

# 1.06 $\mu\text{m}$ 激光大气透过特性的数值计算研究

刘伟超<sup>1,2</sup>, 齐琳琳<sup>2</sup>, 何宏让<sup>1</sup>, 吴洪星<sup>3</sup>, 杨元龙<sup>4</sup>

(1. 解放军理工大学, 江苏 南京 211101; 2. 空军装备研究院气象所, 北京 100085; 3. 93173 部队气象台, 辽宁 大连 116300; 4. 93062 部队气象台, 吉林 吉林 132000)

**摘要:** 利用 Modtran 大气辐射传输模型, 分析大气环境对 1.06  $\mu\text{m}$  激光透过特性的影响, 包括大气分子, 气溶胶, 雾, 降雨, 水平能见度以及不同的探测路径对 1.06  $\mu\text{m}$  激光透过特性的影响。研究表明, 1.06  $\mu\text{m}$  激光在大气传输中大气分子吸收效果非常小, 基本可忽略不计; 气溶胶对其的影响则较大, 且透过率随着能见度的降低而减小; 雾和降雨对激光的衰减作用非常明显, 在大雾或者中雨大雨的条件下, 激光的透过率非常小, 基本很难通过。这些结论对于 1.06  $\mu\text{m}$  激光制导武器的论证、研制、仿真和作战具有积极的意义。

**关键词:** 大气光学; 1.06  $\mu\text{m}$  激光; Modtran; 大气环境

中图分类号: TN249

文献标识码: A

## Numerical study on atmospheric transmission of 1.06 $\mu\text{m}$ laser

LIU Wei-chao<sup>1,2</sup>, QI Lin-lin<sup>2</sup>, HE Hong-rang<sup>1</sup>, WU Hong-xing<sup>3</sup>, YANG Yuan-long<sup>4</sup>

(1. PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China;

2. Beijing Aviation Meteorological Institute, Beijing 100085, China;

3. 93173 Troops of PLA, Dalian 116300, China; 4. 93062 Troops of PLA, Jilin 132000, China)

**Abstract:** The atmospheric transmission property of 1.06  $\mu\text{m}$  laser is analyzed by using the Modtran model, and some valuable conclusions and inferences are presented. The effects of atmospheric molecules, aerosol, fog, rain, visibility and different path are considered. It is pointed out that, in the course of the atmospheric transmission of 1.06  $\mu\text{m}$  laser, the impact of molecules can be neglected. The effect of aerosol is more obvious and the transmission is reducing with the decrease of visibility especially when the visibility is less than 10 km. At the same time, the 1.06  $\mu\text{m}$  laser can hardly pass through the atmosphere when it is foggy or heavily raining day. The conclusions above have positive significance when the laser-guided weapons are developed, experimented and used in the war.

**Key words:** atmospheric optics; 1.06  $\mu\text{m}$  laser; Modtran; atmospheric environment

### 1 引言

激光具有高亮度、良好的单色性、方向性及相干性电磁波的一切通性, 在很多科学领域都得到了广泛应用。尤其是其在军事上的应用, 极大地推进了世界高技术侦察与精确制导武器的发展。军事上主要应用的是 0.532  $\mu\text{m}$ , 0.69  $\mu\text{m}$ , 0.83  $\mu\text{m}$ , 0.90  $\mu\text{m}$ , 1.06  $\mu\text{m}$ , 1.20  $\mu\text{m}$ , 1.54  $\mu\text{m}$ , 1.57  $\mu\text{m}$ , 3.39  $\mu\text{m}$  和 10.6  $\mu\text{m}$  等波长的激光, 其中用于精确制导的激光波长主要是 1.06  $\mu\text{m}$  和 10.6  $\mu\text{m}$ 。激光制导武器以其攻击精度和作战效费比高等特点, 在

现代战争中被广泛运用, 尤其是在科索沃战争中, 激光制导炸弹占了总投弹量的 66%, 而在伊拉克战争中则高达 87%<sup>[1]</sup>。

激光制导武器工作基本原理为, 激光器发射激光束照射目标, 装于弹体上的激光接收装置在接收照射的激光信号或目标发射的激光信号后, 算出弹体偏离照射或反射激光束的程度, 从而不断调整飞

作者简介: 刘伟超(1986-), 男, 研究生在读, 主要从事大气辐射传输方向的研究。E-mail: lwc19860209@126.com

收稿日期: 2010-11-13; 修订日期: 2011-01-20

行轨迹,使武器(导弹、炸弹、炮弹等)沿着照射或者反射光前进,最终命中目标<sup>[2]</sup>。由于任何波长的激光制导武器,都必须依赖一定功率的激光辐射在武器系统和目标之间的大气环境中进行传输才能发挥作用,而激光辐射在大气中传输时会被大气中的 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_3$  等气体分子和尘埃、雾、霾等成分吸收、散射而发生衰减,并直接影响到其武器效能的有效发挥甚至使其丧失作用。科索沃战争中恶劣的气象条件就使得美军装备的激光制导炸弹的使用与作战效能受到很大限制,再加上大气环境的光学特性是激光制导武器导引头探测器设计、仿真及试验的重要光学参考量之一<sup>[3]</sup>,因此,本文以 1.06  $\mu\text{m}$  为例开展激光大气透过特性的数值计算研究,定性、定量地分析几类大气条件下 1.06  $\mu\text{m}$  激光制导波束的透过特性,以期为激光制导武器在实际大气中的目标识别判定研制提供技术支持,增强武器研制和使用的环境适应性。

## 2 Modtran 模型介绍

目前较常见的激光大气传输的透过率计算主要有实验室模拟和利用辐射传输模型行计算。文中采用辐射传输模型 Modtran 对 1.06  $\mu\text{m}$  激光的大气透过率进行仿真计算,Modtran 由美国空军地球物理实验室(AFGL)研究开发,可在非常宽的电磁波谱范围( $0 \sim 50000 \text{ cm}^{-1}$ ,  $0.2 \mu\text{m} \sim \infty$ )内使用。模型光谱分辨率可达到  $2 \text{ cm}^{-1}$ ,用计算复杂大气条件下多种辐射传输量,如透过率、辐亮度等<sup>[4]</sup>。

Modtran 包括以标准大气作为高度函数的温度、压力、密度以及水汽、臭氧、甲烷、一氧化碳和一氧化二氮等 30 种气体混合比的六种参考模型大气:1976 年美国标准大气、热带大气、中纬度夏季、中纬度冬季、亚北极夏季和亚北极冬季。此外,模型中还包括了具有代表性的气溶胶、云、雨、雾模型,为复杂大气环境下的大气透过特性研究提供便捷。代表的气溶胶模型主要是乡村、城市和海洋三种气溶胶类型。在 Modtran 当中,除了模型自带的气溶胶模型外,用户还可以在不同的气溶胶类型下,根据实际情况输入水平能见度,从而能够建立实际大气环境和 Modtran 模型的联系。同时 Modtran 还针对大气辐射传输路径考虑了水平、垂直、倾斜向上和向下传输等方式,用户可以根据实际需要选择传输路径。

本文利用 Modtran 提供的大气模型,分别考虑在不同气溶胶类型及天气的条件下,大气环境对激光透过率的影响。

## 3 大气对 1.06 $\mu\text{m}$ 波段激光波束的衰减影响

激光制导波束传输过程非常复杂,不仅依赖于大气中吸收辐射分子的种类和浓度,而且还依赖于大气中悬浮微粒的大小、传输路径上各点的温度、压强等气象条件。研究表明<sup>[5]</sup>,除晴朗大气条件下大气分子对激光制导波束传输的衰减较弱,可以忽略不计外,大气中的云、雾、霾、气溶胶粒子、降水等,均会对激光传输造成吸收、散射、折射等,严重削弱激光能量,从而降低激光制导波束透过特性。因此,文中首先给出了大气分子的影响,并在此基础上逐项计算分析了气溶胶、雾、降雨对 1.06  $\mu\text{m}$  波段激光波束的衰减影响。

### 3.1 大气分子对大气透过特性的影响分析

大气是由多种气体分子和微粒组成混合体,二氧化碳、氫、甲烷、一氧化碳等从海平面至 80 km 的高度几乎保持不变,而氮、氧和水汽的含量随高度增加而减少,但水汽到了 15 km 则不再减少,臭氧则在 25 km 处浓度最大,而气溶胶除了在地面附近较为集中外,在 10 ~ 50 km 也比较丰富<sup>[6]</sup>。

利用模型自带的六种模式大气,对 1.06  $\mu\text{m}$  波段的透过特性进行分析。计算中传输路径为斜程,只考虑大气分子的影响,不考虑云雨气溶胶的影响,目标位于地面,传输距离为 5 km,天顶角为  $55^\circ$ 。选取天顶角  $55^\circ$  是因为美军利用激光制导武器攻击目标时,弹道的仰角也一般在  $35^\circ$  左右,即天顶角为  $55^\circ$ ,这个弹道仰角对应的捕获目标斜距和水平距离都比较靠近最大值,因此本文重点考虑天顶角为  $55^\circ$  时大气环境对透过率的影响。

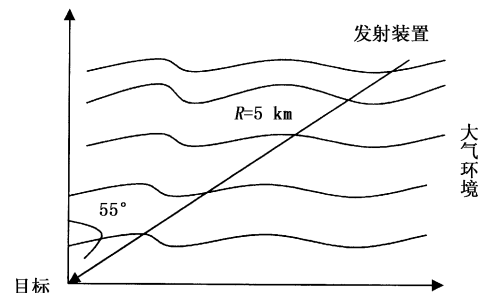


图1 激光传输示意图

表1 大气分子影响下 1.06  $\mu\text{m}$  波段的激光大气透过率

模式	热带大气	中纬度夏季	中纬度冬季	亚北极夏季	亚北极冬季	标准大气
大气透过率	0.982	0.978	0.977	0.983	0.969	0.979

由表1可以看出,在只考虑大气分子影响的情况下,1.06  $\mu\text{m}$  波段的激光能够保持在一个很高的

透过率,在0.98左右,这说明大气分子对其的影响基本可忽略不计。

### 3.2 气溶胶粒子对大气透过特性的影响分析

气溶胶是指悬浮在地球大气中具有稳定性的,沉降速度小的,尺度范围在 $0.001\ \mu\text{m}$ 到几十微米之间的分子团、液态或固态粒子所组成的混合物,为地球-大气-海洋系统的重要组成部分。大气中悬浮着的各种固体和液体粒子,例如尘埃、烟粒、微生物、植物孢子和花粉,以及由水和冰组成的云雾滴、冰晶和雨雪等粒子都是气溶胶。

当大气中的气溶胶含量达到一定程度时,会对激光的透过特性造成很大影响。下面首先考虑不同的气溶胶类型对 $1.06\ \mu\text{m}$ 波段的激光透过特性所造成的影响。

#### 3.2.1 不同气溶胶类型的影响分析

分析中仍采用六种模式大气,传输路径仍为斜程,观察者位于地面,传输距离为 $5\ \text{km}$ ,天顶角为 $55^\circ$ ,且不考虑云雨的影响。气溶胶类型选取水平能见度为 $23\ \text{km}$ 和 $5\ \text{km}$ 的乡村型气溶胶,水平能见度为 $23\ \text{km}$ 的海洋型气溶胶以及 $5\ \text{km}$ 的城市型气溶胶。不同气溶胶类型对 $1.06\ \mu\text{m}$ 波段的激光大气透过特性影响如图2所示。

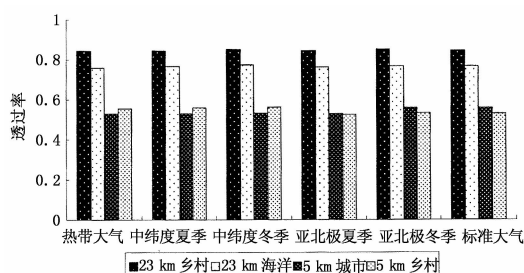


图2 六种模式大气,不同气溶胶类型下 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光的大气透过率

图2表明,在同一种气溶胶类型的条件下,透过率随着纬度和季节的变化并不明显,从热带到亚北极地区,从夏季到冬季,透过率只有很小的改变。由于几种模式大气下透过率的改变并不明显,且中纬度比较符合中国的地理环境,因此下文都以中纬度大气为例进行分析。

此外,在同一种气溶胶类型的情况下,即乡村气溶胶类型,水平能见度为 $5\ \text{km}$ 时透过率相比能见度为 $23\ \text{km}$ 时有着明显的下降,这说明同一种气溶胶的条件下,不同的水平能见度对透过率有较大的影响。

再者,在不同气溶胶类型情况下,即能见度为 $23\ \text{km}$ 的乡村型和海洋型气溶胶,以及能见度为

$5\ \text{km}$ 的乡村型和城市气溶胶可以看出,水平能见度一致的不同气溶胶条件下, $1.06\ \mu\text{m}$ 波段的激光透过率只有较小的变化,分别改变 $8\%$ 和 $5\%$ 左右,这说明即使气溶胶类型不同,但只要其造成的水平能见度一致,那么对于 $1.06\ \mu\text{m}$ 波段透过特性的影响基本一致。

#### 3.2.2 水平能见度的影响分析

上面初步比较了不同气溶胶类型对 $1.06\ \mu\text{m}$ 波段透过率的影响,并得出了一个结论,即水平能见度的变化对透过率有较大的影响,下面着重来分析透过率与水平能见度变化的关系。模式大气采用中纬度夏季,气溶胶类型分别选取乡村、城市和海洋三种,传输路径为斜程,传输距离为 $5\ \text{km}$ ,天顶角为 $55^\circ$ ,如图3所示。

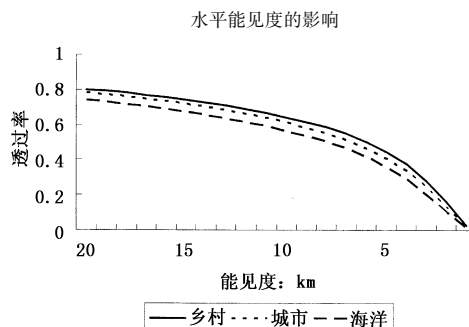


图3 不同气溶胶类型下 $1.06\ \mu\text{m}$ 波段的透过率随水平能见度的变化

由图3可以看出,不管是在何种气溶胶类型条件下,透过率都是随着能见度的减小而减小,三种气溶胶类型下的透过率变化趋势基本一致,即在水平能见度从 $20\sim 10\ \text{km}$ 减小时,透过率从 $0.8$ 减小到了 $0.64$ ,减小了 $20\%$ ,变化比较缓慢,水平能见度从 $10\sim 1\ \text{km}$ 时,透过率则从 $0.64$ 减小到了 $0.029$ ,改变了 $98\%$ ,呈现急剧的减小。此外,同样水平能见度条件下,透过率变化的剧烈程度依次是乡村型>城市型>海洋型,这是因为三者的气溶胶类型的不同所导致的,乡村气溶胶多为尘埃、花粉等,城市里则是燃烧产生或者工业排放的颗粒物,而海洋型气溶胶的组成则主要是海盐颗粒,海洋海盐颗粒较大,且水汽相对陆地来说更为充足,这些是 $1.06\ \mu\text{m}$ 波段的激光在海洋型气溶胶影响下透过率较低的原因。

#### 3.2.3 探测路径对透过率的影响

上面讨论了 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光随着水平能见度变化的衰减情况,且都是考虑的激光斜程传输,天顶角为 $55^\circ$ ,由于大气的成分随着高度的变化有较大的改变,因此有必要从不同的探测角度考虑 $1.06\ \mu\text{m}$

激光的大气传输。下面,对不同的天顶角以及水平传输进行对比分析。模式大气选择中纬度夏季大气,传输路径依次选取不同的天顶角,传输距离从1~30 km,不考虑云雨的影响,气溶胶模型为乡村气溶胶透过率的变化如图4所示。

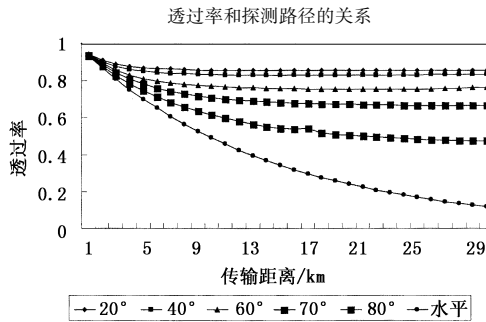


图4 探测路径对透过率的影响示意图

从图4可以看出,第一:当角度一定时,透过率随着传输距离的增加而减小,且随着角度的加大,透过率减小得更快;第二:当传输相同的距离时,天顶角越大,透过率越小。造成这一现象的原因是在不同的高度上,大气分子以及气溶胶的含量是不同的,主要是气溶胶含量的不同造成的。

### 3.3 雾对大气透过特性的影响分析

雾是悬浮于近地面气层中的大量小水滴或冰晶而使水平能见度变坏的一种天气现象。观测表明,雾滴半径多在1~10  $\mu\text{m}$ 之间,雾滴浓度一般在10~100个/ $\text{cm}^3$ ,海雾中的雾滴一般比陆地雾大而少<sup>[7]</sup>。雾按照其形成方式的不同可分为两种,由于夜间地面放射热量使贴地气层冷却,达到饱和状态而形成的雾,这就是辐射雾;暖空气流经冷的地表而失去热量,达到饱和状态而形成雾,通常称之为平流雾。在Modtran模式中,气溶胶类型有辐射雾和平流雾两种气溶胶类型,下面分别考虑随着能见度的降低,辐射雾和平流雾对1.06  $\mu\text{m}$ 激光透过率的影响。模式大气选取中纬度夏季大气,传输路径仍然选取为斜程,观察者位于地面,观测高度5 km,天顶角为30°,不考虑云雨的影响。

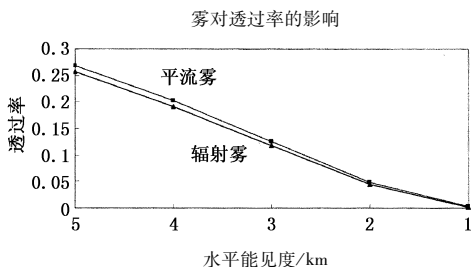


图5 辐射雾和平流雾对透过率的影响

由上图可以看出,雾对激光的衰减最用是非常明显的,能见度为5 km的时候透过率就已经很小

了,且随着水平能见度的减小,1.06  $\mu\text{m}$ 激光透过率呈明显的下降趋势,在水平能见度低于2 km(大雾)的时候,基本上难以透过;另外不管是辐射雾还是平流雾,二者在相同的能见度条件下对激光透过率的衰减作用是基本一致的。因此最好避免在雾天,尤其是能见度特别小的雾天使用1.06  $\mu\text{m}$ 激光制导波束。

### 3.4 降雨的影响

雾和雨的差别不仅在于含水量的不同,而主要是雾粒子和雨滴尺寸由很大的差别。雾滴的半径仅是雨滴半径的千分之一左右,且雨滴间隙要大的多,故能见度较高,再加上雨滴的前向散射效应较强,理论上光波比较容易通过。但实际当中,同样能见度的雾和降雨条件下,激光在雨天的透过率和雾天接近,这是由于雨滴在空间上分布的不均匀性以及落速的影响,在激光传输路径当中的雨滴都会吸收并散射激光的能量,使得激光在传输当中产生严重的衰减。

模式大气选取中纬度夏季大气,传输路径选取为水平传输,观察者位于地面,传输距离为3 km以内,由于是在地面传输,因此忽略云的影响。

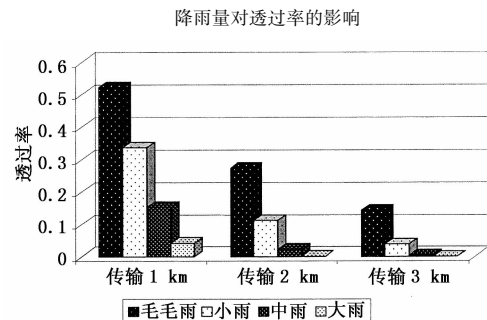


图6 降雨对透过率的影响

由上表可以看出,随着降雨强度以及传输距离的增加,1.06  $\mu\text{m}$ 激光的透过率有着非常明显的下降。当传输距离为1 km的条件下,毛毛雨时透过率较高,为0.5左右,随着雨量的增加,透过率急剧下降,到大雨时透过率只有不到0.05;当传输距离增加到3 km时,毛毛雨时透过率下降到只有0.15左右,大雨时的透过率则接近为0了。因此,降雨对激光的衰减作用是非常明显的,且随着距离的增加,即使在毛毛雨的条件下激光也很难通过,因此需要尽量避免在雨天使用该波段的激光。

### 4 总结和展望

本文利用Modtran模型,分别考虑了大气分子,大气气溶胶,雾和降雨以及不同的探测路径对1.06  $\mu\text{m}$ 激光传输的影响,研究表明:1.06  $\mu\text{m}$ 激光

在大气传输中大气分子吸收效果非常小,基本可忽略不计;气溶胶对其的影响则较大,在不同类型的气溶胶条件下,透过率是乡村大于城市,城市大于海洋;在同一种类型的气溶胶影响下,透过率随着能见度的降低而减小,且在水平能见度小于10 km时,透过率的下降比较明显;透过率随着传输距离的增加而减小,且随着角度的加大,透过率减小得更快,当传输相同的距离时,天顶角越大,透过率就越小;雾和降雨对激光的衰减作用非常明显,在大雾或者中雨大雨的条件下,激光的透过率非常小,基本很难通过。

除了气溶胶、雾、降雨的影响外,云、降雪等也会对激光的传输造成较大的影响,因此利用实际的大气观测资料进一步细致量化地计算不同的天气现象对激光传输的影响,能够为激光精确制导武器在不同的大气环境下使用提供必要的参考。

#### 参考文献:

- [1] Wang Xuanyu. Attenuation and applied calculation of smoke to 10.6  $\mu\text{m}$  laser emission [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2007. (in Chinese)  
王玄玉. 烟幕对10.6  $\mu\text{m}$  激光的衰减规律及应用研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [2] Geng Shunshan. The status and future development of laser guided weapons in the USA [J]. Physics, 2008, 37(4): 260 - 263. (in Chinese)  
耿顺山. 美国激光制导武器的发展现状与趋势 [J]. 物理, 2008, 37(4): 260 - 263.
- [3] Xun Genxing. Optical characteristics of object and environment [M]. Beijing: Space Navigation Press, 1995. (in Chinese)  
徐根兴. 目标和环境光学特性 [M]. 北京: 宇航出版社, 1995.
- [4] Sun Yiyi, Dong Hao. Inter-comparison of models for radiate transfer in the atmosphere [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(2): 149 - 153. (in Chinese)  
孙毅义, 董浩. 大气辐射传输模型的比较研究 [J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(2): 149 - 153.
- [5] An Yuying. The technology of laser transmission [J]. Laser & Infrared, 2002, 32(6): 435 - 438. (in Chinese)  
安毓英. 激光传输技术 [J]. 激光与红外, 2002, 32(6): 435 - 438.
- [6] Yang Yang, Zhao Yuan. Atmospheric transmission property of 1.06  $\mu\text{m}$  laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 1999, 28(1): 15 - 19. (in Chinese)  
杨洋, 赵远. 1.06  $\mu\text{m}$  激光的大气传输特性 [J]. 红外与激光工程, 1999, 28(1): 15 - 19.
- [7] Xu Zubing. Analysis of laser propagation in atmosphere [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2006. (in Chinese)  
许祖兵. 激光大气传输特性分析研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2006.