

·测试、试验与仿真·

## 直升机典型作战环境激光大气衰减模型研究

张 蔷<sup>1,2</sup>, 李 宁<sup>1</sup>

(1.解放军陆军航空兵学院,北京 101123;2.75752 部队,广州 三水 528524)

**摘要:**分析了霾、雾、雨等典型作战环境对直升机激光制导武器的影响。建立工程化的模型计算不同环境对1.06 μm激光的消光系数,从而为直升机作战仿真中,不同天气环境对激光制导的影响模型提供参考。

**关键词:**直升机;激光制导;消光系数

中图分类号:TN241

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2016)-03-0057-05

## Research on Laser Atmospheric Attenuation Model under Typical Operational Environment of Helicopter

ZHANG Qiang<sup>1,2</sup>, LI Ning<sup>1</sup>

(1. Army Aviation Institute of PLA, Beijing 101123, China;

2. 75752 Army Unit of PLA, Sanshui 528000, China)

**Abstract:** The influence on laser-guided weapons carried by the helicopter under typical operational environment such as haze, fog and rain is analyzed. Engineering models are established to calculate the extinction coefficient of 1.06 μm laser under different environments so as to provide references for the laser-guided model influenced by different weather environment during helicopter combat simulation.

**Key words:** helicopter; laser-guided; extinction coefficient

如今激光技术飞速发展,由于激光制导武器具有精度高、定位方便可靠、结构简单、作战费效比高等特点,在军事领域得到广泛应用,发挥了巨大的作战效能。直升机对地面及海上目标的精确打击作为陆军航空兵部队担负的主要作战任务之一,其对于精确打击的高要求使得激光制导在直升机作战训练中成为了不可或缺的一部分。

激光制导武器的基本工作原理是,发射激光束照射目标,弹体的接收装置接收照射的激光信号或目标反射的激光信号进行计算,得出弹体偏离照射或反射激光束的程度,对飞行轨迹进行不断调整,最终准确命中目标。而激光制导武器的实际效果与激光的大气传输特性息息相关。例如陆航作战中,激光精确制导主要应用的1.06 μm激光,就会受到天气、作战环境、攻击目标等多种影响,其中最主要的衰减因子就是大气中气溶胶的吸收和散射。

当在雨、雾、霾等特殊天气作战时,空气中悬浮的不同气溶胶粒子会使激光制导的准确度受到不同程度的影响。由此可见,作战环境对直升机激光制导攻击的有效性有极大影响。

目前的陆航直升机模拟训练中缺乏环境对直升机影响模型。战场天气环境建模影响条件多,数据计算量大,建模复杂,不同天气对直升机激光制导的消光系数也各不相同,准确计算激光大气衰减的公式都需要对气溶胶粒径大小进行精确的统计和计算,数据采集不易,计算过程缓慢。直升机作战仿真中,环境对激光制导的影响计算结果对实时性要求高,因此此类计算方式并不适用。因此文中旨在分析了大气对激光辐射衰减规律的基础上,结合直升机作战的战场背景与一些常用模型和经验公式,建立不同天气对直升机1.06 μm激光半主动制导武器影响的工程模型,为陆航模拟训练系统中

收稿日期:2016-05-29

作者简介:张蔷(1989-),女,吉林人,硕士研究生,主要研究方向为装备发展与论证。

1.06  $\mu\text{m}$  激光照射武器在不同环境条件下的消光系数提供贴近实战的模型数据前提下,保证了直升机作战仿真训练中制导精度的运算速度。

## 1 1.06 $\mu\text{m}$ 激光大气衰减

### 1.1 1.06 $\mu\text{m}$ 激光大气衰减特性

当激光在大气中传播时,由于大气中存在的气体分子和微粒会使部分能量散射,部分辐射能量被吸收。其中大气对激光引起的吸收衰减主要有大气分子吸收和大气气溶胶吸收。相应的大气吸收衰减系数由两项组成<sup>[1]</sup>,有下式

$$\alpha(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + \alpha_n(\lambda) \quad (1)$$

式中, $\alpha_m(\lambda)$ 为大气分子吸收引起的衰减系数; $\alpha_n(\lambda)$ 为气溶胶吸收引起的衰减系数。大量实验表明,由于大气中的一些分子对辐射有选择性吸收,大气对辐射的吸收和散射均与波长有着密切的关系。在各吸收带之间的某个区域可能存在相对其他区域辐射投射率较高的大气窗口,1.06  $\mu\text{m}$  激光就属于此范畴,所以对于1.06  $\mu\text{m}$  激光波长来说,几乎不存在分子吸收,分子散射的数量级也比气溶胶衰减减小。对于1.06  $\mu\text{m}$  激光来说,主要的衰减就是气溶胶的散射和吸收。大气气溶胶衰减系数是由微粒吸收决定<sup>[2]</sup>,有下式

$$\alpha_n(\lambda) = 10^5 \int_0^\infty Q_\alpha \left( \frac{2\pi r}{\lambda}, n'' \right) \cdot \pi r^2 \frac{dN(r)}{dr} dr \quad (\text{km}^{-1}) \quad (2)$$

式中, $N(r)$ 为气溶胶粒径数密度谱分布; $n''$ 为所研究气溶胶的虚构的折射率; $r$ 为气溶胶粒径; $\lambda$ 为激光波长; $Q_\alpha \left( \frac{2\pi r}{\lambda}, n'' \right)$ 是给定微粒的吸收截面。由此可得1.06  $\mu\text{m}$  激光大气消光系数为

$$\sigma = \int_{r_1}^{r_2} \sigma_p^0 \left( \frac{2\pi r}{\lambda}, n \right) N(r) dr \quad (3)$$

式中, $N(r)$ 为气溶胶粒径数密度谱分布; $n$ 为气溶胶折射率; $r$ 为气溶胶粒径; $\lambda$ 为激光波长。由上式可知,计算某一地区激光大气传输衰减系数,关键在于得到该种情况下较为准确的气溶胶粒径密度谱分布。

### 1.2 1.06 $\mu\text{m}$ 激光透射率及斜程修正

对于均匀介质,其消光作用可用郎伯-比尔定律描述

$$\tau = \frac{I}{I_0} = \exp[-\alpha(\lambda) \cdot C \cdot L] \quad (4)$$

式中, $\tau$ 为透过率; $I$ 为透过光强度; $I_0$ 为射入光强度; $C$ 为气溶胶浓度; $K_e$ 为消光系数; $L$ 为光程。大气吸收衰减系数 $\alpha(\lambda)$ 见式(1)。

上式中讨论的是激光在大气水平传输的情况。实际使用中直升机激光制导是空对地传输,由于不同高度的压强、温度、大气分子结构各异,需要进行斜程修正,此时的1.06  $\mu\text{m}$  激光透过率描述为<sup>[3]</sup>

$$T = \exp\{-\sec \theta \cdot (K/V_m) \cdot [1 - \exp(-0.835H)]\} \quad (5)$$

式中, $\theta$ 为天顶角。见图1(激光入射线与地面法线之间的夹角,单位为rad)。 $H$ 为传输高度(单位为km), $K$ 为区域常数。不同区域的 $K$ 值见表1。

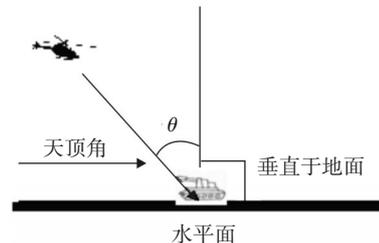


图1 天顶角

表1 不同区域的常数K

地区种类	乡村	城市	海洋	沙漠
区域常数K	2.828	3.132	4.543	2.496

### 1.3 不同气溶胶类型对1.06 $\mu\text{m}$ 激光大气衰减的影响分析

选取气溶胶类型为水平能见度为23 km和5 km的乡村气溶胶,水平能见度为23 km的海洋型气溶胶以及5 km的城市型气溶胶六种模式大气,传输路径为斜程,观察者位于地面,传输距离为5 km,天顶角为55°,且不考虑天气影响,观测不同气溶胶类型对1.06  $\mu\text{m}$  激光大气透过率的影响见图2<sup>[4]</sup>。

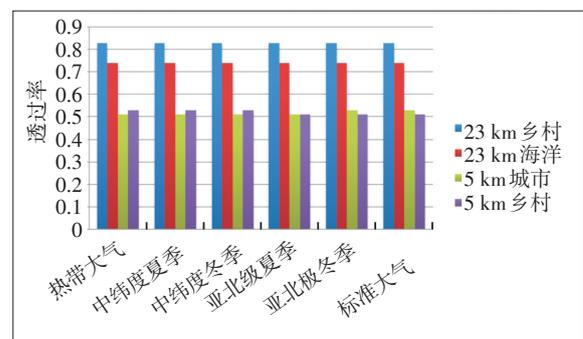


图2 六种模式大气,四种气溶胶类型下1.06  $\mu\text{m}$  激光大气透过率

从图2可以看出,纬度和季节对透过率的影响并不明显,而同一种气溶胶类型下,水平能见度对透过率有着较大影响。再者,在水平能见度一致的不同气溶胶类型情况下,透过率变化较小。

接下来分别选取乡村、城市和海洋三种气溶胶类型,采用中纬度夏季地区,传输路径为斜程,传输距离为5 km,天顶角为55°,如图3所示。

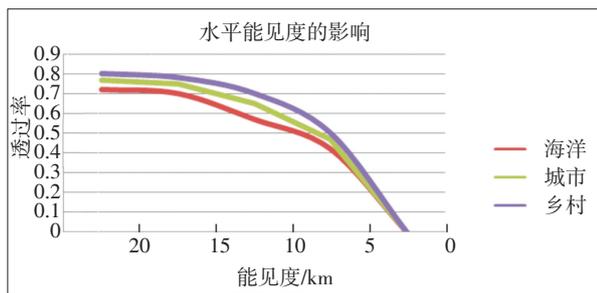


图3 不同气溶胶类型下1.06 μm激光大气透过率随水平能见度的变化

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。所以在建模中可以不考虑城市、乡村、海洋等作战地域改变对激光武器造成影响的差别。

## 2 不同气象条件对激光传输衰减的影响

雨、雾和霾是常见的直升机作战需要面对的气象环境,其形成原理不同,它们在空气中的气溶胶粒子形状也存在巨大差异,比如雾粒子的半径就仅为雨滴的千分之一左右,由此造成的激光衰减也有巨大差异,对直升机制导精度的影响也随之改变,所以要分别讨论。

### 2.1 霾对激光的衰减模型

霾是大气中最常见的自然现象。常用的预测霾衰减系数的经验模型公式为<sup>[5]</sup>

$$\mu = \frac{3.912}{V_b} \left( \frac{0.55}{\lambda} \right)^{\alpha} \quad (6)$$

上式对于从晴朗到雾霾天气均可用。式中, $V_b$ 为大气能见度(单位为km); $\alpha$ 为波长修正因子,且与能见度有关;在不同能见度情况下, $\alpha$ 的取值为

$$\alpha \begin{cases} 0.585V_b^{1/3} & V_b \leq 6 \text{ km} \\ 1.3 & \text{平均能见度情况} \\ 1.6 & \text{能见度特别良好} \end{cases} \quad (7)$$

平均能见度一般取值10~12 km,能见度特别好一般取值23 km。

$$a \begin{cases} 0.16V_b + 0.34 & 1 \text{ km} < V_b \leq 6 \text{ km} \\ V_b - 0.5 & 0.5 \text{ km} < V_b < 1 \text{ km} \\ 0 & V_b < 0.5 \text{ km} \end{cases} \quad (8)$$

预测公式仅反映了大气衰减随大气能见度和波长变化的关系,没有反映大气环境、大气粒子尺度分布、粒子成分的变化引起折射率的变化等因素。而基于Mie散射理论的计算则把这些因素都列为了考虑范围。其中,求解单个球形粒子总截面(TCS) $Q_{tj}(D)$ (消光截面)计算公式为

$$Q_{tj}(D) = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (9)$$

式中, $D$ 为粒子直径; $a_n, b_n$ 为Mie散射系数,是复折射率、波长、粒子半径的函数。对于定尺寸分布的气溶胶粒子,在单位距离所引起的激光衰减为

$$A = 4.343 \int_0^{\infty} Q_t(r) n(r) dr \quad (10)$$

式中, $r$ 为粒子半径; $n(r)$ 为粒子的尺度分布。

目前对于霾、云雾粒子使用较普遍且适用性最大的尺度分布是Deirmendjan模型(也叫广义伽马分布或指数分布),其形式为<sup>[7]</sup>

$$n(r) = cr^{\alpha} \exp(-dr)^{\beta} \quad (11)$$

式中, $c, d, \alpha, \beta$ 是正的常数。Deirmendjan模型最适合于大陆、海洋的霾,也适合于平流层气溶胶。这几种情况下的模型参数如表2。

表2 不同区域的常数 $c, d, \alpha, \beta$

环境	$c$	$d$	$\alpha$	$\beta$
大陆	$4.976 \times 10^6$	15.118 6	2	0.5
海洋	$5.333 \times 10^4$	8.944 3	1	0.5
平流层	$4.000 \times 10^5$	20.000	2	1

选取海上、陆地、城市和农村上空的对流层大气中的霾以及平流层大气中的霾,对1.06 μm激光的衰减进行分析计算。首先应用经验公式(5)~式(7)计算,再根据Mie理论(8)~式(10)并依据能见度与衰减系数之间的关系,计算得到1.06 μm激光随能见度的关系。但这样的计算过于复杂、耗时,不适用于直升机作战实时仿真的需要,将文献[8]的运算结果运用描点法等距选取数据采样,通过Matlab计算进行多项式拟合,通过调试对比确定四次指数方程最为接近实际,得出霾对激光衰减随能见度变化的工程化的数学模型为

$$\mu_{\text{雾}} = \begin{cases} 0.000\ 043V^4 - 0.003\ 3V^3 + 0.095\ 91V^2 - 1.312\ 5V + 8.3 & (\text{海上}) \\ 0.000\ 057V^4 - 0.004\ 1V^3 + 0.111\ 6V^2 - 1.412\ 5V + 8.25 & (\text{城市}) \\ 0.000\ 046V^4 - 0.003\ 4V^3 + 0.938\ 3V^2 - 1.22V + 7.45 & (\text{乡村}) \end{cases} \quad (12)$$

此为霾天能见度与消光系数之间的经验关系。仿真结果见图4。

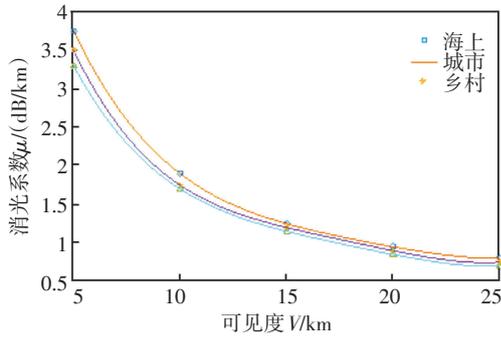


图4 不同霾类型下1.06 μm激光大气透过率随水平能见度的变化

$$\mu_{\text{辐射雾}} = \begin{cases} 6.405V^{-1.54} & (1\text{ km} \leq V < 2\text{ km}) \\ 7.445V^{-1.54} & (2\text{ km} \leq V < 8\text{ km}) \\ 3.371V^{-1.11} & (8\text{ km} \leq V \leq 10\text{ km}) \end{cases} \quad (17)$$

此为雾天能见度与消光系数之间的经验关系。仿真结果见图5。

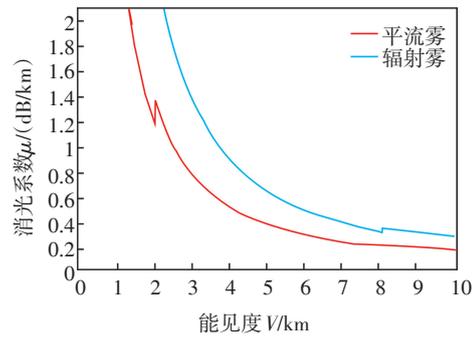


图5 不同雾类型下1.06 μm激光大气透过率随水平能见度的变化

## 2.2 雾对激光的衰减模型

雾滴半径通常在1~60 μm之间,根据形成雾的地域和机理,又可以把雾分为平流雾(多为海雾,平均直径20 μm)和辐射雾(多为内陆雾,平均直径小于20 μm)两大类。由于雾滴形状为很好的球体,其衰减规律亦完全适用Mie理论。但由于雾中能见度的确定目前还没有较为准确的方法,先多用含水量W来描述能见度,从而反演消光系数<sup>[9]</sup>如下

$$\mu_{\text{fog}} = 1.5\pi C \frac{W}{\lambda} \quad (\text{km}^{-1}) \quad (13)$$

$$W = \begin{cases} 3.16V^{-1.54} & (\text{辐射雾}) \\ 1.56V^{-1.43} & (\text{平流雾}) \end{cases} \quad (14)$$

式中,W为含水量(单位为g/m<sup>3</sup>);C为不同波长对应的常数。文献[10]通过实测不同距离范围内的常数C值,得到经验常数C的均值为

$$C = \begin{cases} 0.456 & (1\text{ km} \leq V < 2\text{ km}) \\ 0.530 & (2\text{ km} \leq V < 8\text{ km}) \\ 0.24V^{0.43} & (8\text{ km} \leq V \leq 10\text{ km}) \end{cases} \quad (15)$$

将C代入到式(12)和式(13)中,得到基于能见度的1.06 μm激光在雾中衰减的经验公式为

$$\mu_{\text{平流雾}} = \begin{cases} 3.16V^{-1.43} & (1\text{ km} \leq V < 2\text{ km}) \\ 3.676V^{-1.43} & (2\text{ km} \leq V < 8\text{ km}) \\ 1.666V^{-1} & (8\text{ km} \leq V \leq 10\text{ km}) \end{cases} \quad (16)$$

但是文献[9]收集的数据量较小,取得的平均值还不够精准。在应用中需要做进一步的处理。

## 2.3 雨对激光的衰减模型

雨对激光衰减的大小与波长关系不大,雨滴的尺寸分布、散射和吸收截面决定了其对激光信号衰减的影响程度。其中,雨滴的尺寸分布是指在不同的降雨率下,不同尺寸的雨滴在空间中的分布状态。由于雨滴半径分布的随机性较大、测量困难,实际应用中通常只用降雨强度J(单位为mm/h)来估算衰减系数的大小。常见的经验公式如下<sup>[10]</sup>

$$\mu_1 = 0.29 + \frac{J}{2.53} - \left(\frac{J}{20.3}\right)^2 \quad (18)$$

$$\mu_2 = 1.076J^{0.659} \quad (19)$$

仿真结果如图6。

从图6可以看出,当降雨量小于60 mm/h时,两种经验公式具有较好的一致性,但随着降雨量的增大,两者的计算结果出现较大差别。文献[11]的研究结果指出,雨滴半径较小的情况下散射现象明显大于大雨粒子。当降雨量增大的时候,小雨粒子比

例随之降低,当到达一定值时,衰减系数随之减小,所以式(17)的仿真结果比较吻合事实情况。目前对雷暴雨的消光系数计算还没有准确的模型计算,但直升机不能在雷暴雨环境中进行任务,所以不影响计算结果。

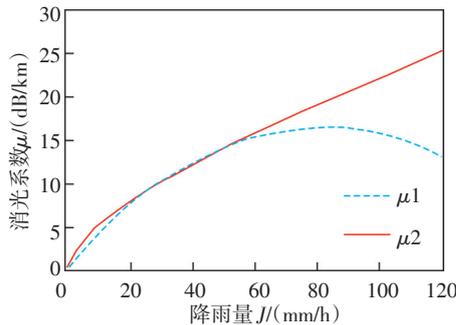


图6 两种经验公式下1.06 μm激光大气透过率随水平能见度的变化

### 3 应用实例

陆航XX战术仿真系统中直升机空对地攻击应用实例:红方为直升机模拟器,蓝方为坦克CGF (computer generated forces, 计算机生成兵力),环境条件为内陆乡村,气象条件为可见度V为8 km的雾。直升机对坦克发射1.06 μm激光半主动制导空对地导弹,然后进入悬停状态对打击坦克目标实施本机照射。已知该型导弹在晴朗天气下的有效打击距离为X(单位为km),消光系数为0.8。丛明煜在文献[12]中提出了一种简化的模型来估算1.06 μm激光半主动制导武器导引头捕获距离的简单模型,模型包括三个部分:大气环境传输子模型、目标子模型、目标获取子模型,将1.06 μm激光的大气传输衰减现象简化处理并推导出计算方程为

$$\frac{R_s^2}{\tau_s} = \tau_d \cdot \frac{\rho_i T_d T_r A I_d}{\pi T} \cos \theta_L = \tau(R_d) \cdot K \quad (20)$$

式中,A为导引头探测器接收口径面积; $I_d$ 为激光照射能量密度; $T$ 为导引头探测器灵敏度值; $R$ 为目标到导引头的距离; $R_d$ 为目标到激光照射器的距离; $T_d$ 为激光照射器光学系统衰减系数; $T_r$ 为导引头光学系统衰减系数; $\theta_L$ 为与目标物法线的夹角; $\rho_i$ 为目标反射系数, $\tau_s$ 、 $\tau_d$ 分别为两个路径上的衰减系数,因为制导方式为本机照射,所以 $\tau_s = \tau_d$ 。将晴朗天气下的有效打击距离X,消光系数0.8代入式(20),计算

出K,雾天气下的可见度8 km代入式(17)得到消光系数为0.335,代入式(20)中最终计算出在雾天中直升机1.06 μm激光半主动制导空对地导弹的有效打击距离为0.418 75 X(km)。经对比,较为符合实际演习数据,计算结果能够满足工程应用要求。

### 4 结论

目前国内外都在积极进行大气环境对精确制导武器的影响研究,但目前我国的相关研究尚处于起步阶段,大气环境对激光制导有效距离的影响受到多种参数变量的影响,在仿真环境中真实准确地建立大气衰减影响模型还存在一定难度。但文中通过建立简化的模型,提高运算速度,实现了将环境对激光制导的影响模型加入到系统建模中,提高了作战训练仿真的逼真度,使直升机作战模拟训练更加符合实际训练情况。

### 参考文献

- [1] 徐娟.大气的光散射特性及大气对散射光偏振态的影响[D].南京:南京信息工程大学,2005.
- [2] 时建群.激光大气传输吸收衰减效应研究[J].河南师范大学学报,2008,36(3):57.
- [3] 宋正方.1.06 μm激光的斜程大气衰减[J].激光技术,1997,21(6):343-345.
- [4] 刘伟超.1.06 μm激光大气透过特性的数值计算研究[J].激光与红外,2011,41(5):522-524.
- [5] 杨瑞科.激光在大气中传输衰减特性研究[J].红外与激光工程,2007,36(Z):416-418.
- [6] ISHIMARU A. Wave propagation and scattering in random media [M]. Academic Press, New York, 1978.
- [7] E J 麦卡特尼.大气光学分子和粒子散射[M].潘乃先,译.北京:科学出版社,1998,122-134.
- [8] 杨瑞科.激光在大气中传输衰减特性研究[J].红外与激光工程,2007,36(Z):417.
- [9] 高文静.海面水雾对激光传输的影响分析[J].激光技术,2011,35(5):645-646.
- [10] 戴永江.激光雷达原理[M].北京:国防工业出版社,2002:31-48.
- [11] 柯熙政,杨利红,马冬冬.激光在雨中的传输衰减[J].红外与激光工程,2008,37(6):1021-1024.
- [12] 丛明煜.1.06 μm激光半主动制导的目标与大气环境模型[J].红外与激光工程,2000,29(4):71-77.