

太赫兹波在沙尘中衰减特性

许文忠^{1,2}, 钟凯^{1,2}, 梅嘉林^{1,2}, 徐德刚^{1,2}, 王与焜^{1,2}, 姚建铨^{1,2}

- (1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院 激光与光电子研究所, 天津 300072;
2. 天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 为了研究太赫兹波在沙尘大气中的衰减特性, 根据 Mie 散射理论计算了单次散射情况下沙尘粒子不同尺寸参数下的散射效率因子和不同散射角下的散射相函数值。并得到了具有一定尺寸分布的沙尘粒子的单位距离衰减和能见度的关系曲线。还利用 Monte Carlo 方法对太赫兹波在沙尘中的多次散射特性进行了模拟计算, 分析了不同能见度和不同沙尘类型对太赫兹波传输过程中能量损耗的影响。结果表明: 单次散射条件下沙尘粒子的散射主要受尺寸参数影响; 沙尘能见度较低时必须考虑多次散射的影响。研究结果对太赫兹技术在大气环境监测和烟尘和风沙的探测等方面的应用具有参考价值。

关键词: 太赫兹; 沙尘; Mie 散射理论; Monte Carlo 方法

中图分类号: O436.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0523-05

THz wave attenuation characteristics in sand and dust

Xu Wenzhong^{1,2}, Zhong Kai^{1,2}, Mei Jialin^{1,2}, Xu Degang^{1,2}, Wang Yuyue^{1,2}, Yao Jianquan^{1,2}

- (1. Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision and Opto-electronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of Opto-Electronic Information and Technical Science, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: For the purpose of studying the attenuation characteristics of terahertz wave in dust atmosphere, using the Mie scattering theory, the influence of the dimension parameters of particles on the scattering efficiency factor was simulated, and the value of scattering phase function under different scattering angles, in the condition of single scattering were calculated. Besides, the relationship between the attenuation of terahertz wave per unit distance in dust particles with certain size distribution and the visibility was simulated. In addition, the multiple scattering of terahertz wave in sand-dust condition was simulated, using Monte Carlo method. And the energy losses of terahertz wave in different visibilities and different dust types were discussed. The results show that the attenuation of terahertz wave is mainly determined by the dimension parameter, in the condition of single attenuation; and the multiple scattering must be taken into account when visibility is low. The results provide a reference point for the application of terahertz wave in those areas such as environmental monitoring, soot and wind-blown sand detection.

Key words: terahertz; sand-dust; Mie scattering theory; Monte Carlo method

收稿日期: 2014-06-05; 修订日期: 2014-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(61101058); 高等学校博士学科点专项科研基金(20110032120055);

天津市应用基础与前沿技术研究计划(13JCQNJC01500); 中国工程物理研究院太赫兹重点实验室基金(CAEP THZ201213)

作者简介: 许文忠(1990-), 男, 硕士生, 主要从事太赫兹技术方面的研究。Email: xu_wenzhong@sina.cn

导师简介: 钟凯(1984-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事激光与太赫兹技术的研究。Email: zhongkai@tju.edu.cn(通信联系人)

0 引言

太赫兹波指的是频率范围在 0.1~10 THz 之间的电磁波,太赫兹波处于微波波段和红外波段之间,由于其在电磁波谱中的特殊位置,使得它有很多独特的性质和优点。与光学波段相比,太赫兹波在传播过程中由微粒造成的散射损失更少,可以在沙尘或浓烟环境下进行通信;与微波波长相比,太赫兹波段有更大的带宽,因而传输效率更高。这些特性使得太赫兹波在雷达、通信、大气与环境监测等领域具有良好的应用前景^[1]。

由于水蒸气对太赫兹波有强烈的吸收,因此太赫兹波在大气空间中传输时,吸收是造成信号衰减的主要原因,国内外多家研究机构对此进行了深入的研究,并取得了较多的研究成果^[2]。除吸收以外,大气中的颗粒物对太赫兹波的散射也是太赫兹波衰减的重要原因。太赫兹波的波长范围在 30 μm ~3 mm 之间,这与主要大气粉尘粒子和沙尘粒子的尺寸接近,因此考虑太赫兹波在大气中的传输时就必须考虑沙尘粒子的散射造成的影响。

目前国内对电磁波在沙尘条件下传输特性的研究主要集中在红外波段和微波波段:董群锋等运用 Mie 散射理论分析了具有一定尺寸分布的沙尘粒子的红外衰减特性;周旺等结合沙尘复介电常数公式给出了沙尘衰减的计算模型;并利用此模型分析了沙尘粒子在微波波段的衰减特性;罗逸等也运用 Mie 散射理论数值分析了微米镍粉在太赫兹波段的散射特性。但有关太赫兹波在沙尘条件下传输特性的研究及报道还非常少。文中分别从 Mie 散射理论和 Monte Carlo 方法出发,研究了太赫兹波在沙尘条件下的单次散射特性和多次散射特性,相关结果对太赫兹技术在大气空间中的应用系统设计具有重要意义。

1 太赫兹波在沙尘大气中的单次散射

空气中悬浮的沙尘粒子会对太赫兹波造成散射,当沙尘粒子占空间体积小于 0.1% 时,可认为每个粒子都是独立于其他粒子来散射的,浮尘、扬沙和能见度较高的沙尘天气都属于这种情况。此时,可以根据 Mie 散射理论^[3]来分析太赫兹波在沙尘大气中的单次散射。由 Mie 散射理论可知:沙尘粒子对太赫

兹波的散射可以用散射效率因子 Q_{sca} 来表示。

$$Q_{\text{sca}}(r) = \frac{2}{\alpha^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (1)$$

式中: α 为微粒的尺寸参数($\alpha=2\pi r/\lambda$, r 为微粒半径; λ 为入射光波长); a_n, b_n 称为 Mie 系数,是关于尺寸参数和复折射率的函数。

1.1 粒子尺寸对沙尘粒子散射的影响

我国的典型沙尘粒子尺寸为 0.01~0.1 mm。取入射波长 0.1~10 THz,干沙的复折射率不随频率的变化而变化,文中取 $m=1.53-0.008i$ ^[4],讨论粒子半径分别为 0.01 mm, 0.05 mm, 0.1 mm 的沙尘粒子对太赫兹波的散射,根据方程式(1),可以计算出在这种情况下散射效率因子变化如图 1 所示。

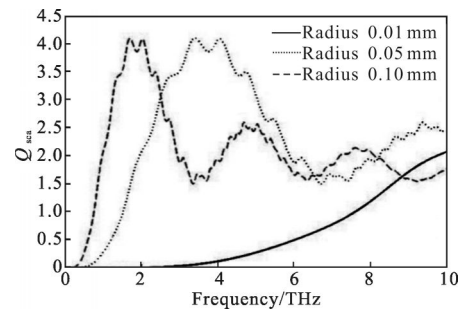


图 1 不同半径粒子的散射效率因子随入射频率的变化

Fig.1 Scattering efficiency factor under different radius

从图 1 中可以看出,不同半径粒子的散射效率因子随入射频率的变化趋势都是散射效率因子随着频率的增大先出现一个大的峰值后逐渐振荡降低。经计算表明:不同半径的粒子出现峰值的位置都在同一尺寸参数处。根据 $\alpha=2\pi r/\lambda$ 可知,粒子半径越大,在峰值处所对应的频率就越低,在图中表现为随着粒子半径的增加,散射效率因子的峰值向低频方向移动。

1.2 散射光强分布

光在某个给定方向单位立体角中散射光能量与在所有方向上平均的单位立体角中散射光能量的比值称为散射相位函数 $P(\theta, \lambda)$ 。单分散系的散射相位函数为:

$$P(\theta, \lambda) = \frac{2(|S_1|^2 + |S_2|^2)}{Q_{\text{sca}} \alpha^2} \quad (2)$$

式中: S_1 和 S_2 分别为平行和垂直于散射面的振幅函数。由 Mie 散射理论给出:

$$S_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n + b_n \pi_n) \quad (3)$$

$$S_2 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n + b_n \tau_n) \quad (4)$$

式中: τ_n 和 π_n 为关于散射角度的函数,由公式(2)可知,除散射角度外,散射相位函数的值只与粒子折射率和尺寸参数有关。选取折射率为 1.53-0.008i,尺寸参数分别为 10.466(粒子半径 0.1 mm,入射频率 5 THz)和 5.223(粒子半径 0.05 mm,入射频率 5 Hz)的沙尘粒子,根据方程式(2)~(4)得到不同散射角度下散射相位函数值的结果如图 2 所示。

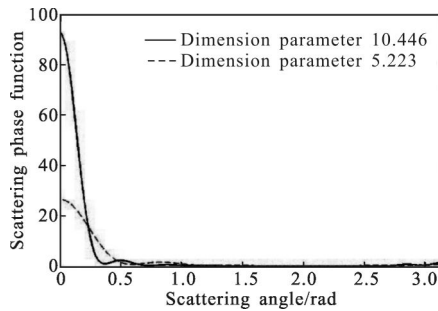


图 2 两种尺寸参数下的散射相位函数

Fig.2 Scattering phase function under two different dimension parameters

从图 2 中可以看出,散射主要集中在前向,在其他角度分布着一些峰值,并且尺寸参数越大,散射光能量越向前向集中。为了更细致地体现除前向散射光之外的其他峰值,截取 0.5~ π 角度范围内的散射相位函数如图 3 所示。

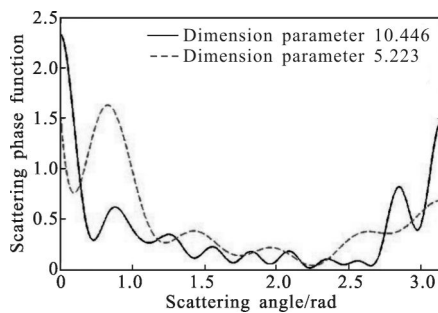


图 3 0.5~ π 方向的散射相位函数

Fig.3 Scattering phase function in scattering angle of 0.5- π

1.3 考虑粒子尺寸分布的太赫兹波散射

现实中沙尘粒子的尺寸不可能是大小一定的,一般分布在几十到几百微米的一个较广的范围内。国内外学者进行的一系列相关研究表明能够很好地描述沙尘粒子尺寸分布^[5]的数学模型是对数正态分布函数,即:

$$p(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma D} \exp \left[-\frac{(\ln D - m)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (5)$$

式中: m 和 σ 分别为 $\ln(D)$ 的均值和标准偏差,表 1 给出了沙尘粒子尺寸分布统计参数^[6]。

表 1 沙尘粒子尺寸分布统计参数

Tab.1 Statistical parameter of particle size distribution

Region	Dust type	Mean value m	Standard deviation σ	$N_0(1/m^3)$
Tengger desert	Explosion dust	-8.489	0.663	6.272×10^6
Yellow river desert	Natural sand and dust	-9.718	0.405	1.630×10^5

通常借由能见度 V_b 来描述具有一定尺寸分布的沙尘粒子在单位距离上所引起的信号衰减:

$$A = \frac{15 \int_0^{DM} \sigma_{ext}(D) p(D) dD}{2\pi V_b \int_0^{DM} D^2 p(D) dD} \quad (6)$$

式中: DM 为最大沙尘粒子直径,文中取 0.2 mm; σ_{ext} 为消光截面,可由 Mie 散射理论求出。

以波长为 100 μm (3 THz)的太赫兹波和波长为 12 μm 的红外光波为例,在相同的腾格里沙漠沙尘环境中,得到的单位距离衰减与能见度的关系如图 4

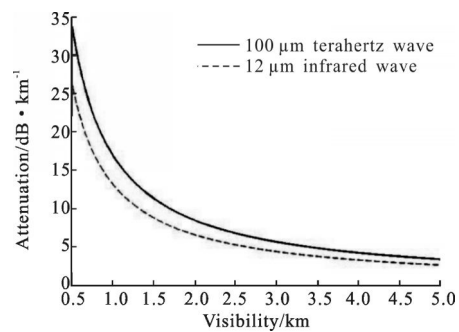


图 4 不同入射波沙尘衰减与能见度的关系

Fig.4 Relationship between attenuation and visibility under different frequencies

所示。可以看出由于腾格里沙漠的沙尘粒子平均尺寸更接近于太赫兹波波长,造成的散射更强一些,所以其对太赫兹波的衰减要大于对红外光波的衰减。另外,计算 100 μm 的太赫兹波分别在腾格里沙漠和黄河沙漠中传输的衰减特性如图 5 所示。可以看出,由于腾格里沙漠的粒子含量和大尺寸粒子所占的比

例都明显大于黄河沙漠, 所以其衰减也高一些。由于没有考虑多次散射的影响, 图 4 和图 5 中在低能见度下的衰减并不能反应真实的情况, 但以上模拟结果的高能见度部分是可信的。

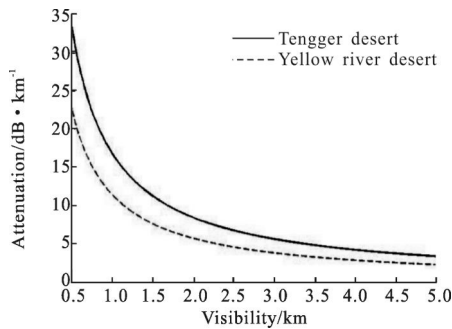


图 5 不同沙漠沙尘衰减与能见度的关系

Fig.5 Relationship between attenuation and visibility in different deserts

2 太赫兹波在沙尘大气中的多次散射

当沙尘粒子占空间体积大于 0.1% 时若不考虑多次散射的影响将对结果造成较大误差。可以通过 Monte Carlo 方法^[7]来研究光子被介质中随机分布粒子的多次散射和吸收的过程。Monte Carlo 方法的基本思想是把辐射能量看成由大量独立的光子组成, 将传输方程转变成一个概率模型, 把复杂的辐射传输问题分解成反射、吸收和散射等几个独立过程。每一个光子在系统内部的传递过程, 由一系列随机数确定, 跟踪一定量的光子后, 记录光子被反射、透射、散射和吸收的历史, 就可得到较为稳定的统计结果。通过 Monte Carlo 方法模拟多次散射的具体过程是: 首先确定发射光子的初始态并对光子移动的步长进行抽样, 这样就得到了光子发生第一次散射的位置; 然后对 H-G 相函数进行抽样可以得到新的散射方向, 并且要注意发生散射之后由于光子的部分能量被吸收而要进行光子权重更新; 最后需要判断光子能否进入探测器或达成其他终止条件, 若没有达成终止条件则抽样新的散射方向继续上述过程。

基于 Monte Carlo 方法编写程序, 选取沙尘粒子折射率 1.53, 非对称因子 0.72, 入射太赫兹波频率 3 THz, 光子样本数目 10^6 个, 分别模拟计算了太赫兹波在能见度分别为 0.5 km 和 5 km 的沙漠中的能量衰减与传输距离的关系, 如图 6 和图 7 所示。

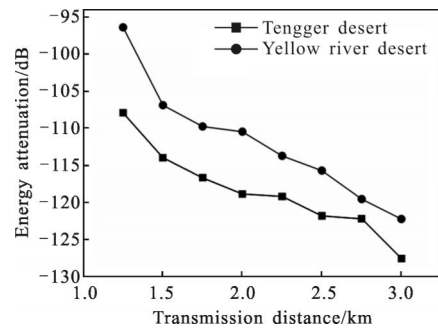


图 6 高能见度下能量损耗与传输距离的关系

Fig.6 Relationship between energy attenuation and transmission distance in high visibility

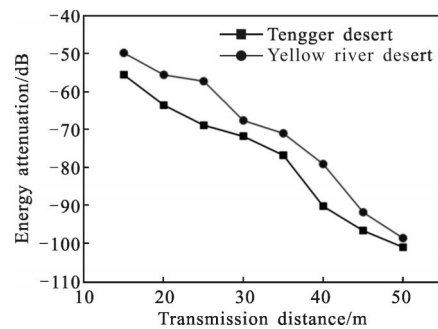


图 7 低能见度下能量损耗与传输距离的关系

Fig.7 Relationship between energy attenuation and transmission distance in low visibility

从图 6 和图 7 中可以看出, 随着传输距离的增加能量衰减迅速升高, 并且在相同条件下腾格里沙漠的能量衰减要大于黄河沙漠, 这是由于腾格里沙漠沙尘的散射和吸收系数均大于黄河沙漠。对比两幅图还可以发现, 低能见度下的能量衰减和衰减随传输距离的变化速率均远大于高能见度的情况, 低能见度下只用了 50 m 的传输距离就达到了高能见度下 1 km 处的衰减, 这是由于低能见度下沙尘粒子的密度很大, 光子更容易与粒子发生碰撞造成衰减。对比考虑多次散射的图 7 和没有考虑多次散射的图 5 发现两者在同一能见度处 (0.5 km) 的单位距离衰减之间误差很大, 这就说明了在沙尘粒子浓度高时必须考虑多次散射的影响。

3 结论

太赫兹波在沙尘中传播时会受到沙尘粒子的吸收和散射作用, 从而造成太赫兹波能量的衰减, 这与传输距离、沙尘粒子复折射率、太赫兹波频率、能见度等参数有关。文中对太赫兹波在沙尘环境中的散

射衰减情况进行了理论研究,针对不同的沙尘粒子浓度采取了相应的分析方法。研究表明:在沙尘粒子体积分数小于0.1%的情况下发生的单次散射主要受粒子尺寸参数影响,并且散射能量集中在前向;在沙尘粒子体积分数大于0.1%的情况下就要考虑多次散射的影响,此时低能见度下的能量衰减和衰减随传输距离的变化速率均远大于高能见度的情况。上述研究结果对大气环境监测、烟尘和风沙的探测^[8],以及战场烟尘环境中的太赫兹通信具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] Wang Shaohong, Xu Jingzhou Wang Li, et al. Applications and prospects of Terahertz technology [J]. *Physics*, 2001, 30(10):612-615. (in Chinese)
王少宏,许景周,汪力,等.太赫兹技术的应用及展望[J].物理,2001,30(10):612-615.
- [2] Wanke M C, Mangan M A, Foltynowicz R J. Atmospheric propagation of Terahertz radiation [R]. Sandia National Laboratories, 2005.
- [3] Wiscombe W J. Improved Mie scattering algorithms [J]. *Applied Optics*, 1980, 19(9): 1505-1509.
- [4] Jiménez A, Gonzalez Jorge H, Rabello-Soares M C. Diurnal atmospheric extinction over Teide Observatory (Tenerife, Canary Islands)[J]. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 1998, 129: 413-423.
- [5] Ahmed A S. Role of particle-size distributions on millimetre-wave propagation in sand/dust storms [J]. *Microwaves, Antennas and Propagation*, 1987, 134(1): 55-59.
- [6] Dong Qingsheng. The physical properties of the dust in the representative desert zone [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 1997, 12(1): 15-25. (in Chinese)
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.
- [7] Prah S A, Keijzer M, Jacques S L, et al. A Monte Carlo model of light propagation in tissue [J]. *Dosimetry of laser Radiation in Medicine and Biology*, 1989, 5: 102-11.
- [8] Lu Yimin, Wang Jiachun, Shi Jiaming, et al. Application of THz technology for detection in soot and wind blown-sand [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(3): 026. (in Chinese)
陆益敏,汪家春,时家明,等.太赫兹技术在烟尘与风沙探测中的应用[J].红外与激光工程,2010,39(3):487-490.