

doi: 10.3788/gzxb20154402.0229001

沙尘天气下大气能见度对激光光强的影响

王惠琴¹, 王彦刚¹, 曹明华¹, 张倩芸²

(1 兰州理工大学 计算机与通信学院, 兰州 730050)

(2 上海大学 通信与信息工程学院, 上海 200072)

摘要: 基于米氏理论, 分别研究了不同波长的激光信号在沙尘天气中发生单次散射和多次散射时光强与能见度间的变化关系. 推导出发生单次散射时光强与能见度间的解析表达式, 同时采用蒙特卡洛方法分析了发生多次散射时光强与能见度间的关系, 并与单次散射时的结果进行对比. 结果表明: 在激光信号波长固定时, 接收光强会随着沙尘能见度的增大而增加, 并趋于稳定值; 在能见度固定时, 接收光强会随着激光信号波长的增大而减小; 随着传输距离的增加, 多次散射的影响会越来越明显.

关键词: 大气激光通信; 激光散射; 米氏理论; 激光光强; 沙尘能见度

中图分类号: TN911.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)02-0229001-6

Impact of Atmospheric Visibility on Laser Intensity in Sand and Dust Weather

WANG Hui-qin¹, WANG Yan-gang¹, CAO Ming-hua¹, ZHANG Qian-yun²

(1 School of Computer & Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

(2 School of Communication & Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The relationship of atmospheric visibility to laser intensity was analyzed based on Mie theory under the conditions of single scattering and multiple scattering scenarios in sand and dust weather. An improved analytical expression of laser intensity and atmospheric visibility was derived in single scattering scenario. The multiple scattering was simulated by Monte Carlo method and compared with single scattering. The results show that the received laser intensity will be increased with the increment of atmospheric visibility and approximate to a saturated value when the laser wavelength and transmission distance is constant. Moreover, when the atmospheric visibility remain unchanged, the received laser intensity will be decreased with the increment of laser wavelength, and with the increase of transmission distance, the influence of multiple scattering will become more and more notable.

Key words: Atmospheric optical communication; Laser scattering; Mie theory; Laser intensity; Atmospheric visibility of sand and dust weather

OCIS Codes: 290.4020; 290.4210; 290.5850; 290.1090; 290.2558

0 引言

物联网等新兴技术的崛起以及军事、灾难救援等应急通信需求的增加使高速率无线光传输系统及其应用受到越来越多的重视. 无线光通信容易受到外界环境的影响, 近年来人们对大气湍流、雨、云和雾等对激

光信号造成的影响进行了研究, 并取得丰硕的成果^[1-7].

目前, 随着自然环境的恶化, 我国北方沙尘天气频发, 空气中沙尘粒子的浓度增加, 尤其是西北部地区作为沙尘天气的策源地和频发区, 年平均沙尘天气约为 70 天^[8]. 沙尘天气下悬浮颗粒对激光造成的散射和吸

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61265003, 61465007, 61461026), 甘肃省高等院校基本科研业务经费资助课题(No. 1114ZTC142), 甘肃省自然科学基金(Nos. 1310RJYA010, 1212RJZA019)和兰州理工大学博士基金项目资助

第一作者: 王惠琴(1972-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为无线光通信理论与技术. Email: whq1222@lut.cn

通讯作者: 王彦刚(1988-), 男, 硕士, 主要研究方向为无线光通信理论与技术. Email: hebeiwangyang@163.com

收稿日期: 2014-06-11; **录用日期:** 2014-08-28

<http://www.photon.ac.cn>

收会严重影响近地面无线光通信的有效性和可靠性. 目前关于沙尘对激光信号影响的研究主要集中在信号衰减和散射方面. Haley 等利用 T 矩阵方法和累加法等研究了激光信号在沙尘天气下传播时的单次散射特性和多次散射特性^[9-11]. 杨瑞科等通过建立不同的散射和衰减模型分析了沙尘粒子的分布、尺度参量和介电常量等因素对激光信号传播的影响^[12-14]. 本文以米氏理论为基础, 通过数值模拟研究激光信号在沙尘天气中发生单次散射和多次散射时光强与能见度之间的关系.

1 单次散射下能见度与光强间的关系

沙尘天气通常分为浮尘、扬沙和沙尘暴三类状态. 浮尘天气中细沙均匀地浮游在大气中, 使水平能见度大于 10 km; 扬沙天气中风将地面沙尘吹起, 能形成离地一定高度上沙尘粒子的跃移、悬浮和飘移, 水平能见度在 1 km 至 10 km 以内; 沙尘暴是指在大风的作用下, 地面沙尘被吹起在空中形成相当高的浓度、水平能见度小于 1 km 的天气现象^[8]. 沙尘粒子的平均半径小于 0.1 mm, 不同地区的沙尘粒子具有不同的特性. 在我国典型沙尘区, 其沙尘粒径服从对数正态分布函数^[15], 即

$$p(r) = \frac{1}{2r\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln(2r)-\mu}{\sigma}\right]^2\right\} \quad (1)$$

式中, r 表示的是沙尘粒子的半径, σ 和 μ 分别表示 $\ln(2r)$ 的标准差和数学期望, 其典型取值为 $\mu = -19.72$ 和 $\sigma = 0.405$.

大气中随机分布的沙尘粒子会引起激光信号的散射和吸收. 在传输距离一定时, 沙尘对激光的吸收是确定的, 而沙尘对激光的散射是随机的. 其原理如图 1.

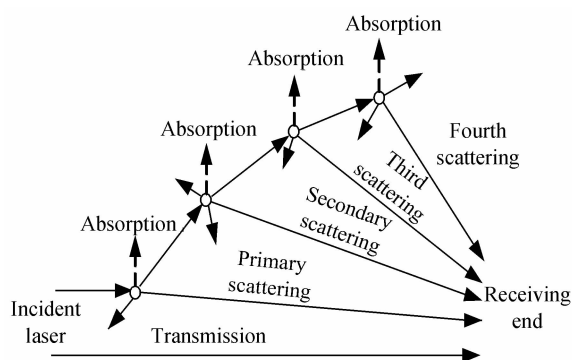


图 1 激光信号传输

Fig. 1 Sketch map of laser signal transmission

在强度调制的无线光通信系统中, 散射的随机性会引起接收端光强的起伏, 使得误码率增加, 导致通信质量下降. 当大气中沙尘粒子之间的距离大于三倍粒子直径时, 可认为粒子间的散射是相互独立的, 此时只需要考虑单次散射的作用^[16]. 根据米氏理论, 单个沙尘粒子的散射光强可表示为^[16]

$$I = \frac{\lambda^2}{8\pi^2 d^2} I_0 (i_1 + i_2) \quad (2)$$

式中, λ 表示激光信号的波长, d 表示沙尘粒子与观测点之间的距离, I_0 表示入射光的光强, i_1 和 i_2 表示散射光的强度函数, 其表达式为

$$i_1 = S_1(m, \theta, \alpha) \cdot S_1^*(m, \theta, \alpha) \quad (3)$$

$$i_2 = S_2(m, \theta, \alpha) \cdot S_2^*(m, \theta, \alpha) \quad (4)$$

式中, S_1 和 S_2 表示散射光的振幅函数, θ 表示散射角, α 表示沙尘粒子的尺度参量, m 表示沙尘粒子的折射系数. 振幅函数可以用无穷级数来表示, 即

$$\begin{cases} S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi_n(\cos \theta) + b_n \tau_n(\cos \theta)] \\ S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \tau_n(\cos \theta) + b_n \pi_n(\cos \theta)] \end{cases} \quad (5)$$

式中, a_n 和 b_n 表示米氏散射系数, π_n 和 τ_n 可通过勒让德函数来表示, 即

$$\pi_n = \frac{P_n^{(1)}(\cos \theta)}{\sin \theta} \quad (6)$$

$$\tau_n = \frac{dP_n^{(1)}(\cos \theta)}{d\theta} \quad (7)$$

式中 $P_n^{(1)}(\cos \theta)$ 表示一阶 n 次第一类缔合勒让德函数.

在多粒子的单次散射中, 沙尘粒子对激光的衰减和散射可以用消光效率因子 Q_e 和散射效率因子 Q_s 来表示. 消光效率因子和散射效率因子可通过对米氏散射系数的无穷项加权求和得到

$$Q_e = \frac{2}{\alpha} \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (a_n + b_n) \quad (8)$$

$$Q_s = \frac{2}{\alpha} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (9)$$

而吸收效率因子 Q_a 数值取消光效率因子和散射效率因子之差.

为了具体反映效率因子与沙尘粒子半径间的关系, 分别计算了当信号波长为 $8 \mu\text{m}$ 和 $10.6 \mu\text{m}$ 时效率因子的变化情况, 结果如图 2 和 3. 图 2 表示波长为 $8 \mu\text{m}$ 的激光信号通过沙尘时效率因子与半径间的关系, 假设不考虑水分子对激光信号的影响, 本文采用干沙的折射系数为 $m = 1.55 - i0.005$ ^[10]. 由图 2 可知: 1) 从整体变化过程来看, 三种效率因子中, 消光效率因子最大, 吸收效率因子最小; 2) 消光、散射和吸收效率因子都是从 0 开始, 且随着沙尘粒子半径的增加, 消光和散射效率因子以震荡的方式分别趋于稳定值 2.1 和 1.35, 吸收效率因子则以平缓的上升趋势趋于稳定值 0.75. 图 3 是波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 时激光信号通过沙尘时效率因子与沙尘粒子半径间的关系, 与图 2 相比, 主要的区别在于消光和散射效率因子的震荡幅度比较大, 且消光、散射和吸收效率因子分别趋于稳定值 2.15、1.48 和 0.67.

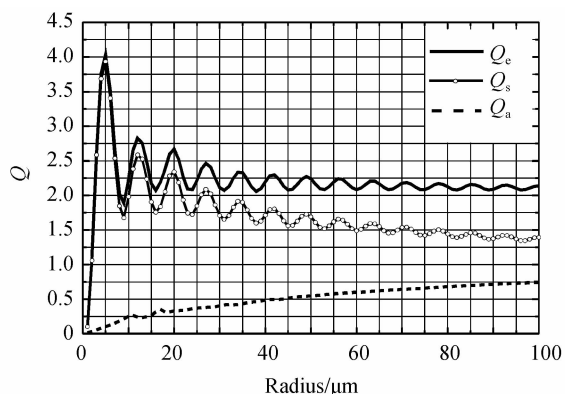


图2 消光、散射和吸收效率因子与沙尘粒子半径间的关系 (信号光波长=8 μm)

Fig. 2 The relationship of attenuation, scattering and absorbing efficiency with the sand and dust radius (laser wavelength=8 μm)

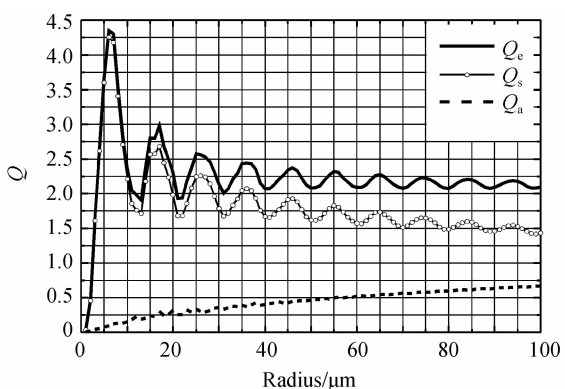


图3 消光、散射和吸收效率因子与沙尘粒子半径间的关系 (信号光波长=10.6 μm)

Fig. 3 The relationship of attenuation, scattering and absorbing efficiency with the sand and dust radius (laser wavelength=10.6 μm)

信号光强在单位距离上的衰减量可以通过消光系数来描述,而能见度反映了沙尘粒子的消光特性.根据米氏理论,光在沙尘粒子中发生单次散射时,消光系数与散射系数分别为

$$\mu_e = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_e \rho N(r) dr \quad (10)$$

$$\mu_s = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_s \rho N(r) dr \quad (11)$$

式中,ρ表示单位体积内沙尘粒子的个数,r表示沙尘粒子的半径,N(r)是沙尘粒子的尺度分布概率密度函数,可表示为 $N(r) = P(r) / \rho$.

在使用强度调制的无线光通信系统中,接收端根据接收光强来完成信息的检测,因此准确描述出光强的变化至关重要.由Bouguer定律可知,强度为 I_0 的激光信号在消光系数为 μ_e 的介质中传输时,其强度为

$$I = I_0 \exp(-\int_0^l \mu_e dl) \quad (12)$$

式中,l为传输距离.将式(10)中的积分项在整个沙尘粒径范围内进行积分,并将积分结果带入式(12)可得

光强与沙尘粒子浓度 ρ 之间的关系为

$$I = I_0 \exp(-\rho \int_0^l \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_e N(r) dr dl) \quad (13)$$

通常情况下,借助沙尘能见度 V 来描述沙尘粒子的浓度 ρ.根据 Koschmieder 定律,能见度与消光系数之间的关系可以描述为^[17]

$$V = 15 / \alpha_0 \quad (14)$$

$$\alpha_0 = 8.686 \times 10^{-3} \pi \rho \int_0^{\infty} r^2 N(r) dr \quad (15)$$

其中 α_0 为 μ_e 的 dB 形式,单位为 dB/km.

将式(14)所表示的能见度与消光系数之间的关系以及由式(15)所表示的消光系数与沙尘粒子浓度的关系转化成能见度与粒子浓度间的关系,并将所得结果和式(13)结合,可得在多粒子单次散射下,光强与能见度间的关系为

$$I = I_0 \exp \left[\frac{-15 \int_0^l \int_0^{\infty} \sigma_e N(r) dr dl}{8.686 \times 10^{-3} \pi V \int_0^{\infty} r^2 N(r) dr} \right] \quad (16)$$

为了具体反映光强与能见度间的关系,分别计算了波长为 1.06 μm、1.55 μm 和 10.6 μm 的激光信号在不同能见度的沙尘中传播时光强的变化情况(假设激光的初始光强为 1 W).其中,图 4、5 分别为三种不同

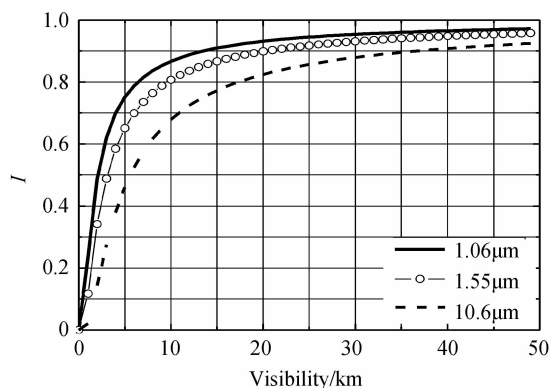


图4 光强与能见度间的关系(l=1 000 m)

Fig. 4 The relationship of atmospheric visibility with laser intensity(l=1 000 m)

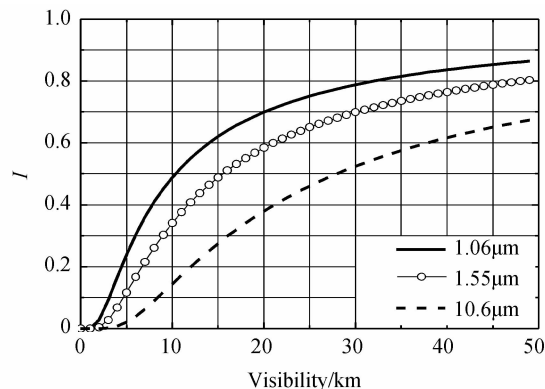


图5 光强与能见度间的关系(l=5 000 m)

Fig. 5 The relationship of atmospheric visibility with laser intensity(l=5 000 m)

波长的激光信号在沙尘中传输 1 000 m 和 5 000 m 时光强与能见度间的关系。

由图 4 可知,当信号波长一定时,光强随着能见度的增加而增加,并最终趋于稳定值.在同一能见度下,光强随着波长的增加而减小.当能见度在 10 km 以下时,光强上升较快.当能见度为 10 km 时,波长为 1.06 μm、1.55 μm 和 10.6 μm 的激光光强分别达到 0.87 W、0.81 W 和 0.68 W.当能见度大于 10 km 时,三种波长对应的光强呈现缓慢的增长趋势,并分别趋向稳定值 0.97 W、0.96 W 和 0.92 W.由图 5 可知:当传输距离为 5 000 m 时,信号光强与能见度间的关系与图 4 所反映的关系相似,其区别主要是图 5 所反映的关系曲线没有图 4 显著.这是由于激光信号长距离传输时,多次散射作用增强,单次散射不足以反映光强与能见度间的关系造成的。

图 4 和图 5 的结果表明:沙尘粒子对激光的单次散射作用与激光的波长有关.当波长一定时,信号光强随着能见度的增大而增加,并趋于稳定值.在同一能见度下,激光信号的波长越大,其对应的光强越小.同时,当激光远距离传输时,单次散射不足以描述光强与能见度之间的关系,须考虑到多次散射对光强的影响。

2 多次散射下能见度与光强间的关系

蒙特卡洛方法是通过用光子与随机分布粒子间的相互作用来模拟激光发生多次散射这一过程,可以模拟出各种不同情况下的发射机和接收机特性、介质边界条件以及介质散射和衰减特性,且可以将多次散射角、旋转角以及 Mie 散射的影响考虑进去,因此采用该方法来分析沙尘引起的激光信号的多次散射效应。

假设激光沿着 z 轴方向从原点开始在介质中传播,在传播的过程中光子会行进一段距离,然后与介质发生碰撞,这一过程不断循环,直到光子消失或从介质中逃逸.光子在相邻两次碰撞间行进的随机距离为^[18-19]

$$L = -\frac{\ln(\xi)}{\sigma_e} \quad (17)$$

式中, ξ 表示 $(0, 1)$ 之间的随机数.假设光子由第 n 个碰撞点 (x_n, y_n, z_n) 到达第 $n+1$ 个碰撞点 $(x_{n+1}, y_{n+1}, z_{n+1})$ 行进的随机距离为 L ,则这两点之间的关系可表示为

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n + \mu_x L \\ y_{n+1} = y_n + \mu_y L \\ z_{n+1} = z_n + \mu_z L \end{cases} \quad (18)$$

式中, μ_x 、 μ_y 和 μ_z 是光子在这两点之间直线运动的方向余弦值,光子发生碰撞后新的方向余弦为

$$\mu'_x = \frac{\sin \theta}{\sqrt{1-\mu_z^2}}(\mu_x \mu_z \cos \varphi - \mu_y \sin \varphi) + \mu_x \cos \theta \quad (19)$$

$$\mu'_y = \frac{\sin \theta}{\sqrt{1-\mu_z^2}}(\mu_x \mu_z \cos \varphi + \mu_x \sin \varphi) + \mu_y \cos \theta \quad (20)$$

$$\mu'_z = -\sin \theta \cos \varphi \sqrt{1-\mu_z^2} + \mu_z \cos \theta \quad (21)$$

式中, φ 表示方位角,是在 $(0, 2\pi)$ 之间均匀分布的,其抽样值为 $\varphi = 2\pi\xi$. θ 代表散射角,由 H-G 函数可得散射角的抽样值为

$$\theta = \arccos \left\{ \frac{1}{2g} \left[1 + g^2 - \left(\frac{1-g^2}{1-g+2g\xi} \right)^2 \right] \right\} \quad (22)$$

光子发生每一次碰撞时都有可能从介质中透射出去,第 n 个光子发生第 i 次碰撞时透射出去的概率为^[11,14]

$$P_n^i = \begin{cases} \omega_i \exp(-\mu_e \frac{H-z_i}{\mu_{zi}}), & \mu_{zi} > 0 \\ 0, & \mu_{zi} \leq 0 \end{cases} \quad (23)$$

式中, H 为介质的厚度, ω_i 和 μ_{zi} 分别为光子在第 i 个碰撞点的权重和 z 轴的方向余弦,在两个相邻的碰撞点,光子权重的关系为

$$\omega_i = \omega_{i-1} \exp(-\mu_a L) \quad (24)$$

设光子的初始权重 ω_0 为 1.由式(23)可得第 n 个光子投射出去的概率为

$$p_n = \sum_{i=0}^{M-1} p_n^i \quad (25)$$

式中, M 表示第 n 个光子在传播过程中总共碰撞的次数.如果跟踪 K 个光子,则透过率的估计值为这 K 个光子透过概率的均值,即

$$\tau = \frac{1}{K} \sum_{n=1}^K p_n \quad (26)$$

经过多次散射后,激光光强可表示为

$$I = I_0 \tau \quad (27)$$

图 6 和图 7 反映了发生多次散射时激光信号的光强与能见度间的关系,其中,激光波长分别为 1.06 μm、1.55 μm 和 10.6 μm,沙尘粒子的折射系数为 1.55 - i0.005,激光的初始光强为 1 W.

图 6 是激光传播 1 000 m 时光强与能见度间的关系,由图可见:1)当激光信号的波长一定时,接收光强

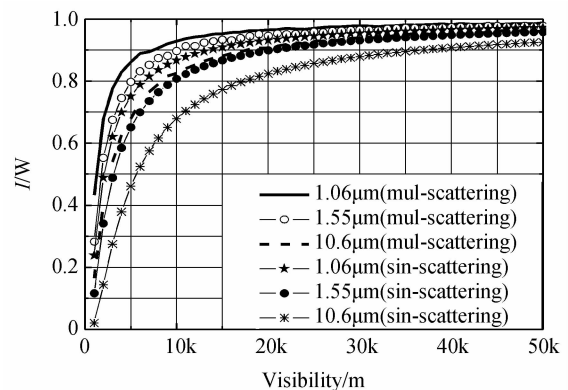
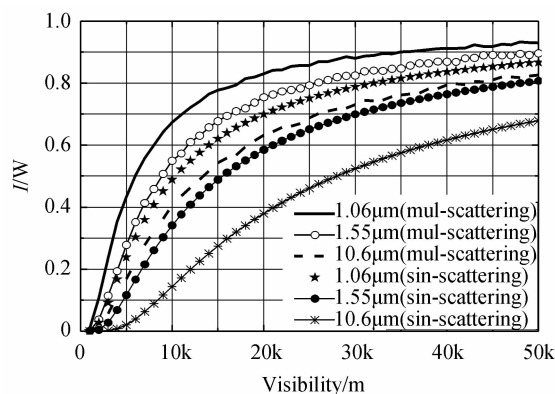


图 6 光强与能见度间的关系 ($l=1\ 000\ \text{m}$)

Fig. 6 The relationship of atmospheric visibility with laser intensity ($l=1\ 000\ \text{m}$)

图7 光强与能见度间的关系($l=5\ 000\ \text{m}$)Fig. 7 The relationship of atmospheric visibility with laser intensity($l=5\ 000\ \text{m}$)

随能见度的增大而增大,并趋于稳定值.当能见度较小时,光强的变化比较快,但是当能见度较大时,光强的变化较为平缓.2)当沙尘能见度相同时,信号光强随着激光波长的增加而逐渐减小.3)在波长一定且传输距离较近时,单次散射和多次散射所得的结果差别很小,而且随着大气能见度的增加,其差距会越来越小.例如,当能见度为20 km时,三种波长激光发生单次散射和多次散射时光强差分别为0.03 W,0.047 W和0.08 W.

图7是激光传播5 000 m时光强随能见度的变化关系.其变化趋势与图6非常类似,不同之处主要是图7中光强的变化没有图6显著,最后达到的稳定值也较小,但不同波长激光光强的变化量要比图6大.另外,在波长一定时,单次散射和多次散射之间的差别有所增大,如能见度为20 km时,激光发生多次散射时较单次散射时对应的光强差分别为0.13 W,0.17 W和0.25 W.造成这一现象的原因是由于激光远距离传输时多次散射作用增强,单次散射模型不能完全反映光强与能见度之间的关系.

图6和图7的仿真结果表明,当激光信号的波长固定时,接收光强随能见度的增加而增大,并趋于稳定值.当能见度相同时,激光波长越长,其对应的接收光强则越小.同时,激光近距离传输时受沙尘多次散射的影响较小,但是当传输距离较远时,多次散射的影响会逐渐增加.

3 结论

通过理论和仿真分析了消光、散射和吸收效率因子随沙尘半径的变化情况,同时研究了激光在沙尘天气条件下传播时发生单次散射和多次散射时激光光强与能见度间的关系.结果表明,当传输距离和激光波长一定时,光强随能见度的增加而增大,并最终趋于稳定值.而当传输距离和能见度一定时,光强随激光信号波长的增大而减小.同时,当传输距离较远时,多次散射

对信号强度的影响会逐渐增加,在实际应用中必须加以考虑.

参考文献

- [1] GRABNER M, KVICERA V. Multiple scattering in rain and fog on free-space optical links[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, **32**(3): 513-520.
- [2] CHEN Rong, DONG Yi-ming, WANG Fei, et al. Statistical properties of a cylindrical vector partially coherent beam in turbulent atmosphere[J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2013, **112**(2): 247-259.
- [3] IJAZ M, GHASSEMLOOY Z, PEREZ J, et al. Enhancing the atmospheric visibility and fog attenuation using a controlled FSO channel[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(13): 1262-1265.
- [4] DUAN Mei-ling, LI Jin-hong, WEI Ji-lin. Influence of different propagation paths on the propagation of laser in atmospheric turbulence[J]. *Optoelectronics Letters*, 2013, **9**(6): 477-480.
- [5] GAO Ming, NAN Wei-na, LÜ Hong, et al. Analysis on influence of the turbulent on polarization properties of elliptically polarized laser beams in propagation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(9): 1107-1112.
高明,南妮娜,吕宏,等.湍流对椭圆偏振激光传输中偏振特性的影响分析[J]. *光子学报*, 2013, **42**(9): 1107-1112.
- [6] ZHANG Shuo, PU Jin-yun, LI Dong-zhen, et al. Monte-carlo simulation for the infrared radiation attenuation by water fogs and the analysis for transmission field[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(5): 0512004.
张硕,浦金云,李东臻,等.细水雾遮蔽红外辐射的蒙特卡罗模拟及透射场分析[J]. *光子学报*, 2014, **43**(5): 0512004.
- [7] LI Ying-le, LI Jin, WANG Ming-jun, et al. Characteristics of complex scattering for a medium sphere in rainfall in GHz wave band[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(3): 368-372.
李应乐,李瑾,王明军,等.雨介质中球形目标的GHz复合散射特性[J]. *光子学报*, 2013, **42**(3): 368-372.
- [8] WANG Shi-gong, WANG Jin-yan, ZHOU Zi-jiang, et al. Regional characteristics of dust events in china[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, **58**(2): 193-200.
王式功,王金艳,周自江,等.中国沙尘天气的区域特征[J]. *地理学报*, 2003, **58**(2): 193-200.
- [9] HALEY E, REDMOND, KATHY D, et al. Light scattering and absorption by wind blown dust: Theory, measurement, and recent data[J]. *Aeolian Research*, 2010, **2**(1): 5-26.
- [10] SUN Xian-ming, WANG Hai-hua, LIU Wan-qiang, et al. Nonspherical model for sand dust storm and its application to the research of light multiple scattering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1506-1510.
孙贤明,王海华,刘万强,等.沙尘暴粒子的非球形模型及其对激光的多次散射特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1506-1510.
- [11] DONG Qun-feng, LI Ying-le, XU Jia-dong, et al. Effect of sand and dust storms on microwave propagation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, **61**(2): 910-916.
- [12] CHEN Hsing-yi, KU Chao-cheng. Calculation of wave attenuation in sand and dust storms by the FDTD and turning bands methods at 10-100 GHz[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, **60**(6): 2951-2960.
- [13] ALHUWAIMEL S, MISHRA A, INGGIS M. Review of radar signal attenuation due to sand and dust storms[C]. *Proceedings of the 2012 International Conference on*

- Electromagnetics in Advanced Applications, ICEAA '12, 2012:1096-1099.
- [14] YANG Rui-ke, MA Chun-lin, LI Liang-chao. Influence of multiple scattering on laser pulse propagation through sand and dust storm[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, **34**(10): 1393-1397.
杨瑞科, 马春林, 李良超. 沙尘暴多重散射对激光脉冲传输的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10):1393-1397.
- [15] DONG Qing-sheng. Physical characteristics of the sand and dust in different desert of china[J]. *Chinese Journal of RadioScience*, 1997, **12**(1): 15-25.
董庆生. 我国典型沙区中沙尘的物理特性[J]. *电波科学学报*, 1997, **12**(1):15-25.
- [16] DONG Qun-feng, LI Ying-le, XU Jia-dong, *et al.* Scattering of electromagnetic pulse wave by spherical sand and dust particles [C]. 2012 10th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, ISAPE 2012, 2012: 490-492.
- [17] CHEN Hsing-yi, KU Chao-cheng. Microwave and millimeter-wave attenuation in sand and dust storms [C]. *Microwave Radar and Wireless Communications*, 2012 19th International Conference on, 2012, **2**: 527-532.
- [18] CHICEA D, TURCU I. A random walk monte carlo approach to simulate multiple light scattering on biological suspensions[J]. *Romanian Reports in Physics*, 2005, **57**(3): 418-425.
- [19] WANG Hong-xia, ZHU You-zhang, TIAN Tao, *et al.* Characteristics of laser transmission in different types of aerosols[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(2): 024214.
王红霞, 竹有章, 田涛, 等. 激光在不同类型气溶胶中传输特性研究[J]. *物理学报*, 2013, **62**(2):024214.