

# 红外辐射大气透过率研究综述

王充, 汪卫华

(解放军炮兵学院, 合肥, 230031)

**摘要:** 随着红外技术的不断发展和在军事上的广泛运用, 红外辐射在大气中的传输研究越来越受到关注。大气透过率是研究红外辐射传输的重要参数。基于红外辐射大气传输的基本理论结合近年来国内外的研究成果, 从理论研究和软件平台2个方面对计算大气透过率的研究进展进行了综述, 并探讨了复杂气象条件对大气透过率的影响, 最后进行了总结和展望。

**关键词:** 红外辐射; 大气透过率; 吸收; 散射

**中图分类号:** TN211      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2011)04-0073-04

## Summarization on Atmospheric Transmittance of Infrared Radiation

WANG Chong, WANG Wei-hua

(Artillery Academy of PLA, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Along with the development of infrared technology and extensive application on military affairs, more and more attention was focused on the study of infrared radiation transmission. Atmospheric transmittance is the important parameter of infrared radiation transmission research. The development and actuality of atmospheric transmittance calculation was summarized from the aspects of theory and software platform based on infrared radiation transmission's theory and recent research production. The influence of complex weather on infrared radiation transmission was discussed.

**Key words:** infrared radiation; atmospheric transmittance; absorb; scattering

红外辐射大气透过率的计算是红外技术研究的重要内容之一。所有物体发出的辐射都要经过大气的衰减才能到达红外光学系统, 这是整个系统中必不可少的一个重要环节。特别是随着红外侦察和红外制导技术的广泛应用, 对红外辐射大气透过率问题的研究有助于完善和提高武器装备的红外对抗手段。然而, 这方面的研究目前在军事上的运用还不

够成熟和完善, 而且复杂环境条件下红外辐射大气透过率的计算问题比较复杂, 需要深入探讨。

## 1 基本理论

目标红外辐射通过大气到达红外探测器的过程是非常复杂的, 在这个过程中辐射能会受到大气中

收稿日期: 2011-01-12

作者简介: 王充(1987—), 男, 江西人, 硕士研究生, 主要研究方向为战场情报获取与处理。

各种因素的影响而衰减,衰减的程度可以用大气透过率来衡量。大气透过率就是根据大气中各种分子对红外辐射吸收和散射造成的衰减来计算的。在计算大气透过率的时候一般分为2个过程:大气分子的吸收和大气分子以及气溶胶的散射。

计算大气分子吸收所决定的大气透过率一般有以下几种方法:根据光谱线参数,逐条进行理论计算;根据带模型和有效的实验测量或实际谱线资料,进行理论计算;直接利用实验仪器进行测量;在实验室模拟大气条件进行测量。红外辐射在大气传输的过程中会遇到分子密度的起伏以及各种微粒,使得传输方向改变,从而导致某一特定方向上的辐射能减弱,即散射<sup>[1]</sup>。计算大气的散射衰减必须解决的基本问题是确定散射随辐射波长、方向角以及散射物的特性和尺寸的变化关系,可以得到3种处理方法,即 Rayleigh 散射、Mie 散射和无选择性散射。

## 2 国内外研究现状

早期计算大气透过率的主要方法是查表法<sup>[2]</sup>。这种方法对大气传输模型做了大量简化,由于计算繁杂、精度较差,现在已经很少使用。常用的大气透过率计算途径有2种:1)利用专业计算软件进行精确计算;2)利用经验公式进行粗略估算。专业计算软件计算精度较高但使用复杂,且难以在红外系统仿真软件中直接调用其计算结果。采用经验公式计算大气透过率具有使用简单、灵活且易于编程实现的优点,更适合在自制仿真软件中使用。现有经验公式未能综合考虑倾斜路程以及高度等工程因素的影响,使得公式具有一定的局限性<sup>[3]</sup>。

### 2.1 国外研究现状

国外很多军事强国特别是美国很早就开展对红外辐射传输方面的研究,在红外辐射大气透过率计算方面发展很快,主要体现在理论研究和对应软件开发上都取得了很大进展。目前国际上比较成熟的大气传输软件有 LOWTRAN, MODTRAN 和 FASCODE。随着计算机技术不断发展和计算模型、算法不断完善,以及大气实验和气象探测为大气模型的建立提供了丰富的数据,大气透过率的计算精度也在日益提高。

LOWTRAN 所涉及的算法主要是基于实验室内的透过率测量数据,并进行理论计算。该软件属于低分辨率的大气传输软件,光谱分辨率为  $20 \text{ cm}^{-1}$ 。因为 LOWTRAN 没有考虑非局部热力学平衡,所以不适用高空大气,适用高度在  $30 \text{ km}$  以下。MODTRAN 是由美国空军菲利普实验室经过长达  $25 \text{ a}$  的研究开发出大气传输软件,改进了 LOWTRAN 的光谱分辨率,将光谱的半宽度由  $20 \text{ cm}^{-1}$  减少到  $2 \text{ cm}^{-1}$ ,发展了一种  $2 \text{ cm}^{-1}$  分辨率的分子吸收算法,维持了 LOWTRAN7 的基本程序和结构,对一些分子进行重新处理<sup>[5]</sup>。MODTRAN 也没有考虑非局部热力学平衡,属于中分辨率传输软件,仅仅适用于红外波段<sup>[6]</sup>。FASCODE 考虑了非局部热力学平衡的选择,可以处理波谱范围更宽的粒子散射问题。FASCODE 软件对所包含的模型大气做出了最佳分层,已经达到辐射出射度和透过率计算的特定精度,属于一种高分辨率逐线计算的软件。因为该软件可进行逐根光谱线计算,所以非常适合计算单色波长和激光大气传输透过率问题。

### 2.2 国内研究现状

国内很多文献都是基于理论推导出经验公式来进行大气透过率的计算,为了计算方便,忽略了一些影响因素,其计算结果与专业软件对比,精度很难达到实践要求。当辐射传输路径是斜程时,运用经验公式来计算大气透过率就比较复杂,因为大气压强是随着高度变化而变化的,同样其他的影响因素也是不断变化的,大气透过率不再是一个固定值。路远<sup>[7]</sup>在计算高空红外辐射斜程传输的大气透过率时,对计算模型进行了一定的修正,提出了分段等效的方法。其原理如图1所示。

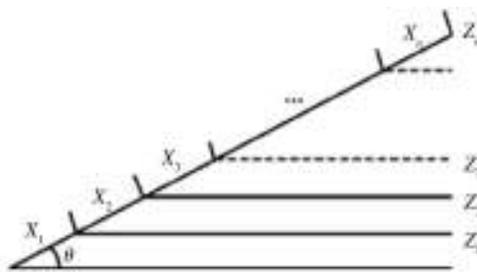


图1 斜程透视路径示意

Fig. 1 Sketch map of inclined transmission

具体方法是将沿途分成  $N$  个小段,设每个小段

的路径衰减系数为常数,则斜程总体的透射比为各小段的乘积。在垂直方向上对大气层进行均匀分层,分层计算垂直方向大气透过率,根据角度转换关系可以求得任意角度斜程方向上的大气透过率。该方法只考虑压强降低对透射率的影响。

通过实验的方法也可以测量大气透过率。通过野外测量的实验结果可以得到透过率随程长、气象条件变化的经验关系式;实验室模拟测量可以通过增加气体浓度来模拟长程气体的吸收。一般远场测量大气透过率,主要利用红外探测器对已知辐射特性的标准辐射源在不同距离上进行测量,将测量值与标准源真实辐射值对比,比值就是该距离上的红外辐射大气透过率<sup>[8]</sup>。然而,野外测量工作量大,所耗经费多;实验室模拟测量也难以模拟出真实大气条件,数据的可靠性不高。

目前我国还没有发展自己的标准大气模式,很多科研工作者采用国外的大气模式来进行近似计算,然而由于地域的差异,国外的模式并不一定适用于我国。中科院安徽光学精密机械研究所的饶瑞中<sup>[9]</sup>在文献中提出:简单套用外国的模式不仅在技术上不可靠,而且会产生不同层面的误导作用,甚至可能带来严重后果。为此,国内部分科研工作者开始研究发展自己的大气辐射传输模式,在算法和计算精度上都有很大的创新和提高。中科院安徽光学精密机械研究所在这方面的研究进展较快,在原有的基础上不断推陈出新,以下3种计算模式是相对成熟的:快速高效的逐线积分大气吸收计算模式——ZS000<sup>[10]</sup>,新型大气辐射模式<sup>[4]</sup>,通用大气辐射传输软件CART<sup>[11]</sup>,其中新型大气辐射模式是在ZS000的基础上开发出的一种新型的大气辐射模式。CART软件是中科院的魏合理研究员和陈秀红博士等研制开发的大气辐射传输模式计算软件,该软件大气模式中增加了我国典型地区的逐月平均的大气模式,能更适用于我国区域内的应用场景的研究,计算效率高,精度相比MODTRAN有所提高。

### 3 特殊天气对透过率的影响

#### 3.1 大气湍流对透过率的影响

大气湍流是大气分子团在三维空间中的一种

随机运动<sup>[12]</sup>,是红外辐射传输所面临的一个重要而现实的问题。引起大气湍流的因素是多方面的,其中主要的是空气的温度、湿度、压强和密度的不均匀性。当红外辐射遇到大气湍流时,光束强度、频率、相位、偏振度和到达角都将受到湍流的影响,产生抖动<sup>[13]</sup>。由于大气湍流对于红外辐射的影响比较复杂,在仿真过程中很难实现。因为大气湍流的存在导致了大气折射率的随机变化,这些变化的累积综合效应使得大气透过率表现出明显的不均匀性。当红外辐射通过大气湍流传输时,将会影响到红外系统的工作效率和质量,特别是对主动式红外系统和激光系统来说非常不利,因为它们将直接影响跟踪精度和命中率<sup>[14]</sup>。对于大气湍流对红外传输的影响,国内外很多科研工作者在理论分析及仿真方面已经进行了深入研究。由于湍流的随机性和复杂性,使得实验难度加大,实验研究方面要相对滞后一些。

#### 3.2 沙尘暴对透过率的影响

从目前的研究现状来看,在晴朗的天气已经能够利用气象参数比较科学地预测红外辐射的大气传输特性,降雨对红外辐射的衰减影响也进行过比较系统的研究,但是对于特殊天气的影响,人们关注得还是不多,相关性研究、文献资料很少。近年来,环境的恶化造成北方很大部分地区沙尘暴肆虐,因此十分需要沙尘对红外辐射传输影响的定量数据<sup>[15]</sup>。

文献[15]通过对沙尘粒子的单粒子散射、消光和吸收效率进行数值模拟,研究了不同粒径的沙尘粒子在不同红外辐射波长情况下的消光和吸收的特点。同时对3种典型的沙尘天气(浮尘、扬沙和沙尘暴)时的红外大气窗口辐射的吸收系数和消光系数以及信号衰减进行了计算,得出了沙尘暴天气对红外辐射具有显著的吸收和衰减的结论,其衰减的峰值位于 $2 \sim 2.6 \mu\text{m}$ 和 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 。

李学彬<sup>[16]</sup>在2008年的时候根据北京的一次沙尘暴数据,计算了沙尘对可见光和红外波段的消光特性,得出的数据和图表形象客观地证明了沙尘暴天气对红外辐射衰减的加剧,其衰减系数是正常天气条件下的 $5 \sim 6$ 倍。在垂直方向上,这次沙尘暴的沙尘粒子主要集中在 $1.2 \text{ km}$ 以下的大气中,其衰减系数大约是正常天气条件下的10倍。

### 3.3 云/雾/雨对透过率的影响

云/雾/雨对红外辐射的传输会产生很大的影响,国内外对这方面的研究有一定的成果<sup>[17]</sup>。云和雾对红外辐射的吸收和散射衰减,取决于微粒的浓度、尺寸分布、折射率和云/雾层的厚度。不同种类的云和雾,具有不同的光学结构和光学性质,加之在不同地理条件、高度和季节,可能会有不同的尺寸及浓度分布,因此,对红外辐射透过率的影响也是不同的<sup>[18]</sup>。侯文学<sup>[19]</sup>用理论阐述了水雾对红外光谱的遮蔽衰减特性,运用朗伯-比尔定律和Mie散射理论分析计算了红外辐射经水雾吸收和散射后的能量变化,并利用实验设备进行检测,结果证明水雾对红外辐射的衰减作用很大,可以达到红外遮蔽的效果。魏合理<sup>[20]</sup>等人利用红外光谱辐射计在大气窗口区对降雨条件下的红外辐射衰减进行了实际测量,从结果可以看出雨对红外辐射的衰减有很大的影响,而且与降雨的强度密切相关,并根据结果分析得到了红外辐射在雨中衰减的定量关系式。

## 4 结语

红外辐射大气透过率的研究随着红外技术的不断更新越来越受到人们的重视。近几年来,红外辐射大气透过率的算法和模型都得到极大完善与改进。大气成分的复杂性和气候条件的多变性,使得准确、快速计算红外辐射大气透过率的难度加大,大气传输软件在不同地域的通用性也不高,增加了研究的工作量。今后可以在以下几个方向继续开展工作:

- 1) 在已有大气传输算法和模型的基础上,研究更加高效的算法和更完善的模型;
- 2) 继续在大气各类分子吸收光谱参数和粒子散射特性方面做深入的研究;
- 3) 研发适合我国气候和地理条件的标准大气模式;
- 4) 深入研究复杂气象环境下红外辐射大气透过率的计算方法;
- 5) 更好地结合武器装备的发展,研究如何将成果运用到红外武器装备的研发工作中。

### 参考文献:

- [1] 叶玉堂,刘爽. 红外与微光技术[M]. 北京:国防工业出版社,2010:19—29.
- [2] 李楠,何友金. 基于大气传输软件激光透过率对比研究[J]. 海军航空工程学院学报,2005,20(4):425—428.
- [3] 唐嘉. 红外辐射大气透过率的工程计算[J]. 飞行器测控学报,2007,26(3):25—29.
- [4] 石广玉. K分布大气辐射模式研究[R]. 合肥:中国科学院大气物理研究所,1998.
- [5] NORTH A. PcModWin Manual Version 4.0[M]. USA,2001.
- [6] YANG Ci-yin, CAO Li-hua, ZHANG Jian-ping. Infrared Signature Measurement of Targets Accounting for Atmospheric Attenuation[C]/International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering,2010:301—303.
- [7] 路远. 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.
- [8] 赵军,张建,杜翠兰. 红外辐射大气透过率修正函数[J]. 激光与红外,2006,36(9):866—867.
- [9] 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.
- [10] 张华,石广玉. 一种快速高效的逐线积分大气吸收计算方法[J]. 大气科学,2000,24(1):111—121.
- [11] 陈秀红. 通用大气辐射传输软件CART的研制[D]. 合肥:中国科学院安徽光学精密机械研究所,2010.
- [12] KARIN R W. Influence of Atmospheric Turbulence on Imaging Quality of Electro-optic Sensors in Different Climates[J]. Pro SPIE,2004,5237:1—12.
- [13] 武琳,应家驹,耿彪. 大气湍流对激光传输的影响[J]. 激光与红外,2008,38(10):974—977.
- [14] 闫俊成,王德飞,齐文宗. 大气湍流对红外探测器光电性能影响的研究[J]. 激光与红外,2009,39(2):162—165.
- [15] 李曙光,刘晓东,侯蓝田. 沙尘暴对低层大气红外辐射的吸收和衰减[J]. 电波科学学报,2003,18(1):43—47.
- [16] 李学彬,徐青山. 1次沙尘暴天气的消光特性研究[J]. 激光技术,2008,32(6):566—567.
- [17] 袁忠才,时家明. 水雾和雾状油对红外辐射传输的影响[J]. 光电对抗与无源干扰,2001(4):1—3.
- [18] 王威,李进杰. 红外辐射的气候环境传输特性分析[J]. 激光与红外,2000,30(5):290—292.
- [19] 侯文学. 水雾对红外光谱遮蔽衰减特性研究[J]. 光电技术应用,2008,23(5):25—28.
- [20] 魏合理. 红外辐射在雨中的衰减[J]. 红外与毫米波学报,1997,16(6):418—423.