

·激光技术·

雾天环境中激光传输的衰减特性研究

王亚民, 高国强

(西安科技大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要:根据辐射雾和平流雾中含水量和能见度的经验关系,分析了雾天气对激光大气传输衰减的计算公式,并对三种常用的雾衰减经验模型进行 Matlab 数值仿真,得出了激光衰减系数和雾天气能见度的关系。最后,针对三种半经验模型所存在的缺陷,通过 Mie 散射理论提出了一种包含测量距离、接收器视场角等信息的新的经验公式。

关键词:激光;能见度; Matlab 仿真;雾

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-01-0004-05

Research on Attenuation Characteristic of Laser Transmission in Fog Environment

WANG Ya-min, GAO Guo-qiang

(Communication and Information Engineering Institute, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: According to the empirical relationship between the water content and visibility in radiation and advection fog, the calculation formula of laser atmosphere transmission attenuation in fog weather is analyzed. Three kinds of commonly used fog attenuation empirical models are simulated by Matlab numerical value. The relationship between laser attenuation coefficient and visibility in fog weather is obtained. According to the shortcomings of three kinds of semi-empirical models, a new empirical formula containing some information such as measuring distance and field of view of a receiver is proposed based on Mie scattering theory finally.

Key words: laser; visibility; Matlab simulation; fog

大气激光通信凭借着其通信容量大、保密性强、速率快、结构方便、设备经济和无需频率许可等优点,已经在深空、星地、星星和局域网等领域得到了应用,其应用范围和领域还在不断扩展^[1]。激光信号在大气随机信道中传输时,由于大气中存在着各种气体分子、微粒和雨雾雪等天气因素的影响,导致激光信号在传输过程中有严重的衰减,即使激光在大气传输中能量(如热能等)大大减少,又使激光偏离原来的传输方向(即辐射方向重新分配)。近年来,大气激光通信技术取得了辉煌的成就,近地面大气激光通信成为研究的热点。但它受大气环境因素的影响非常严重,因此对大气激光通信信道的研究就

显得格外重要。在近地面大气层中,激光信号通过大气后分子散射的影响是很小的,能量的衰减主要是受到悬浮粒子的散射(米氏散射)引起的,由于米氏散射的计算过程不易进行计算,所以一般与能见度有关的经验公式来表示大气衰减^[2],而能见度会严重阻碍人类的日常生活,其中最基本的威胁就是雾的衰减。文中主要研究雾天对激光传输的衰减特性。

1 雾的分类

能见度是视力正常的人在当时天气条件下,白

收稿日期: 2013-07-08

基金项目: 陕西省自然科学基金研究计划资助项目(2013JM8004)

作者简介: 王亚民(1958-),男,教授,研究生导师,主要从事宽带通信理论与技术、光信息理论与技术、光电传感器领域的研究和物理教学。

天从天空背景中看到和辨认出的目标物的最大水平距离;夜间是能看到和确定的一定强度灯光的最大水平距离。按目标物的水平能见度距离^[2],可把雾的强度划分为以下几个等级如表1所示。

表1 雾的分类

等级	天气情况	大气能见度
0	雾	< 50 m
1	大雾	50 ~ 200 m
2	中雾	200 ~ 500 m
3	轻雾	500 ~ 1 000 m
4	弱雾	1 000 ~ 2 000 m
5	霾	2 000 ~ 4 000 m

2 影响激光在雾中传输的因素

雾是悬浮在贴近地面的大气中的大量微细水滴(或冰晶)的可见集合体,使地面水平的能见度下降,这些粒子对激光传输产生衰减,包括吸收和散射。一般来说,与初生的雾相比,长时间存在或趋于消散阶段的雾,其雾滴的尺度相差较大。雾滴半径在形成初期或消散过程中,其半径可能小于1 μm。当能见度小于50 m时,雾滴的半径可达20~30 μm,当能见度大于100 m时,雾滴的平均半径大多小于8 μm^[3]。大多数雾滴半径是^[4]:当温度为正时,雾滴半径为7~15 μm,如我国南方的暖雾;温度为负时,雾滴半径为2~5 μm,如我国北方的冷雾。根据形成雾的不同地域和机理,把雾分成两大类:平流雾(海雾)和辐射雾(内陆雾)。平流雾的平均直径具有20 μm的量级,而辐射雾的雾滴直径通常小于20 μm。

2.1 雾的尺寸分布

目前雾滴的尺寸分布是Gamma分布^[5],此种分布不仅适合于大陆、海洋的霾,而且也适合于平流层气溶胶。

$$n(r) = cr^a \exp(-dr^b) \quad (1)$$

式(1)表示在单位体积、单位半径间隔内的雾滴数,其中 r 为雾滴半径, c 和 d 为确定雾滴谱形状的参数。如果 r 以米为单位,有^[5]

$$a = \frac{9.781}{V^6 W^5} 10^{15} \quad (2)$$

$$b = \frac{1.304}{VW} 10^4 \quad (3)$$

式中, V 为雾的能见度,单位为km, W 为含水量,单位为(g/m³)。

平流雾和辐射雾的雾滴尺寸分布和能见度的经验公式分别为^[6]

平流雾:

$$n(r) = 1.059 \times 10^7 V^{1.15} r^2 \cdot \exp(-0.8359 V^{0.43} r) \quad (4)$$

辐射雾:

$$n(r) = 3.104 \times 10^{10} V^{1.7} r^2 \cdot \exp(-4.122 V^{0.54} r) \quad (5)$$

平流雾和辐射雾的含水量和能见度的经验公式分别为^[7]

$$\text{平流雾: } W = (18.35 V)^{-1.43} = 0.0156 V^{-1.43} \quad (6)$$

$$\text{辐射雾: } W = (42.0 V)^{-1.54} = 0.00316 V^{-1.54} \quad (7)$$

式中, V 为雾的能见度,单位为km, W 为含水量,单位为(g/m³), $n(r)$ 的单位为(m⁻³μm⁻¹)。

2.2 雾衰减的预测模型

雾引起的激光束衰减的预报主要有以下两种方法:一是建立物理模型;二是建立经验模型。激光衰减基于能见度的经验模型在工程中应用广泛,这是由于能见度的主要限制因素不是大气分子而是大气气溶胶,因而把能见度与气溶胶的衰减,特别是晴朗、霾、雾等天气联系起来更为有效^[8]。

(1) Kreid模式

Kreid提出雾的衰减系数与能见度的关系式为^[9]

$$\alpha = \frac{q}{v} \quad (8)$$

其中, q 为经验常数。

假设激光器输出的光强为 I_0 ,其中 I_1 是光穿过厚度为 z 的气层之前($z=0$)的入射光强,而 I_2 充入厚度为 z 的气层之后探测器测到的光强^[10],则

$$I_1 = \left(\frac{d_1}{d_0 + \theta_z} \right) I_0 e^{-a_0 z} \quad (9)$$

$$I_2 = \left(\frac{d_1}{d_0 + \theta_z} \right) I_0 e^{-a_1 z} = \left(\frac{d_1}{d_0 + \theta_z} \right) I_0 e^{(-a_0 + a_1)z} \quad (10)$$

式中, d_1 和 d_0 分别为接收和发射望远镜的直径, θ 为光束发散角, z 为传输距离, a_0 、 a_1 为实验池中大气衰减系数。将测得 I_1 和 I_2 的两式相除可得

$$I_2 = I_1 e^{-a z} \quad (11)$$

用符号 A 表示衰减率,其单位通常用db/m表示,它表示激光传播1 m时,发射功率与接收功率的相对

值,则有如下定义

$$A = \frac{10}{z} \lg \frac{I_1}{I_2} (\text{db/m}) \quad (12)$$

将式(11)代入式(12)并取 $z = 1 \text{ m}$ 得

$$A = 4.343\alpha (\text{db/m})$$

$$\text{或 } A = 4.343 \cdot 10^3 \alpha (\text{db/km}) \quad (13)$$

表2列出了四个波长上对应的常数 q 的值,每个值的误差大约有 $\pm(10\sim 20)\%$ 的变化

表2 不同波长对应的 q 值

$\lambda/\mu\text{m}$	10.6	1.06	0.63	0.53
q	2.1	3.06	3.18	2.46

由 Kreid 经验公式及式(13)可得,当激光的波长不同时

$$A_{0.63} = 13.8107 V^{-1.00} \text{ db/km} \quad (14)$$

$$A_{1.06} = 13.2896 V^{-1.00} \text{ db/km} \quad (15)$$

$$A_{10.6} = 9.1203 V^{-1.00} \text{ db/km} \quad (16)$$

(2)Chylek 模式

Chylek 提出一个半经验公式^[11],此公式适用于大部分粒子的半径小于 $13 \mu\text{m}$

$$\alpha = 1.5\pi CW/\lambda(\text{m}^{-1}) \quad (17)$$

其中, W 单位为 g/m^3 , λ 单位为 μm , C 为常数。不同波长的 C 值如表3所示。

表3 不同波长的 C 值

$\lambda/\mu\text{m}$	1.06	3.8	5.3	10.6	11	12
C	0.61	0.68	0.58	0.33	0.30	0.35

利用 Chylek 半经验公式及式(6)和式(7)可得

当激光的波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 时

$$\text{平流雾: } A = 183.6366 V^{-1.43} \text{ db/km} \quad (18)$$

$$\text{辐射雾: } A = 37.198 V^{-1.54} \text{ db/km} \quad (19)$$

当激光的波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 时

$$\text{平流雾: } A = 9.9344 V^{-1.43} \text{ db/km} \quad (20)$$

$$\text{辐射雾: } A = 2.0124 V^{-1.54} \text{ db/km} \quad (21)$$

利用 Chylek 半经验公式及式(6)和式(7)可得其他波长的衰减如下

$$\text{平流雾: } A_{3.8} = 57.1032 V^{-1.43} \text{ db/km} \quad (22)$$

$$A_{5.3} = 34.9211 V^{-1.43} \text{ db/km} \quad (23)$$

$$A_{11} = 8.7029 V^{-1.43} \text{ db/km} \quad (24)$$

$$A_{12} = 9.3073 V^{-1.43} \text{ db/km} \quad (25)$$

$$\text{辐射雾: } A_{3.8} = 11.5671 V^{-1.54} \text{ db/km} \quad (26)$$

$$A_{5.3} = 7.0738 V^{-1.54} \text{ db/km} \quad (27)$$

$$A_{11} = 1.7629 V^{-1.54} \text{ db/km} \quad (28)$$

$$A_{12} = 1.8853 V^{-1.54} \text{ db/km} \quad (29)$$

(3)Vasseur 模式

Vasseur 根据实验数据得到了 $10.6 \mu\text{m}$ 和 $0.63 \mu\text{m}$ 的激光衰减经验公式^[12]

$$A_{0.63} = 360 W^{0.64} \quad (30)$$

$$A_{10.6} = 610 W \quad (31)$$

当激光的波长为 $0.63 \mu\text{m}$ 时

$$\text{平流雾: } A = 360 W^{0.64} = 25.1132 V^{-0.9152} \text{ db/km} \quad (32)$$

$$\text{辐射雾: } A = 360 W^{0.64} = 15.3154 V^{-0.9856} \text{ db/km} \quad (33)$$

当激光的波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 时

$$\text{平流雾: } A = 610 W = 9.516 V^{-1.43} \text{ db/km} \quad (34)$$

$$\text{辐射雾: } A = 610 W = 1.9276 V^{-1.54} \text{ db/km} \quad (35)$$

2.3 新的经验模式

由于雾滴的尺度与红外光波长相当,此时产生 Mie 散射, Mie 散射适用于如雨、雾和霾等球形粒子的环境中。根据 Lamber-Beer 定律,用消光率因子代替消光截面,可以把雾的衰减表示为^[13]

$$A = 4.343 \times 10^3 \int_0^\infty \pi r^2 Q_e(x, m) n(r) dr \quad (\text{db/km}) \quad (36)$$

式中, Q_e 为雾滴的消光截面,与雾滴半径 r 、雾滴折射率 m 以及激光波长 λ 有关, $n(r)$ 为雾滴分布函数, $x = kr = 2\pi r/\lambda$ 为粒子的尺度参数。

根据离散坐标法计算数值结果的拟合和衰减率随各因素的变化关系,提出了激光在雾中衰减的一种新的经验模式,该公式可看作是对单次散射数值结果的拟合修正^[14]

$$A = a \exp\left(-\frac{C_1}{z} - c_2 \theta\right) v^b (\text{db/km}) \quad (37)$$

式中, z 是测量距离,单位为 m , θ 是接收器视场角, a , b , C_1 , C_2 均是常数。当波长不同时,各参量也不同,下面给出了波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 时的各参量值。

$$\text{在平流雾下 } a = \begin{cases} 28.42087 & 0.01V & 0.05 \\ 11.30539 & 0.05V & 1.0 \end{cases}$$

$$b = \begin{cases} -0.88526 & 0.01V & 0.05 \\ -1.23293 & 0.05V & 1.0 \end{cases}$$

$$c_1 = \begin{cases} 3.473\ 26 & 0.01V & 0.05 \\ 4.102\ 55 & 0.05V & 1.0 \end{cases}$$

$$c_2 = \begin{cases} 0.001\ 35 & 0.01V & 0.05 \\ 0.004\ 54 & 0.05V & 1.0 \end{cases}$$

在辐射雾下 $a = \begin{cases} 3.078\ 98 & 0.01V & 0.05 \\ 1.238\ 6 & 0.05V & 1.0 \end{cases}$

$$b = \begin{cases} -1.396\ 13 & 0.01V & 0.05 \\ -1.731\ 99 & 0.05V & 1.0 \end{cases}$$

$$c_1 = 0.602\ 99 \quad c_2 = 0.003$$

2.4 实验结果及分析

不同经验模式的衰减仿真结果如图1所示。图1中 advection 表示平流雾, radiation 表示辐射雾。

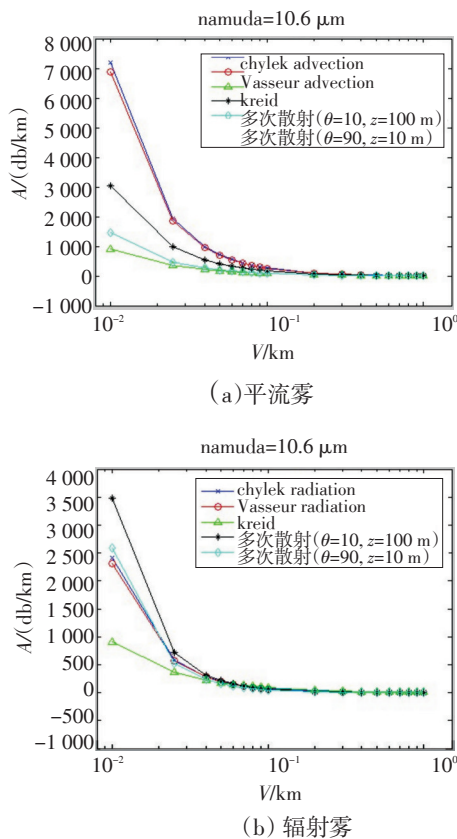


图1 10.6 μm激光雾衰减率随能见度的变化

以 0.63 μm、1.06 μm 和 10.6 μm 波长为例,对 kreid 模型、Chylek 模型和 Vasseur 模型进行仿真,比较三种经验模式的衰减率随能见度的变化。图1是波长为10.6 μm的激光分别在平流雾、辐射雾和单次

散射拟合公式下的衰减随能见度的变化关系,从图1a和图1b中看出,Chylek模型和Vasseur模型的衰减相当接近。在图1a中,可以看出当视场角较大,而测量距离较小时,与kreid模型的结果相接近。在图1b中,可以看出测量距离较小,而视场角较大时,其结果相接近于Chylek模式和Vasseur模式的结果,且随能见度的增大,与三种经验模型的结果相吻合。图2是波长为1.06 μm的可见光衰减随能见度的变化关系,当能见度小于1 km时,平流雾比辐射雾的衰减系数大,kreid模型的衰减系数最小。图3是波长为0.63 μm的可见光衰减随能见度的变化关系,kreid模型和辐射雾下Vasseur模型的预测结果很接近。图4是在Chylek模型下,各种不同波长的激光在平流雾和辐射雾中的衰减随能见度的变化关系,从图4a和图4b中看出,波长为1.06 μm可见光的衰减系数最大,随着波长的增大,衰减系数相应地呈递减趋势,平流雾的衰减系数比辐射雾的衰减系数要大。以上四幅图对比而知,在同一波长和相同能见度的情况下,平流雾的衰减趋势高于辐射雾。原因在于平流雾中比辐射雾中含有更多大尺度的雾滴,还有平流雾含有更高的水量。

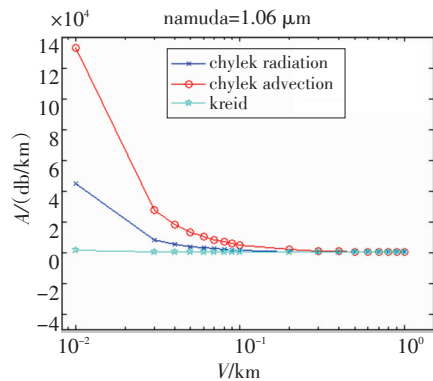


图2 1.06 μm的激光雾衰减率随能见度的变化

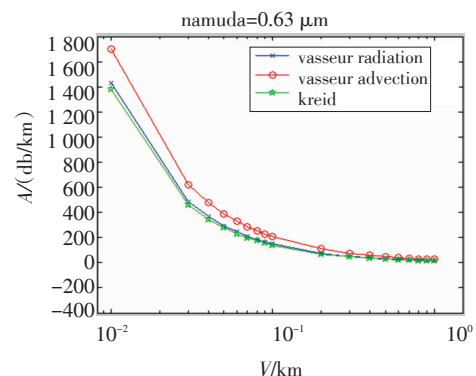


图3 0.63 μm的激光雾衰减率随能见度的变化

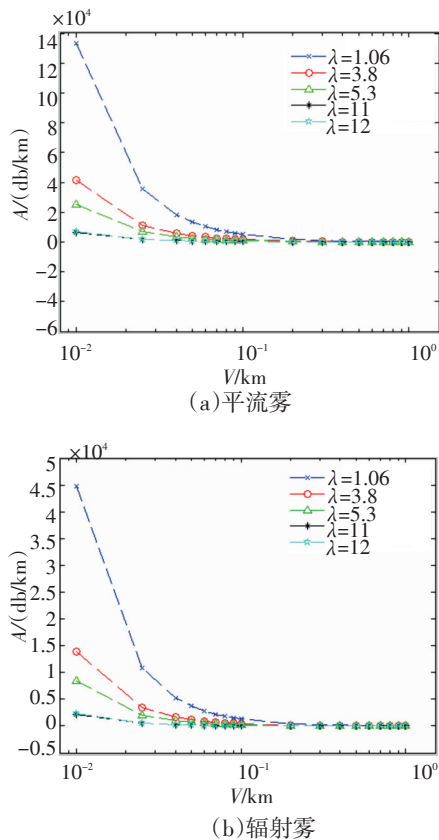


图4 在Chylek经验公式下雾衰减率随能见度的变化

3 结论

雾是一种千变万化的、纷繁复杂的大气过程,传输媒质在雾天的传输中随时间和距离的变化产生随机波动变化,因此会对激光传输的质量产生很大影响。从大气衰减系数受能见度的影响基本点出发,对雾天气下激光在大气中传输的衰减效应进行了研究,重点分析和总结了雾衰减信道的三种经验模型,同时针对多次散射,提出了一种新的经验模型,并运用Matlab平台做了仿真分析。由仿真图可以看出,当能见度较大时,不同模式计算的衰减率曲线几乎重叠,由此可知能见度越大,差别就越小;相反,当能见度为较低的浓雾时,不同模式计算的衰减率相差很大,能见度越低,差别就越大。这是由于用半经验

模式来分析衰减模式,最大的缺陷在于没有包含视场角及测量距离的信息,针对该缺陷,文中提出了一种计算雾天气下大气衰减新的经验公式,通过仿真图,在一定程度上验证了所提出模型的合理性,但总体来说,半经验模式仍然证明了能见度与大气衰减比较紧密的关系,为大气激光通信系统的设计和改进提供参考。

参考文献

- [1] 陈静,薛海中,刘学文,等.无线激光通信系统弱光干扰技术[J]. 光学学报,2012,32(1):55-61.
- [2] 韩成,白宝兴,杨华民,等.大气信道对激光脉冲延迟时间影响的仿真研究[J]. 光学学报,2009,29(8):2046-2049.
- [3] 李素娟,蒋维安.雾对能见度的影响估算[J]. 中国民航大学学报,2010,28(6):1-3.
- [4] 冒晓莉.雾对脉冲激光传输的影响[D]. 南京:南京信息工程大学,2007:20-21.
- [5] 柯熙政,马东东,刘佳妮.激光在雾中传输的衰减研究[J]. 光散射学报,2009(2):104-109.
- [6] 孙超,王红霞,傅关新,等.雾对激光的衰减特性研究[J]. 光散射学报,2011,23(3):201-205.
- [7] 赵振维,吴振森,沈广德,等.一种计算云雾毫米波衰减的经验模式[J]. 电波科学学报,2000,15(3):300-303.
- [8] 陈玉茹,李晴,王洪娟.1.06 μm 激光大气衰减系数理论计算模型研究[J]. 大气与环境光学学报,2012,7(2):96-97.
- [9] 李娣,陈辉.激光大气传输的雨雾衰减特性研究[J]. 电子设计工程,2011,19(9):1-5.
- [10] 刘敏,王红星,王倩,等.雨雾共存天气下大气衰减计算的修正模型[J]. 中国激光,2011,38(10):101-105.
- [11] 赵振维,吴振森,沈广德,等.雾对10.6 μm 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.
- [12] 于胜云,陈名松,李天松.自由空间光通信传输信道雨雾衰减特性研究[J]. 广西通信技术,2008(1):42-44.
- [13] 吴荣华,王江安,康圣,等.多波长激光的大气消光系数相关性及时反演计算研究[J]. 红外与毫米波学报,2009,28(3):224-228.
- [14] 王瑞.激光在雾媒质中的传播衰减特性研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2007:13-30.