiation,  $3.8\ \mu\text{m}$  mid-infrared radiation, and  $10.6\ \mu\text{m}$  far-infrared radiation in the light fog environment as the example, and by use of the field data from three Chinese regions, the effects of visibility, transmission distance, the wavelength of the incident light, and the transmittance in clear atmosphere on the overall transmittance of advection fog and radiation fog were analyzed. The results show that: 1) Under the condition of light fog, the attenuation in radiation fog is less than that in advection fog; and 2) The  $10.6\ \mu\text{m}$  far-infrared radiation has satisfying transmission performance, on which the regional atmospheric parameters have great influence.

**Key words:** infrared radiation; spectral distribution of fog droplet particles; transmittance; CART

### 0 引言

红外探测技术在现代战争中起着至关重要的作用<sup>[1]</sup>,而目标的红外辐射到达红外探测器成像平面的过程中,都需要经过大气的衰减作用<sup>[2]</sup>。由于雾对红

外辐射强烈的散射和吸收会导致红外探测器作战效能受到很大影响,所以必须对目标的红外辐射量进行修正,计算红外辐射在雾中的透过率<sup>[3]</sup>。研究大气透过率的文献较多、技术也成熟,但针对特殊天气的研究较少,并且多基于国外的MODTRAN,LOWTRAN等软件和美国6种大气模式<sup>[4]</sup>,而简单地套用国外模式,可能带来严重后果<sup>[5]</sup>。相比于MODTRAN,LOWTRAN等软件,我国的CART软件<sup>[6-7]</sup>内置了我国某些地区的大气模式,采用新的分子吸收线HITRAN数据库且光谱

收稿日期:2018-04-16 修回日期:2018-05-16

基金项目:国家自然科学基金(61701505)

作者简介:王婷(1993—),女,辽宁抚顺人,硕士生,研究方向为红外辐射在雾中传输特性。

分辨率达到  $1 \text{ cm}^{-1}$ 。

## 1 雾中红外辐射大气衰减模型

### 1.1 大气透过率

由 Beer-Lambert 定律可知,大气总的透过率是各个部分<sup>[8]</sup>透过率的乘积,由此得红外辐射雾天条件下的单一光谱大气透过率模型为<sup>[9]</sup>

$$T = T_0 T_w \quad (1)$$

式中: $T$ 为雾天大气透过率; $T_0$ 为晴朗大气透过率; $T_w$ 为雾滴粒子群透过率。

$$T_0 = \prod T_i T_n T_{ae} \quad (2)$$

$$T_w = \exp(-\beta x) \quad (3)$$

式中: $T_i$ 表示各大气分子吸收透过率(分别包括  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$  和  $\text{N}_2$ ); $T_n$ 表示全部分子的瑞利散射透过率; $T_{ae}$ 表示气溶胶的衰减透过率<sup>[10]</sup>。

根据 Mie 散射理论<sup>[11]</sup>可知,衰减系数  $\beta$  为

$$\beta = \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 [Q_s(r) + R_c Q_a(r)] n(r) dr \quad (4)$$

式中: $Q_s$ 和 $Q_a$ 分别为散射效率因子和吸收效率因子<sup>[12]</sup>,可由 Mie 散射理论计算得出; $R_c$ 为修正系数<sup>[13]</sup>; $n(r)$ 为雾滴粒子谱分布函数; $r_1$ 和 $r_2$ 分别为雾滴粒子的最小和最大半径。

### 1.2 雾滴谱分布函数

针对稳定状态的雾滴,目前多采用广义 Gamma 分布,此种分布的优点是用单一的能见度即可确定,其表达式为<sup>[14-15]</sup>

$$n(r) = ar^\alpha \exp(-br^\beta) \quad (5)$$

式中: $r$ 是雾滴半径; $n(r)$ 是雾滴谱分布函数,表示单位体积内半径值在  $r$  处单位半径间隔内的相对粒子数; $a, b, \alpha$  和  $\beta$  为确定雾滴尺寸分布的参数。

根据形成雾的地域和机理,雾可分成平流雾和辐射雾两大类。由广义 Gamma 分布可知平流雾和辐射雾的雾滴谱分布如下。

对于平流雾有

$$n(r) = 1.059 \times 10^7 V^{1.15} r^2 \cdot \exp(-0.8359 V^{0.43} r) \quad (6)$$

对于辐射雾有

$$n(r) = 3.104 \times 10^{10} V^{1.7} r^2 \cdot \exp(-4.1220 V^{0.54} r) \quad (7)$$

## 2 雾中红外辐射衰减仿真计算

### 2.1 晴朗大气透过率

以 A 地区为例,首先分析晴朗大气透过率特性,为研究雾天大气透过率做准备。

由于 CART 软件只有在计算斜程透过率时才能自定义大气模式,所以本文用斜程来近似水平。仿真参

数输入:自定义大气模式选择 A 地区,近地面气溶胶模式选择乡村型(MODTRAN),相对湿度为 30%,能见度为 23 km,海拔高度为 0.4 km,观测高度为 1 km,目标高度为 1.001 km,观测天顶角为  $89.988541^\circ$ ,则传输路径长度为 5 km,波段范围选择 1~12  $\mu\text{m}$  红外辐射,步长为 0.01 波数。计算结果如图 1 所示。

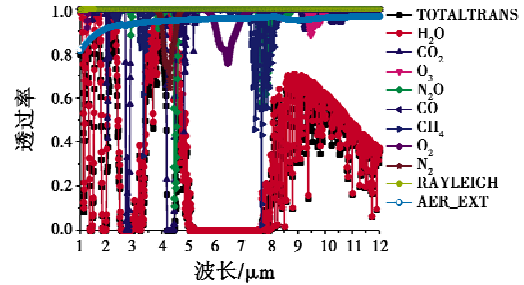


图1 红外辐射大气分子和气溶胶透过率

Fig.1 Infrared radiation atmospheric molecules and aerosol transmittance

由图1可以看出, $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  的吸收和气溶胶消光这3部分是造成大气衰减的主要因素,特别是  $\text{H}_2\text{O}$  造成的影响最为显著。气溶胶消光作用主要来自于气溶胶颗粒对红外辐射的散射。分子瑞利散射造成的衰减可忽略不计。 $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  虽然含量最多,但其在红外波段几乎无影响。

在近红外波段(1~3  $\mu\text{m}$ )和中红外波段(3~5  $\mu\text{m}$ ),各个气体分子的吸收透过率随红外辐射波长的变化较为明显,其对总透过率的影响表现在其特定的吸收峰上。在远红外波段(8~12  $\mu\text{m}$ ), $\text{H}_2\text{O}$  的吸收和  $\text{O}_3$  特定的吸收峰对衰减造成显著影响。

选取代表波长,近红外辐射 1.064  $\mu\text{m}$ 、中红外辐射 3.8  $\mu\text{m}$  和远红外辐射 10.6  $\mu\text{m}$ 。基于 CART 软件,利用某3个地区实测大气数据,计算3个地区在 1.064  $\mu\text{m}$ , 3.8  $\mu\text{m}$  和 10.6  $\mu\text{m}$  波长处的晴朗大气透过率,为计算3地雾天大气透过率做准备。仿真参数输入的自定义大气模式分别选择 A, B 和 C 3地,其他参数不变,计算结果如表1所示。

表1 某3个地区晴朗大气透过率  
Table 1 Clear atmospheric transmittance in three areas

地区	波长 1.064 $\mu\text{m}$	波长 3.8 $\mu\text{m}$	波长 10.6 $\mu\text{m}$
A	0.768040	0.858477	0.621038
B	0.767846	0.792110	0.685026
C	0.768380	0.820626	0.409857

### 2.2 雾滴粒子群透过率

为了分析红外辐射在平流雾和辐射雾中的衰减特性,本文以在轻雾(能见度 1~10 km)条件下为例。利用平流雾和辐射雾的雾滴谱分布函数,和由 Mie 散射

理论计算得到的消光截面,选择辐射传输长度为5 km,根据式(3)、式(4)、式(6)和式(7)得到平流雾和辐射雾雾滴粒子群透过率与能见度之间的关系,如图2所示。

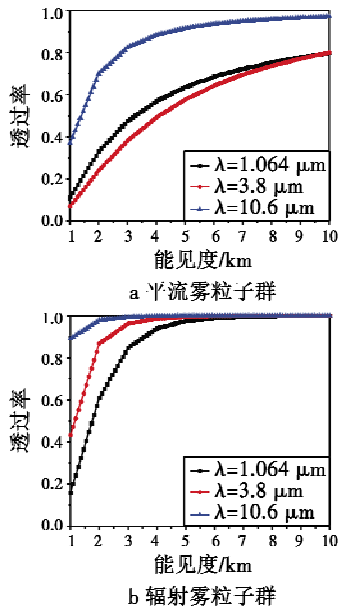


图2 传输距离为5 km,平流雾和辐射雾粒子群透过率

Fig. 2 Transmittance of droplet particle group in advection fog and radiation fog when transmission distance is 5 km

由图2可知,当能见度相同时,在平流雾中,远红外辐射10.6 μm的透过率明显大于近红外和中红外,近红外辐射1.064 μm略大于中红外辐射3.8 μm。在辐射雾中,远红外辐射10.6 μm > 中红外辐射3.8 μm > 近红外辐射1.064 μm。且随着能见度的增加,平流雾的雾滴粒子群透过率逐渐增加,辐射雾的雾滴粒子群透过率呈指数增加,并且在能见度大于5 km以后趋于1。综合两图可知,随着能见度的增加,雾滴谱透过率均增加,辐射雾的衰减小于平流雾,且远红外辐射10.6 μm具有非常好的传输性能。

为了分析传输距离对红外辐射的影响,取能见度为1 km,根据式(3)、式(4)得到雾滴粒子群透过率与传输距离之间的关系,如图3所示。

由图3可知,随着传输距离的增加,两种雾滴粒子群透过率均减小,远红外辐射10.6 μm透过率明显大于近红外和中红外。在平流雾中,近红外辐射1.064 μm > 中红外辐射3.8 μm,但较为接近。在辐射雾中,近红外辐射1.064 μm < 中红外辐射3.8 μm,且3种波长的透过率差距较大。综合两图可知,辐射雾的衰减明显小于平流雾,且远红外辐射10.6 μm具有非常好的传输性能。

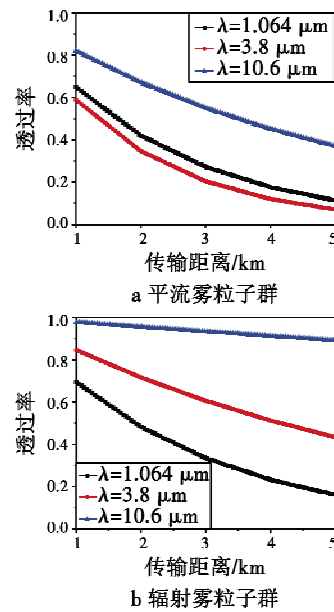
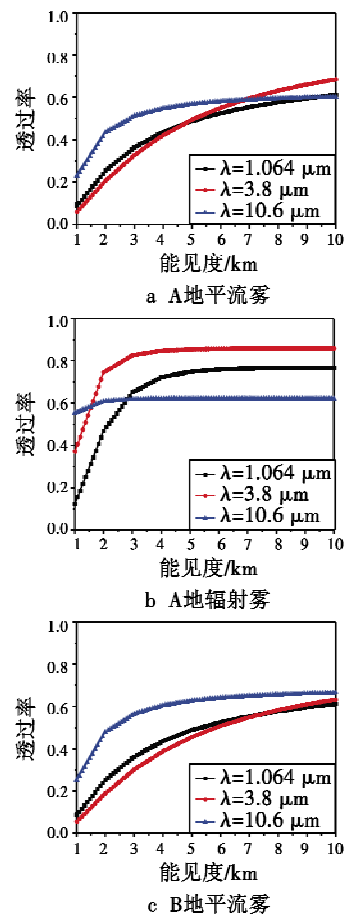


图3 能见度为1 km,平流雾和辐射雾粒子群透过率  
Fig. 3 Transmittance of droplet particle group in advection fog and radiation fog when visibility is 1 km

### 2.3 不同地区雾天大气透过率

由表1的A,B和C3地的晴朗大气透过率值和仿真得到的雾滴粒子群透过率,根据式(1)计算不同地区下的雾天大气透过率,如图4所示。



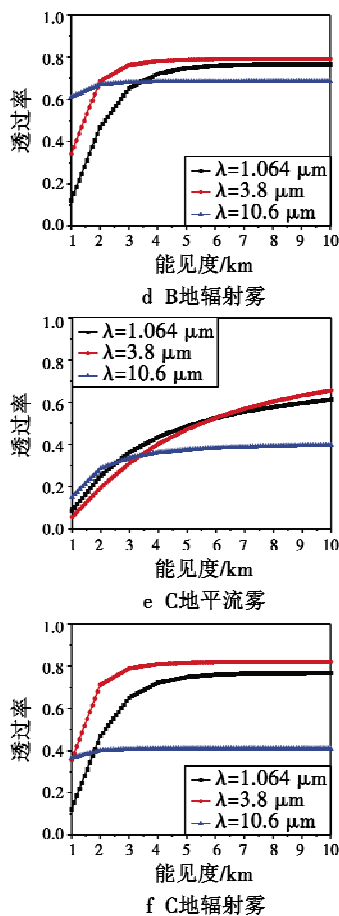


图4 A,B,C地区平流雾和辐射雾透过率  
Fig. 4 Transmittance of advection and radiation fog  
in three areas

由图4可知,3个地区的晴朗大气透过率值不相同,导致平流雾和辐射雾的衰减情况发生变化,与直接利用雾滴谱分布函数得到的透过率有明显不同,其中,近红外辐射 $1.064\ \mu\text{m}$ 和中红外辐射 $3.8\ \mu\text{m}$ 受到的影响较小,远红外辐射 $10.6\ \mu\text{m}$ 受到地区的影响较大,这主要与不同地区水汽含量不同有关,而远红外辐射 $10.6\ \mu\text{m}$ 的透过率值在水汽含量较多时衰减较大。因此,在研究平流雾和辐射雾的衰减特性时,除考虑能见度、传输距离、辐射波长等影响外,考虑不同地区的晴朗大气透过率值,即不同地区的气象参数是十分必要的。

### 3 结束语

本文基于CART软件,创新地采用雾滴谱经验公式结合地区晴天大气透过率的方法,计算雾天大气透过率,对红外辐射在轻雾条件下的衰减进行研究。结果表明, $\text{H}_2\text{O}$ 是造成大气衰减的最主要因素,其他气体分子的影响主要体现在特定的吸收峰上。随着能见度的增加,雾的透过率增大,辐射雾的增大速度大于平流雾。随着传输距离的增加,雾的透过率逐渐减小,辐射

雾的衰减小于平流雾。远红外辐射 $10.6\ \mu\text{m}$ 较其他两种辐射具有非常好的传输性能,但这一结果受地区气象参数的影响较大。

### 参考文献

- [1] 龚海梅,邵秀梅,李向阳,等. 航天先进红外探测器组件技术及应用[J]. 红外与激光工程,2012,41(12): 3129-3140.
- [2] 张雪,梁晓庚. 红外探测器发展需求[J]. 电光与控制,2013,20(2):41-45.
- [3] 杨建清,罗积军,徐军,等. 基于大气环境实验方舱的可见光图像增强研究[J]. 激光与光电子学进展,2017,54(10):239-245.
- [4] 赵帅阳,景欣,张飞舟,等. 中波红外大气透过率特性分析[J]. 激光与红外,2017,47(5):568-574.
- [5] 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.
- [6] GORDON I E, ROTHMAN L S, HILL C, et al. The HITRAN2016 molecular spectroscopic database[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2017, 130(11):4-50.
- [7] 戴聪明,魏合理,陈秀红. 通用大气辐射传输软件(CART)分子吸收和热辐射计算精度验证[J]. 红外与激光工程,2013,42(1):174-180.
- [8] 饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [9] 杨建清,罗积军,徐军,等. 基于雨滴谱分布数据库的近红外辐射衰减研究[J]. 激光技术,2017,37(14): 1012-1017.
- [10] 臧永强,王仕成,刘志国,等.  $1.064\ \mu\text{m}$ 激光制导半实物仿真大气衰减模型研究[J]. 电光与控制,2012,19(9):17-22.
- [11] BOHREN C F, HUFFMAN D R. Absorption and scattering of light by small particles (Wiley science paperback series)[J]. Optics & Laser Technology, 1998, 31(1): 328.
- [12] 曾祥伟,褚金奎,康维东. 红外圆偏振光透雾性能分析[J]. 红外与激光工程,2017,46(12):93-98.
- [13] MALLET C, BARTHIES L. Estimation of gamma raindrop size distribution parameters: statistical fluctuations and estimation errors[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2008, 26(8):1572-1584.
- [14] 赵振维,吴振森,沈广德,等. 雾对 $10.6\ \mu\text{m}$ 红外辐射的衰减特性研究[J]. 红外与毫米波学报,2002,21(2):95-98.
- [15] 任宏光,丁海山,霍力君,等. 激光引信云雾散射回波的近似算法与应用分析[J]. 电光与控制,2015,22(7):52-56,78.