

光波在沙尘介质中传输的分析

朱耀麟^{1,2}, 安然¹

1. 西安工程大学电子信息学院, 西安 710048
2. 西安理工大学自动化与信息工程学院, 西安 710048

摘要: 在实际沙尘暴传输过程观测中, 发现粒子杂质含量不断增加, 且光信号衰减量随高度增加而减小。针对这一情况, 应用 Mie 理论得到了含水量占 50% 且硫酸盐含量不断增加时, 单个沙尘粒子的吸收、散射和衰减效率因子随粒子尺度参数的变化, 沙尘群体的吸收和散射系数随波长变化以及沙尘群体的衰减系数与峰值半径之间的关系。仿真数值显示: 随着硫酸盐含量的增加, 单个沙尘粒子的吸收效率因子不断增加, 散射效率因子不断减小, 总的衰减效率因子变化不大; 沙尘粒子群体的光学特征与单个粒子的相同, 峰值半径变化时衰减系数的变化比较明显; 随高度的增加, 沙尘的衰减系数逐渐减小。

关键词: 光通信; Mie 散射; 沙尘尺寸分布; 衰减效率因子

中图分类号: TN929.1 文章编号: 0255-8297(2014)06-0577-05

Laser Transmit through Sand and Dust

ZHU Yao-lin^{1,2}, AN Ran¹

1. Electronic Information College, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China
2. The Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

Abstract: By observing laser transmission in sandstorm, it is found that attention decreases with increasing height and particle impurity. Consider the condition that moisture reaches 50% and the sulfate content is increased in sand/dust particles. Applying the Mie theory, the relationship between the particle scale and parameters including absorption, scattering and attenuation efficiency factors of single sand/dust particles is obtained. Also obtained are the changes in absorption and scattering coefficients of sand/dust group with different light wavelengths, and the relationship between the attenuation coefficient and the peak radius of the sand/dust group. The results show that, as water and sulfate content increase, the absorption efficiency factor increases, scattering efficiency factor decreases, and the total attenuation efficiency factor changes very little. Optical characteristic of the sand/dust group is the same with signal particles. With changing peak radius, the attenuation coefficient varies obviously. The attenuation coefficient decreases gradually when the height of sand/dust aerosol increases.

Keywords: optical communications, Mie theory, sand and dust spectrum, attenuation efficiency factor

无线激光通信因其自身优越性而受到广泛关注, 对其信道影响严重的介质如云、雾、沙尘等也是人们研究的重要方面。文献 [1-4] 研究了气溶胶的消光效应, 如消光系数与能见度之间的关系、气溶胶中各种粒子在消光效应中所占的比例, 以及根据消光系数计算出的粒子的大小和密度等, 这些研究将粒子作为整

体而没有分析其中各种吸附物或杂质的影响。本文在 Mie 理论的基础上, 根据学者对沙尘的研究, 对光信号在吸附其他物质的混合性沙尘中的吸收、散射、衰减系数进行了详细分析。文献 [5] 观察并研究了沙尘的尺度分布, 得出了沙尘随高度的变化特征和尺寸分布模型; 文献 [6] 通过历时一年的研究, 得到了塔克拉

收稿日期: 2013-06-26; 修订日期: 2013-12-19

基金项目: 陕西省科技厅国际合作项目基金(No.2013KW04-02); 西安市科技局技术转移促进工程基金(No.CXY1349(2))资助

作者简介: 朱耀麟, 博士后, 副教授, 研究方向: 通信信号处理、无线光通信、多天线传输系统, E-mail: fz_zyl@163.com

玛干沙漠腹地沙尘气溶胶质量浓度的垂直分布特征; 文献[7]通过WPS粒谱仪对内蒙古朱日和地区的沙尘气溶胶进行了观测, 得到了不同天气条件下沙尘的气溶胶谱分布。文献[8]对亚洲沙尘暴尤其是榆林、北京等地的沙尘暴中硫酸盐等的变化、形成及含量进行了详细的总结; 文献[9]对北京地区沙尘、灰霾、晴朗等天气进行了气溶胶中沙尘组分的试验, 得到了水、黑碳和硫酸铵等在沙尘颗粒中的含量。本文基于以上沙尘气溶胶粒子的分布和组分的实际测量数据, 推导了单个和群体沙尘粒子的吸收、散射、衰减效率因子, 最后得出了光信号的衰减系数随能见度的变化曲线。

1 沙尘气溶胶粒子光学特性的两个影响因素

沙尘暴发生时有很多物理因子不断变化^[10-11], 根据沙尘粒子的特殊性, 本文主要分析由于沙尘粒子的重力因素造成的谱分布的不同和在传输过程中吸收的杂质对其光学特性的影响。

1.1 沙尘气溶胶粒子的谱分布

对于沙尘气溶胶粒子的谱分布, 不同地区不同天气条件下的气溶胶谱分布是不同的, 本文采用文献[5]对中国西北部沙漠地区沙尘粒子的实际观测拟合的Gamma分布和幂函数分布。文献[5]利用飞机在空中观测并研究了我国西北部沙漠地区中沙尘气溶胶粒子谱分布和数浓度随高度的变化发现, 由于沙尘粒子的重力作用, 沙尘气溶胶粒子的谱分布随高度的分布存在两种模式, 且沙尘的峰值半径也各不相同。

本文沙尘气溶胶的数浓度谱分布用单峰分布特征来表示, 其Gamma分布和幂函数分布如下:

$$\begin{aligned} dN/dR &= N(k_1)R^\mu \exp(-\lambda R), \quad 0.1 \mu\text{m} < R < 1.2 \mu\text{m} \\ dN/dR &= N(k_2)R^{-\alpha}, \quad 1.2 \mu\text{m} < R < 12 \mu\text{m} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, N 为沙尘粒子总的数浓度, $N(k_1)$ 和 $N(k_2)$ 为沙尘数浓度的系数, $R^\mu \exp(-\lambda R)$ 和 $R^{-\alpha}$ 为控制沙尘粒子尺度分布形状的一种谱型函数, R 为粒子半径。例如: ①峰值半径为 $0.5 \mu\text{m}$ 时, $N(k_1) = 0.17771$, $\mu = 1.0$, $\lambda = 2.0$, $N(k_2) = 0.02786$, $\alpha = 2$ 。

1.2 沙尘气溶胶粒子吸收和覆盖的杂质含量

在沙尘暴传输过程中, 沙尘往往会附着空气中的其他物质而使太阳辐射特性发生改变。根据文献[5]的分析, 在沙尘气溶胶中亲沉积元素和亲硫元素的富集程度均较高, 其中挥发性元素 Se、Sb 和易溶组分 Cl 的富集成分最高。文献[12]通过对我国北方地区 9 个沙尘暴测试站沙尘含量的统计分析发现, SiO_2 的含量在 $56.2\% \sim 75.77\%$ 之间, Al_2O_3 的含量在 6.41%

$\sim 11.47\%$ 之间, 其他化学物质含量较低。

当沙尘暴发生时大气出现逆湿现象^[13-14], 在冷锋过境沙尘暴消失之后逆湿达到极大值。沙尘暴发生前后气溶胶粒子中水含量的变化很大, 发生前, 相对湿度仅为 16%, 此时的混合比为 4.0 g/kg ; 发生后, 相对湿度上升到 69%, 混合比达到 9.6 g/kg 。这次观测的沙尘暴相对湿度高达 90%, 水分在沙尘下落途中迅速蒸发。综合以上分析, 本文主要考虑硫酸盐和水含量的增加对沙尘粒子光学特征的影响。

在相关研究的基础上, 采用源解析方法建立折射指数的表达式^[15]

$$m = \sum_{j=1}^k n_j \sigma_j \quad (2)$$

式中, n_j 为 j 组分的折射指数, j 为颗粒物某组分, σ_j 为源解析中 j 组分的分担率, k 为组分数。

2 沙尘气溶胶的衰减特性

当微粒的尺度与波长比较接近时, 产生米耶散射。米耶散射适用于如雾、霾、沙尘等球形粒子的环境, 其衰减系数为

$$\alpha = \pi \int_{r_1}^{r_2} N(r) Q_e(x, m) r^2 dr \quad (3)$$

式中, $N(r)$ 为粒子尺寸分布函数, 表示单位体积中半径在 $[r, r+dr]$ 的粒子数单位为 cm^3 ; Q_e 为衰减效率因子, 表示入射于粒子几何截面中的能量受到衰减的比率。

介质对光的吸收和散射所造成的入射能量减少的函数即衰减效率因子 Q_e , 它是散射效率因子 Q_s 和吸收效率因子 Q_a 之和, 其表达式分别为

$$Q_e(x, m) = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}[a_n + b_n] \quad (4)$$

$$Q_s(x, m) = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (5)$$

$$Q_a(x, m) = Q_e(x, m) - Q_s(x, m) \quad (6)$$

沙尘能见度 V_b 与高度 h 的关系可表示为

$$V_b = V_0 \exp(1.25h) \quad (7)$$

式中, V_0 表示地面附近的水平能见度。

3 计算机仿真

3.1 单个沙尘粒子衰减系数的计算机仿真

当波长为 532 nm 时, 土壤风沙尘的折射指数为 $1.530 - 0.008i$, 硫酸盐的折射指数为 $1.520 - 0.00015i$,

水的折射指数为 $1.334-1.52\times10^{-9}i$ 。沙尘气溶胶的吸收效率因子与尺度参数的数值仿真如图1所示。

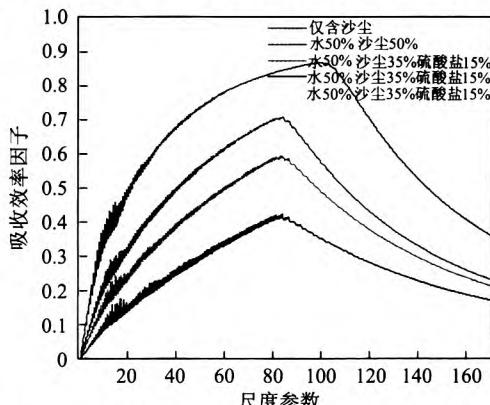


图1 单个沙尘粒子的吸收效率因子与含水量和硫化之间的关系

Figure 1 Curve between single dust particle absorption efficiency factor and water and sulfate content

由图1可以看出,沙尘溶胶的吸收效率因子随沙尘粒子中水分和硫酸盐的比例而发生变化。当尺度参数小于85时,吸收效率因子逐渐拉开距离,所含水和硫酸盐的比例越大,吸收效率因子越小;当尺度参数大于85时,吸收效率因子的大小差距逐步缩小。在尺度参数小于85的范围内,水和硫酸盐对光波长的吸收效果与沙尘相比影响较小,水和硫酸盐的比例越高,吸收效率因子减小的量愈大;当尺度参数大于85时,则相反。随着尺度参数的进一步增大,水和硫酸盐的影响将更小。

图2给出了单个沙尘粒子的散射效率因子与沙尘中含水量和含硫酸盐之间的关系。由图2可以看出,5条散射效率因子的大小并没有很大变化。当尺度参数

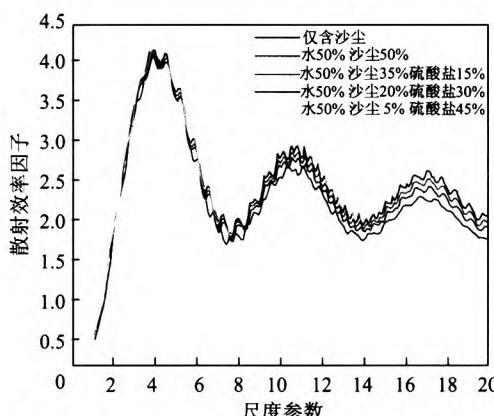


图2 单个粒子的散射效率因子与含水量和硫化之间的关系

Figure 2 Curve between single dust particle absorption efficiency factor and water and sulfate content

小于4时,水和硫酸盐的含量并没有对散射效率因子产生明显的影响;当尺度参数大于4时,水和硫酸盐的含量越大,散射效率因子越大。当尺度参数继续增加时,散射效率因子震荡逐步减小,含水量和含硫量的影响也将减小。

图3给出了单个气溶胶粒子的衰减效率因子与沙尘中含水量和被硫化的关系。由于衰减效率因子是吸收效率因子与散射效率因子的和,复合沙尘粒子影响是由沙尘、水和硫化物的吸收效率因子和散射效率因子的影响共同决定的。由图3可以看出,含水量和含硫量对衰减效率因子的影响很小,这是由于气溶胶粒子中水和硫酸盐对光的吸收较小,对光的散射较大,两者相加后的影响效果就较小了。

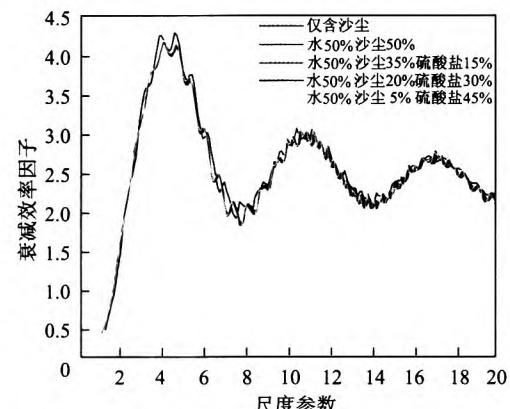


图3 单个沙尘粒子的衰减效率因子与含水量和硫化之间的关系

Figure 3 Curve between single dust particle attenuation efficiency factor and water and sulfate content

3.2 沙尘气溶胶的群体衰减系数的计算机仿真

直接影响大气中辐射传输的是具有一定尺度谱分布的沙尘气溶胶的群体光学特性。当沙尘粒子吸收水汽为50%、表面覆盖15%和45%硫酸盐时,吸收系数和散射系数与波长关系的仿真数据见图4。

从图4中的(a)可以看出:不考虑尺度变化时,在波长为0~0.2范围内,吸收系数随波长的增加而不断减小,硫酸盐的含量对它的影响很小;在0.1~4.0范围内,吸收系数的震荡位相随着硫酸盐的增大而滞后,在0.1~1.5波长范围内,吸收系数随硫酸盐含量的增加而减小。结合图4中的(b)可以看出,从整体来讲,硫酸盐的含量对吸收和散射系数的影响很小。

在数浓度和折射指数相同的情况下,在波长为0~4 μm范围内,衰减系数随波长的增加出现上下震荡现象,但整体趋势不断增加,衰减系数随着粒子峰值半径向粗粒子方向的偏移而减小,这与Mie理论中

大粒子的前向散射光强大相符。

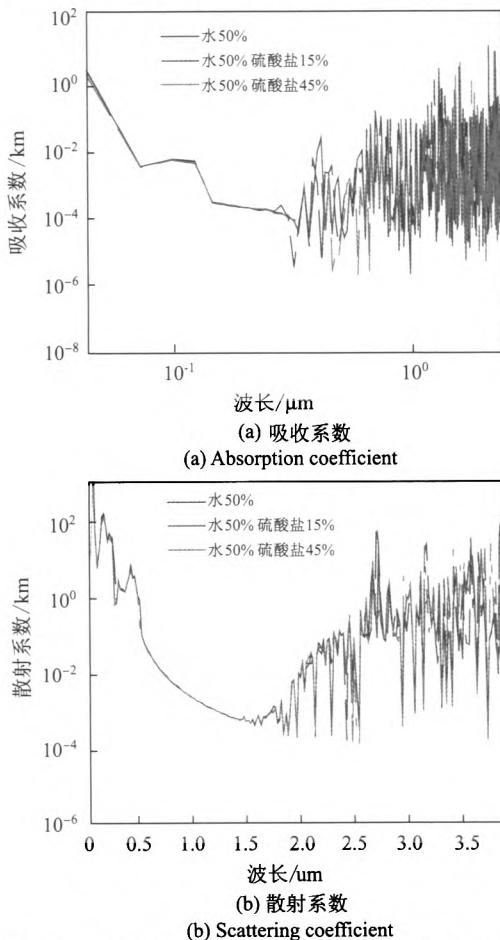


图4 吸收系数、散射系数与水和硫化的关系(数浓度为 80 cm^{-3} , 谱分布①)

Figure 4 Curve with water and sulfate content (number concentration is 80 cm^{-3} , use spectral distribution ①)

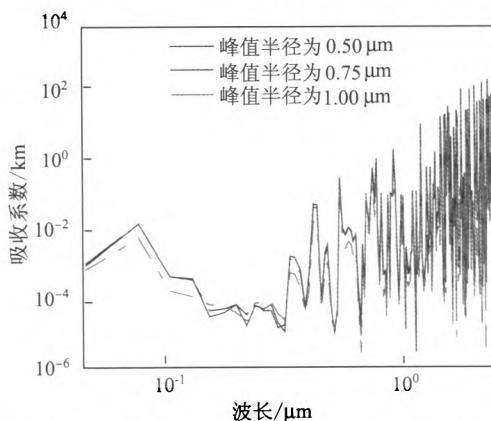


图5 散射系数与峰值半径之间的关系图(数浓度为 80 cm^{-3})

Figure 5 Curve between scattering coefficient and the peak radius (number concentration is 80 cm^{-3})

3.3 光波在沙尘介质中的传输衰减仿真

由于沙尘能见度较大且易于测量, 根据衰减系数与能见度的关系公式和式(7), 可得出沙尘气溶胶随能见度的衰减趋势, 见图6。

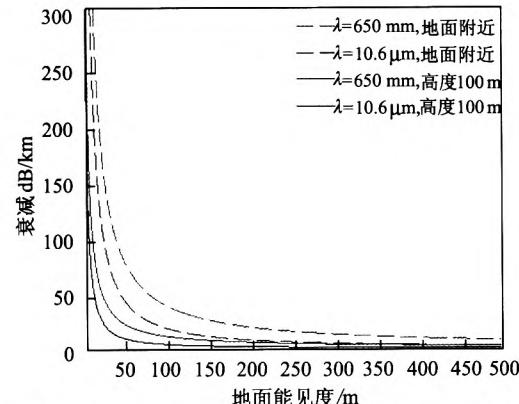


图6 不同波长、不同高度下激光信号的衰减随沙尘能见度的变化曲线

Figure 6 Curve between laser signal attenuation and dust visibility in different heights and different wavelength

由图6可以看出, 随地面能见度的增加, 沙尘气溶胶对光信号的衰减增大; 波长为 10.6 μm 时的衰减系数明显小于光波长为 0.650 μm 时的衰减系数, 可推知在一定范围内随波长的增加衰减系数减小。随着离地面高度的增加, 由于沙尘气溶胶的重力作用沙尘气溶胶的浓度减小, 沙尘气溶胶的能见度增加, 对光信号的衰减作用减弱。

4 结语

根据Mie理论可知: 当沙尘粒子中水和硫酸盐含量增加时, 单个沙尘粒子和群体沙尘气溶胶的吸收效率减小, 散射效率因子增大, 总的衰减效率因子变化很小。当气溶胶的峰值半径增大时, 衰减系数减小。综合分析, 粒子中杂质含量对光信号的影响很小, 沙尘气溶胶中影响光信号衰减的主要因素是沙尘粒子的尺度分布。

参考文献:

- [1] ROBER N. Empirical relationships between extinction coefficient and visibility in fog [J]. Applied Optics, 2005, 44(18): 3795-3803.
- [2] SABETGHADAM S, AHMADI-GIVI F. Relationship of extinction coefficient, air pollution, and meteorological parameters in an urban area during 2007 to 2009 [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21(1): 538-547.
- [3] SHIMIZU A, SUGIMOTO N, MATSUI I, MORI I, NISHIKAWA M, KIDO M. Relationship between

- lidar-derived dust extinction coefficients and mass concentrations in Japan [J]. SOLA, 2011, 7A(Special Ed), 1-4.
- [4] DAP S, LACROIX D, HUGON R, BOUGDIRA J. Retrieving particle size and density from extinction measurement in dusty plasma, Monte Carlo inversion and ray-tracing comparison [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2013, 128: 18-26.
- [5] 牛生杰, 孙照渤. 春末中国西北沙漠地区沙尘气溶胶物理特性的飞机观测 [J]. 高原气象, 2005, 24(4): 604-610.
NIU Shengjie, SUN Zhaobo. Aircraft measurements of sand aerosol over northwest China desert areas in late spring [J]. Plateau Meteorology, 2005, 24(4): 604-610. (in Chinese)
- [6] 刘新春, 钟玉婷, 何清, 杨兴华, 艾力-买买提明. 塔克拉玛干沙漠腹地沙尘气溶胶质量浓度垂直分布特征 [J]. 中国沙漠, 2012, 32(4): 1045-1052.
LIU Xinchun, ZHONG Yuting, HE Qing, YANG Xinghua, AILI-Maimaitiming. Vertical distribution of dust aerosol mass concentration in hinterland of the Taklimakan desert [J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(4): 1045-1052. (in Chinese)
- [7] 邱玉珺, 牛生杰, 岳平, 王巍巍, 王静. 半干旱区春季沙尘气溶胶谱分布的观测研究 [J]. 中国环境科学, 2009, 29(10): 1021-1028.
QIU Yujun, NIU Shengjie, YUE Ping, WANG Weiwei, WANG Jing. Size distribution of dust aerosol particles in semi-arid region in spring [J]. China Environmental Science, 2009, 29(10): 1021-1028. (in Chinese)
- [8] 王琼真. 亚洲沙尘长途传输中与典型大气污染物的混合和相互作用及其对城市空气质量的影响 [D]. 上海: 复旦大学, 2012.
- [9] 王玲, 李正强, 李东辉, 李凯涛, 田庆久, 李莉, 张莹, 吕阳, 顾行发. 基于遥感观测的折射指数光谱特性反演大气气溶胶中沙尘组分含量 [J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(6): 1644-1649.
- WANG Ling, LI Zhengqiang, LI Donghui, LI Kaitao, TIAN Qingjiu, LI Li, ZHANG Ying, LU Yang, GU Xingfa. Retrieval of dust fraction of atmospheric aerosols based on spectra characteristics of refractive indices obtained from remote sensing measurements [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(6): 1644-1649. (in Chinese)
- [10] GUAN Qingyu, GUI Hongjie, PAN Baotian, WANG Li-juan, LIU Zibian. The processes and mechanisms of severe sandstorm development in the eastern Hexi Corridor China, during the last Glacial period [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 62(30): 769-775.
- [11] KIM H S, CHUNG Y S. On the sandstorms and associated airborne dustfall episodes observed at Cheongwon in Korea in 2005 [J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2010, 3(2): 83-94.
- [12] LIU wei, FENG qi, WANG tao, ZHANG Yanwu, SHI Jianhua. Physicochemistry and mineralogy of storm dust and dust sediment in northern China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2004, 21(5): 775-783.
- [13] 牛生杰. 沙尘气溶胶微结构及其对降水影响的观测和数值模拟研究 [D]. 南京: 南京气象学院, 2004.
- [14] 王娟. 塔克拉玛干沙漠塔中地气水热特征分析 [D]. 新疆: 新疆大学, 2011.
- [15] 董海燕, 韩旸, 蔡斌彬, 古金霞, 白志鹏. 天津市气溶胶折射指数及消光特征 [J]. 环境污染与防治, 2009, 31(4): 28-32.
DONG Haiyan, HAN Yang, CAI Binbin, GU Jinxia, BAI Zhipeng. Optical characterization and refractive index of ambient aerosol in Tianjin [J]. Environmental Pollution & Control, 2009, 31(4): 28-32. (in Chinese)

(编辑: 王 雪)