

文章编号: 1672-8785(2013)12-0014-06

雾天环境下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: 激光在大气中传输时容易受天气的影响, 因为雨、雪、雾等恶劣天气对激光有严重的衰减作用, 会使通信的稳定性变差。因此分析激光在不同天气条件下的传输效应和衰减特性非常有必要。本文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了 Matlab 数值仿真, 得出了激光衰减系数和雾天气能见度的关系。

关键词: 激光; 能见度; 衰减率; 雾

中图分类号: TN929.12 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.12.003

Study of Attenuation Characteristics of Laser Propagation in Fog

WANG Ya-min, GAO Guo-qiang

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

Abstract: Laser is susceptible to weather when it is propagating in atmosphere. This is because the severe weather including rain, snow and fog has a great attenuation function to laser and may cause the communication to be poor. So, it is necessary to analyze the transmission effect and attenuation characteristics of laser under different weather conditions. According to the experience relations of water content and visibility in radiation fog and advection fog, the formulas for calculating the transmission attenuation of laser in atmosphere under the fog weather condition are analyzed. Three typical empirical models for fog attenuation are simulated numerically by Matlab and the relationship of the visibility in fog with the attenuation coefficient of laser is obtained.

Key words: laser; visibility; attenuation rate; fog

0 引言

大气激光通信因为具有通信容量大、保密性强、速率快、结构方便、设备经济和无须频率许可等优点, 已经在深空、星地、星星和局域网等领域得到了应用, 而且应用范围和领域还在不断扩大^[1]。由于受大气中的各种气体分子微

粒和雨雾雪等天气因素的影响, 激光信号在大气随机信道的传输过程中会严重衰减, 激光能量(如热能等)会大大减少, 而且激光的传输方向也会发生偏离(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了研究的热点。但它受大气环境因素的影响非常严重, 因此对大气激光

收稿日期: 2013-11-20

基金项目: 陕西省自然科学基础研究计划资助项目(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。

通讯作者: 高国强 E-mail: guoqiang0501@126.com

通信信道的研究显得格外重要。在近地面大气层中, 激光信号通过大气后受分子散射的影响很小, 能量的衰减主要是受到悬浮粒子的散射(米氏散射)引起的。由于米氏散射不易计算, 所以一般用与能见度有关的经验公式来表示大气衰减^[2]。最常见的衰减是雾导致的衰减。本文主要研究雾天对激光传输的衰减特性。

1 雾的分类

能见度是指在当时天气条件下, 视力正常的人在白天从天空背景中能看到和辨认出的目标物的最大水平距离和在夜间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划分^[2], 雾的强度可分为 5 个等级, 见表 1。

表 1 雾的分类

Rank	State of the weather	Atmospheric visibility
0	fog	< 50 m
1	Thick fog	50 m~200 m
2	moderate fog	200 m~500 m
3	light fog	500 m~1000 m
4	weak fog	1000 m~2000 m
5	haze	2000 m~4000 m

2 影响激光在雾中传输的因素

雾是悬浮在近地面大气中的大量可见微细水滴(或冰晶)的集合体。它会使地面的水平能见度下降, 雾中的粒子会吸收激光和散射激光, 使得传输的激光发生衰减。与初生雾相比, 长时间存在或趋于消散阶段的雾滴间的尺度相差较大。雾滴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, 大部分雾滴的平均半径小于 8 μm^[3]。当温度为正时, 大部分雾滴的半径是 7~15 μm^[4], 如我国南方的暖雾; 温度为负时, 大部分雾滴的半径是 2~5 μm, 如我国北方的冷雾。根据地域和形成机理, 雾可分成平流雾(海雾)和辐射雾(内陆雾)

两大类。平流雾的平均直径约为 20 μm, 辐射雾的雾滴直径通常小于 20 μm。

2.1 雾滴的尺寸分布

雾滴的尺寸按 Gamma 分布^[5]。这种分布不仅适用于大陆、海洋的霾, 也适用于平流层的气溶胶。

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

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 m 为单位, 有^[6]:

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

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

式中, V 为雾的能见度(km), W 为含水量(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^[7]

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^[8]

平流雾:

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

辐射雾:

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

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

平流雾和辐射雾的雾滴浓度与含水量的经验公式分别为^[9]

平流雾:

$$N = 50.8W^{0.098} \quad (8)$$

辐射雾:

$$N = 609.2W^{-0.052} \quad (9)$$

式中, N 为雾滴的浓度, 单位为 cm⁻³。

图1给出了雾滴浓度与含水量的关系, 图中advection表示平流雾, radiation表示辐射雾。从图中可以看出, 对于辐射雾, 雾滴的浓度随含水量的增加而减小, 而平流雾的雾滴浓度随含水量的增加而增加。在同样的条件下, 辐射雾雾滴的浓度比平流雾雾滴的浓度约大一个数量级。此图给出的含水量是 $0.01\sim1.0\text{ g/m}^3$, 辐射雾的浓度范围是 $609\sim750/\text{cm}^3$, 而平流雾的雾滴浓度范围是 $32\sim51/\text{cm}^3$ 。由此可以看出, 不论是平流雾还是辐射雾, 雾滴浓度的变化不是很大, 影响雾的含水量和能见度的因素主要是雾滴的尺度。

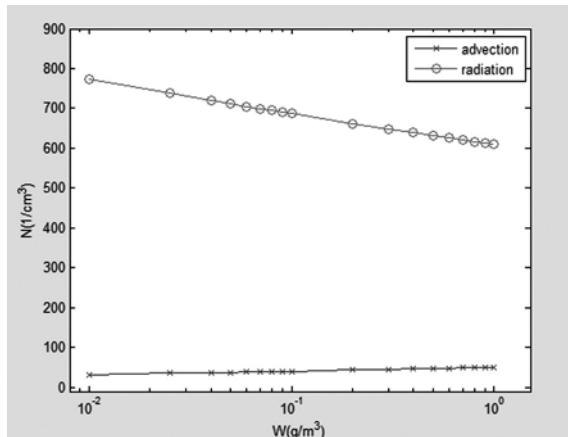


图1 雾滴浓度与含水量的关系

2.2 激光衰减的预测模型

雾引起激光束的衰减预报主要有建立物理模型和建立经验模型两种方法。基于能见度的激光衰减经验模型在工程中被应用广泛, 这是由于能见度的主要限制因素是大气气溶胶, 不是大气分子。因此, 把能见度与气溶胶的衰减联系起来更为有效^[10], 特别是在晴、霾、雾等天气条件下。

(1) Kreid 模式

Kreid 提出的雾的衰减系数与能见度的关系式为^[11]

$$\alpha = \frac{q}{v} \quad (10)$$

式中, q 为经验常数。

假设激光器输出时光强为 I_0 , 光穿过厚度为 z 的气层之前 ($z=0$) 的入射光强为 I_1 , 充入

厚度为 z 的气层之后探测器测到的光强是 I_2 ^[12], 则

$$I_1 = \left(\frac{d_1}{d_0 + \theta_z} \right) I_0 e^{-\alpha_0 z} \quad (11)$$

$$I_2 = \left(\frac{d_1}{d_0 + \theta_z} \right) I_0 e^{-\alpha_1 z} = \left(\frac{d_1}{d_0 + \theta_z} \right) I_0 e^{(-\alpha_0 + \alpha_1)z} \quad (12)$$

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, α_0 、 α_1 为实验池中大气的衰减系数。将测得 I_1 和 I_2 的两式相除, 可得

$$I_2 = I_1 e^{-\alpha z} \quad (13)$$

衰减率指激光传播 1 m 时发射功率与接受功率的相对值, 用符号 A 表示, 单位通常为 db/m , 定义如下:

$$A = \frac{10}{z} \lg \frac{I_1}{I_2} (\text{db}/\text{m}) \quad (14)$$

将式(13)代入式(14), 并取 $z = 1 \text{ m}$, 得

$$A = 4.343 \cdot 10^3 \alpha (\text{db}/\text{km}) \quad (15)$$

表2列出了四个波长对应的常数 q 值, 每个值的误差大约为 $\pm(10\sim20)\%$ 。这些数据表明, 传输时 $10.6\mu\text{m}$ 波长的激光比其他波长的激光具有更好的透雾性能。

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(15), 可得出不同波长激光的衰减率:

$$A_{0.63} = 13.8107V^{-1.00}\text{db/km} \quad (16)$$

$$A_{1.06} = 13.2896V^{-1.00}\text{db/km} \quad (17)$$

$$A_{10.6} = 9.1203V^{-1.00}\text{db/km} \quad (18)$$

(2) Chylek 模式

Chylek 提出了一个半经验公式^[13], 此公式在大部分雾粒子的半径小于 $13\mu\text{m}$ 时适用。该公式为

$$\alpha = 1.5\pi CW/\lambda(m^{-1}) \quad (19)$$

式中, W 的单位为 g/m^3 , λ 的单位为 μm , C 为常数。不同波长的 C 值见表 3。

表 3 不同波长的 C 值

$\lambda(\mu m)$	1.06	3.8	5.3	10.6	11	12
C	0.61	0.68	0.58	0.33	0.30	0.35

当激光的波长为 1.06 μm 时, 利用 Chylek 半经验公式及式(6)和式(7), 可得

$$\text{平流雾: } A = 183.6366V^{-1.43} \text{db/km} \quad (20)$$

$$\text{辐射雾: } A = 37.198V^{-1.54} \text{db/km} \quad (21)$$

当激光的波长为 10.6 μm 时,

$$\text{平流雾: } A = 9.9344V^{-1.43} \text{db/km} \quad (22)$$

$$\text{辐射雾: } A = 2.0124V^{-1.54} \text{db/km} \quad (23)$$

利用 Chylek 半经验公式及式(6)和式(7), 可得其他波长激光的衰减公式:

$$\text{平流雾: } A_{3.8} = 57.1032V^{-1.43} \text{db/km} \quad (24)$$

$$A_{5.3} = 34.9211V^{-1.43} \text{db/km} \quad (25)$$

$$A_{11} = 8.7029V^{-1.43} \text{db/km} \quad (26)$$

$$A_{12} = 9.3073V^{-1.43} \text{db/km} \quad (27)$$

$$\text{辐射雾: } A_{3.8} = 11.567V^{-1.54} \text{db/km} \quad (28)$$

$$A_{5.3} = 7.0738V^{-1.54} \text{db/km} \quad (29)$$

$$A_{11} = 1.7629V^{-1.54} \text{db/km} \quad (30)$$

$$A_{12} = 1.8853V^{-1.54} \text{db/km} \quad (31)$$

(3) Vasseur 模式

Vasseur 根据实验数据得到了 10.6 μm 和 0.63 μm 的激光衰减经验公式^[14]:

$$A_{0.63} = 360W^{0.64} \quad (32)$$

$$A_{10.6} = 610W \quad (33)$$

当激光的波长为 0.63 μm 时,
平流雾:

$$A = 360W^{0.64} = 25.1132V^{-0.9152} \text{db/km} \quad (34)$$

辐射雾:

$$A = 360W^{0.64} = 15.3154V^{-0.9856} \text{db/km} \quad (35)$$

当激光的波长为 10.6 μm 时,

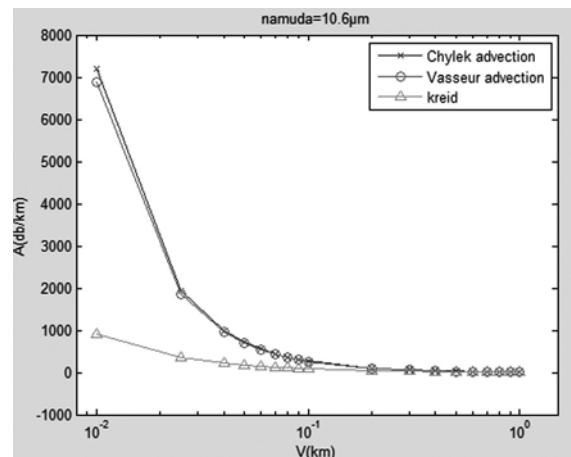
$$\text{平流雾: } A = 610W = 9.516V^{-1.43} \text{db/km} \quad (36)$$

$$\text{辐射雾: } A = 610W = 1.9276V^{-1.54} \text{db/km} \quad (37)$$

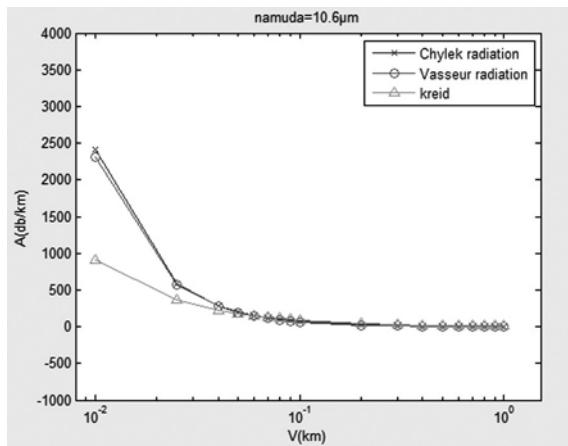
2.3 实验结果及分析

不同经验模式的衰减仿真结果如下图所示。图中 advection 表示平流雾, radiation 表示辐射雾。

以 0.63 μm 、1.06 μm 和 10.6 μm 波长为例, 对 Kreid 模型、Chylek 模型、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 2 是波长为 10.6 μm 的激光分别在平流雾和辐射雾下的衰减率随能见度的变化关系。从图 2 中可以看出, Chylek 模型和 Vasseur 模型的衰减相当接近。图 3 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 4 是波长为 0.63 μm 的可见光衰减随能见度的变化关系, 在 Kreid 模型和辐射雾下 Vasseur 模型的预测结果很接近。图 5 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 6 中可以看出, 波长为 1.06 μm 的可见光的衰减系数最大。随着能见度的增大, 激光在雾中传输时的衰减不断减小。



(a)



(b)

图 2 10.6 μm 激光在雾中的衰减率随能见度的变化。 (a) 为平流雾, (b) 为辐射雾

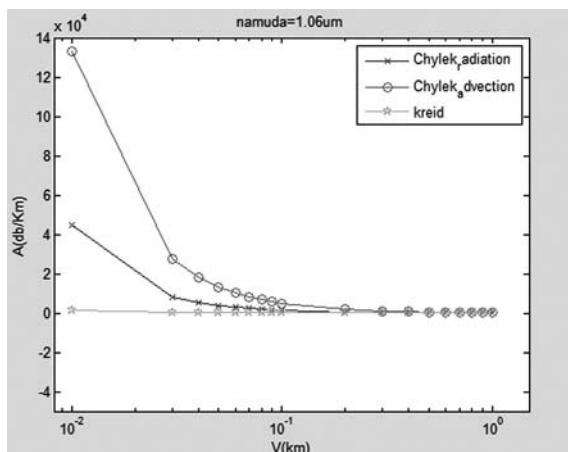


图 3 1.06 μm 激光在雾中的衰减率随能见度的变化

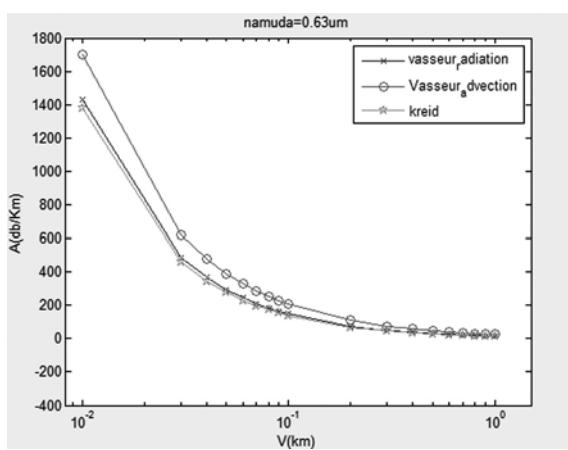
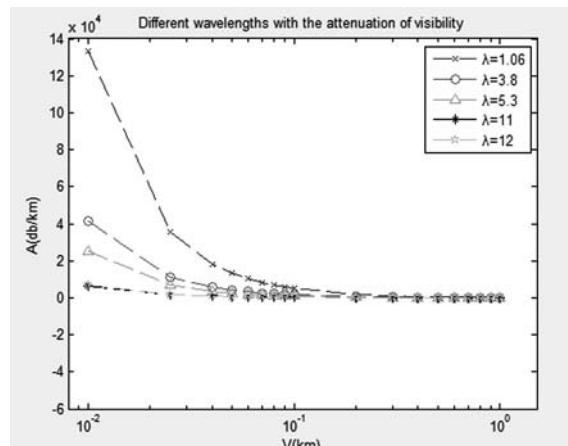
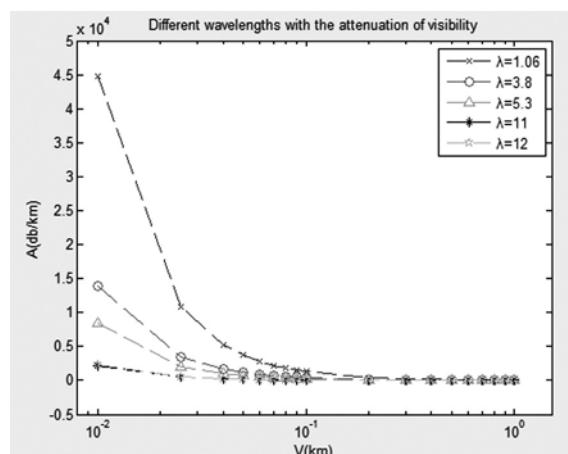


图 4 0.63 μm 激光在雾中的衰减率随能见度的变化



(a)



(b)

图 5 在 Chylek 经验公式下激光在雾中的衰减率随能见度的变化。 (a) 为平流雾, (b) 为辐射雾

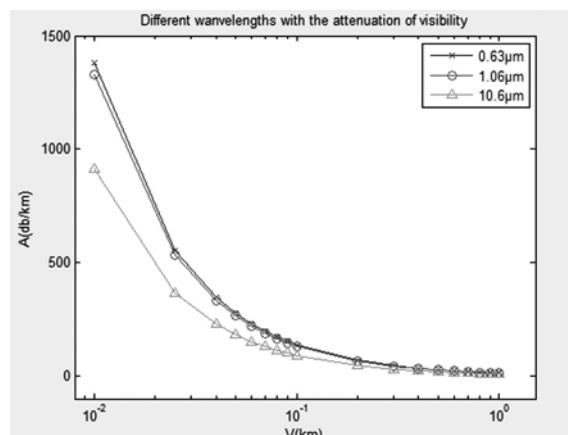


图 5 在 Chylek 经验公式下激光在雾中的衰减率随能见度的变化。 (a) 为平流雾, (b) 为辐射雾

在同样的条件下, 长波长的激光衰减较小。它在

平流雾中的衰减系数比在辐射雾中的要大。在 Kreid 模型下, 不同波长激光在雾中传输时的衰减系数和能见度的关系如图 6 所示。浓雾时各种波长辐射的衰减都很严重, 即使是透雾性较好的 10.6 μm 激光, 在能见度为 100 m 时衰减系数也达到了 91 db/km。比较图 2~图 6 发现, 在波长相同和能见度相同的情况下, 激光在平流雾中的衰减趋势比在辐射雾中的高。原因在于平流雾含有的雾滴的尺寸比辐射雾的大, 而且平流雾含有的水量也更高。

3 结论

雾是一种千变万化、纷繁复杂的大气过程。传输媒质在雾天会随时间和距离产生随机的波动变化, 因此雾会对激光传输的质量产生很大的影响。考虑到大气的衰减系数受能见度的影响, 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 平台进行了仿真分析。由仿真图可以看出, 能见度较大时, 用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, 不同模式计算的衰减率的差别就越小; 相反, 当能见度较低时, 用不同模式计算的衰减率相差很大, 能见度越低, 差别就越大。原因在于用半经验模式分析衰减模式时, 在低能见度的情况下, 雾的多次散射效应不能忽视, 接收器的视场角及测量距离的信息均是影响衰减率的因素。当能见度高于 0.5 km 的情况下, 不同学者给出的经验衰减模式之间的衰减率差别很小。原因在于高能见度下雾对激光的散射近似于单次散射, 单次散射的衰减与接收器视场角及测量距离没有关系。总体来说, 半经验模式仍

然证明了能见度与大气衰减有着比较紧密的关系, 研究结果为大气激光通信系统的设计和改进提供了参考。

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.
- [5] Ke X Z, Ma D D, Liu J N. Study Attenuation of Laser Transmission in Fog [J]. The Journal of Light Scattering, 2009, 21(2): 104–109.
- [6] 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, 21(2): 104–109.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 董群锋. 毫米波段脉冲波在雨雾媒质中传输效应研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.