

文章编号: 2095-4980(2018)04-0599-04

沙尘暴对太赫兹波传播的影响

董群锋^{1,2}, 郭立新², 李应乐³, 王明军¹

(1.咸阳师范学院 物理与电子工程学院, 陕西 咸阳 712000; 2.西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;
3.陕西学前师范学院 科技处, 陕西 西安 710100)

摘要: 为研究太赫兹波在沙尘暴中的传播特性, 应用Mie散射理论研究了太赫兹波段沙尘粒子的散射特性, 得到沙尘粒子的散射效率因子、消光效率因子和吸收效率因子随粒径、太赫兹波长的变化关系。基于沙尘粒子尺寸的对数正态分布, 数值计算了沙尘暴的太赫兹衰减。研究结果表明, 沙尘的衰减随能见度的增大而减小, 波长越小, 沙尘暴引起的太赫兹波衰减越大; 波长为40 μm 时, 沙尘暴对太赫兹波传播影响最大, 浮尘对太赫兹波传播影响最小。低能见度沙尘暴对太赫兹波传播影响明显。

关键词: 太赫兹波; 沙尘; 散射; 衰减

中图分类号: TN011⁺.3

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201804.0599

Effect of sand and dust storms on Terahertz electromagnetic wave propagation characteristics

DONG Qunfeng^{1,2}, GUO Lixin², LI Yingle³, WANG Mingjun¹

(1.Department of Physics and Electronic Engineering, Xianyang Normal University, Xianyang Shaanxi 712000, China;
2.School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China;
3.Science and Technology Department, Shaanxi Xueqian Normal University, Xi'an Shaanxi 710100, China)

Abstract: To research the propagation characteristics of terahertz wave in sand and dust storms, based on Mie theory, the scattering characteristics of sand/dust particles are investigated for terahertz wave band, and the relationships of scattering efficiency factor, extinction efficiency factor and absorption efficiency factor with particle size and terahertz wavelength are obtained. The attenuation characteristic of terahertz electromagnetic wave propagation in sand and dust storms are calculated for sand and dust particles with log-normal size distribution. The research results show that the wave attenuation decreases with the increase of visibility of sandstorms and terahertz wavelength. From the numerical results of different sand weather at a wavelength of 40 μm , it is shown that sand-dust storm yields the highest effect for terahertz electromagnetic wave propagation, while the natural sand gives the lowest effect. The effect of low visibility sand and dust storms on terahertz wave propagation is obvious.

Keywords: terahertz wave; sand and dust; scattering; attenuation

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, 该频段被称为“THz Gap(太赫兹空隙)”^[1]。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。太赫兹波在基础研究领域, 如物理学、化学、天文学、分子光谱学、生命科学和医药科学等方面的重要性逐渐显现。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探测、宽带通信、大气与环境监测等领域具有良好的应用前景^[2]。

在太赫兹频段的无线通信链路上, 太赫兹频段电磁波波长较短, 需要考虑的因素较多, 如大气吸收、建筑物表面的粗糙反射、恶劣气象环境(降雨、沙尘暴、浓雾等)对信号的散射吸收^[3-5]。由于水蒸气对太赫兹波有强

收稿日期: 2018-03-08; 修回日期: 2018-05-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61102018); 中国博士后基金资助项目(2014M562371); 陕西省自然科学基金基础研究资助项目(2014JM8312); 咸阳师范学院青蓝计划人才培养资助项目(XSYQL201609)

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^[6]。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。

从 20 世纪 80 年代起,国内学者开展了沙尘媒质的电波传播研究,主要侧重于沙尘暴中微波/毫米波、陆地通信线路和卫星通信线路(地空路径)的衰减及交叉去极化效应研究,并给出了相应的预报模型^[7-12]。然而,有关太赫兹波在沙尘暴中的传输特性研究及报道还非常少。李宇晔等对太赫兹波在沙尘中的透射特性进行了实验室模拟^[13];许文忠等研究了太赫兹波在干燥沙尘介质的传输特性^[14]。本文基于沙尘粒子的物理特性,应用 Mie 理论研究沙尘粒子的太赫兹散射,沙尘暴对太赫兹波的传播影响。

1 沙尘暴中粒子的尺寸分布

有关沙尘暴中粒子的粒径分布,国内外学者做了不少研究。实际上,离散在空气中的沙尘粒子受到多种因素的制约,包括地面环境、风速以及高度等。一般情况下沙尘粒子的粒径在 0.01~0.1 mm 之间^[14]。本文主要考虑对数正态分布^[9-10,15]:

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

式中: D 为粒子直径^[15]; m 和 σ 分别为 $\ln D$ 的均值和标准偏差。对于中国腾格里沙漠和黄河沙滩, $\ln D$ 的均值 m 和标准偏差 σ 参数值见文献[8,10]。

2 沙尘粒子的散射特性

Mie 散射理论是适用于球形粒子散射的经典理论^[7-8],空气中的沙尘粒子可以近似球形粒子,采用等容球方法处理,仍可借用 Mie 理论进行计算^[15]。假设入射光波长为 λ , 单个粒子的消光截面表示为:

$$\sigma_{\text{ext}}(D) = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (2)$$

式中: k 为波数; a_n 和 b_n 为 Mie 理论系数。消光效率因子 $Q_{\text{ext}}(D)$ 和散射效率因子 $Q_{\text{sca}}(D)$ ^[15] 可表示为:

$$Q_{\text{ext}}(D) = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \{\text{Re}(a_n + b_n)\} \quad (3)$$

$$Q_{\text{sca}}(D) = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (4)$$

式中 $x = \frac{\pi D}{\lambda}$ 。吸收效率因子 $Q_{\text{abs}}(D)$ 表示为:

$$Q_{\text{abs}}(D) = Q_{\text{ext}} - Q_{\text{sca}} \quad (5)$$

3 沙尘媒质中太赫兹波衰减

对于有一定尺度分布的大气粒子,在单位距离上所引起的信号衰减,即特征衰减 $A(\text{dB/km})$ 为^[9,15]:

$$A = 4.343 \times 10^3 \int_0^{\infty} \sigma_{\text{ext}}(D) N_0 p(D) dD \quad (6)$$

式中: $p(D)$ 为粒子尺度分布概率密度函数; N_0 为粒子数密度, N_0 是一个很难测定的物理量,一般在研究电磁波在沙尘暴中传播时,通常借助于能见度 V_b 来描述沙尘的浓度,可得到单位体积中沙尘粒子个数,其表达式为^[9,15]:

$$N_0 = \frac{15}{8.868 \times 10^3 \pi V_b \int_0^{\infty} D^2 p(D) dD} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6),可得电磁波在沙尘中的衰减为:

$$A = \frac{15 \int_0^{\infty} \sigma_{\text{ext}}(D) p(D) dD}{2\pi V_b \int_0^{\infty} D^2 p(D) dD} \quad (8)$$

4 数值计算与结果分析

计算得出太赫兹波长为 $30\ \mu\text{m}$, $35\ \mu\text{m}$ 和 $40\ \mu\text{m}$ 时, 沙尘粒子对应的折射率^[16]分别为 $1.8-j0.42$, $1.9-j0.52$ 和 $2.1-j0.62$ 。利用式(3)~式(5), 计算太赫兹波段沙尘粒子的散射特性。图 1 为太赫兹波长为 $30\ \mu\text{m}$ 沙尘粒子的消光、散射和吸收效率因子与粒径的变化关系; 图 2 为不同太赫兹波长情况下的沙尘粒子消光因子随粒径的变化关系。

由图 1 可以看出, 散射、消光和吸收系数效率因子随着粒径的不断增大先达到一个峰值, 而后开始逐渐变小; 在粒径增大的过程中, 粒径小于 $15\ \mu\text{m}$ 时, 散射因子小于吸收因子; 粒径在 $20\ \mu\text{m}$ 附近时, 散射因子为 1.53, 吸收因子为 1.54, 二者较为接近; 之后散射因子大于吸收因子。

由图 2 可看出, 在 $20\sim 30\ \mu\text{m}$ 粒径范围时, 太赫兹波段沙尘粒子的消光效率最大, 消光因子的峰值随太赫兹波长变大移向粒径增大的方向。

图 3 为太赫兹波波长为 $30\ \mu\text{m}$, $35\ \mu\text{m}$ 和 $40\ \mu\text{m}$ 时沙尘暴对太赫兹波衰减的影响。计算结果表明: 波长越小, 沙尘暴引起的太赫兹波衰减越大。

对于 3 种不同类型沙尘天气即: 沙尘暴(sand and dust storm)、扬沙(blowing sand)和浮尘(floating sand)引起的信号衰减进行了预测, 见图 4。图 4 计算结果表明: 波长为 $40\ \mu\text{m}$ 时, 沙尘暴对太赫兹波传播影响最大, 太赫兹波衰减最大; 浮尘对太赫兹波的影响最小, 衰减最小; 扬沙天气的影响处于沙尘暴和浮尘中间。这是因为沙尘暴天气时, 单位体积内的粒子数比较大, 且较大粒径的粒子占比较大, 粒子的平均尺寸和波长较为接近, 因此对太赫兹波的散射和吸收增强, 导致太赫兹波衰减较大。在能见度较小时, 沙尘暴引起的太赫兹波衰减较大, 如在能见度为 $0.75\ \text{km}$ 时, 沙尘暴、扬沙和浮尘引起的太赫兹波衰减分别为 $12.98\ \text{dB}$, $7.43\ \text{dB}$ 和 $4.33\ \text{dB}$, 沙尘引起的衰减几乎是浮尘的 3 倍。

5 结论

应用 Mie 理论研究了沙尘粒子的太赫兹散射、消光和吸收特性及沙尘媒质中太赫兹波的传播衰减特性。仿真结果表明, 散射、消光和吸收系数效率因子随着粒径的不断增大先达到一个峰值, 而后开始逐渐变小; 沙尘粒径在 $20\sim 30\ \mu\text{m}$ 时, 沙尘粒子的消光效率最大。对对数正态分布下的沙尘太赫兹波衰减进行仿真计算, 结果表明, 波长越小, 沙尘暴引起的太赫兹波衰减越大; 波长为 $40\ \mu\text{m}$ 时的 3 种沙尘环境中的太赫兹波衰减表明, 沙尘暴对太赫兹波传播影响最大, 太赫兹波衰减最大; 浮尘对太赫兹波的影响最小, 衰减也最小; 扬沙的影响居中。本文研究对于恶劣气象环境下太赫兹波段的无线通信信道建模等具有重要理论参考价值。

参考文献:

[1] 洪伟,余超,陈继新,等. 毫米波与太赫兹技术[J]. 中国科学:信息科学, 2016,46(8):1086–1107. (HONG Wei,YU Chao, CHEN Jixin,et al. Millimeter wave and terahertz technology[J]. Scientia Sinica Informationis, 2016,46(8):1086–1107.)
 [2] YU X,JIA S,HU H,et al. 160 Gbit/s photonics wireless transmission in the 300–500 GHz band[J]. Apl. Photonics, 2016,1(8):1–6.

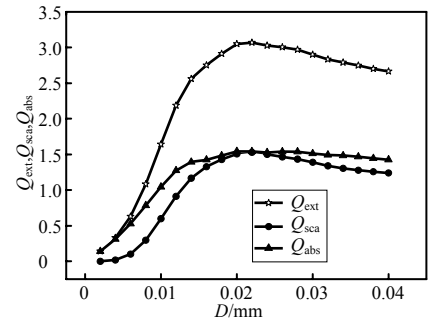


Fig.1 Relations of efficiencies for scattering, extinction and absorption with particle size($\lambda=30\ \mu\text{m}$)

图 1 沙尘的散射、消光和吸收效率与粒径的关系

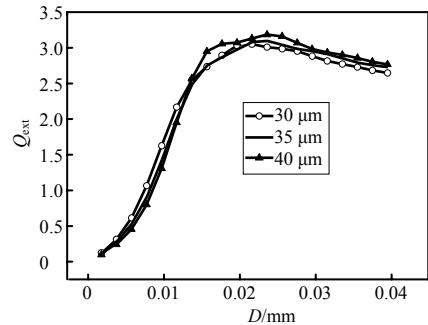


Fig.2 Relations of efficiency of extinction with particle size for different wave lengths

图 2 不同波长下沙尘的消光系数和粒径的关系

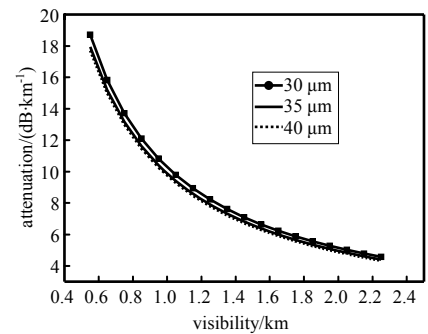


Fig.3 Relations of sand and dust storms attenuation with visibility for different wave lengths

图 3 沙尘暴衰减和能见度的关系

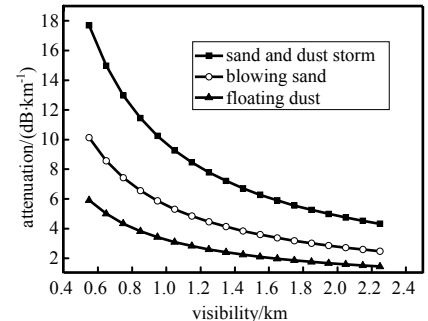


Fig.4 Relations of attenuation with visibility for different sand/dust weathers($\lambda=40\ \mu\text{m}$)

图 4 不同沙尘天气下衰减和能见度的关系

- [3] YANG Y,MANDEHGAR M,GRISCHKOWSKY D R. Broadband THz pulse transmission through the atmosphere[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2011,1(1):264–273.
- [4] 杨瑞科,朱传帅,刘科祥. 红外波在沙尘暴中的后向散射增强[J]. 红外与激光工程, 2017,46(1):87–93. (YANG Ruike, ZHU Chuanshuai,LIU Kexiang. Backscattering enhancement for infrared wave in sand and dust storm[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017,46(1):87–93.)
- [5] 王玉文,董志伟. 对称非球形冰晶对太赫兹波的衰减效应[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(3):345–348. (WANG Yuwen,DONG Zhiwei. Nonspherical symmetric ice crystal attenuation for terahertz wave[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(3):345–348.)
- [6] 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. (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):487–490.)
- [7] 尹文言,肖景明. 圆极化微波,毫米波在浮尘中传播的交叉去极化效应[J]. 电波科学学报, 1990,5(2):44–50. (YIN Wenyan, XIAO Jingming. Cross polarization effect of circularly polarized microwave, millimeter wave propagation in the air suspending dust particles[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1990,5(2):44–50.)
- [8] 董庆生,赵振维. 沙尘引起的毫米波衰减[J]. 电波科学学报, 1996,11(2):29–32. (DONG Qingsheng,ZHAO Zhenwei. The mm-wave attenuation due to sand and dust[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1996,11(2):29–32.)
- [9] 杨瑞科,苏振玲,刘科祥. 沙尘暴多重散射对毫米波衰减影响研究[J]. 电波科学学报, 2008,23(3):530–533. (YANG Ruike, SU Zhenling,LIU Kexiang. Influence of multiple scattering on attenuation of millimeter wave propagation in sand and dust storm[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008,23(3):530–533.)
- [10] 周旺,周东方,侯德亭. 微波传输中沙尘衰减的计算与仿真[J]. 强激光与粒子束, 2005,17(8):1259–1262. (ZHOU Wang,ZHOU Dongfang,HOU Deting. Calculation and simulation of sand and dust attenuation in microwave propagation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005,17(8):1259–1262.)
- [11] DONG Qunfeng,LI Yingle,XU Jiadong,et al. Effect of sand and dust storms on microwave propagation[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2013,61(2):910–916.
- [12] XU Yingxia,HUANG Jiying,LI Yingle. The effect of attenuation induced by sand and dust storms on Ka-band electromagnetic wave propagation along earth-space paths[J]. International Journal of Infrared & Millimeter Waves, 2002,23(11):1677–1682.
- [13] 李宇晔,王新柯,张平,等. 模拟沙尘暴条件下的太赫兹辐射传输研究[J]. 激光与红外, 2008,38(9):921–924. (LI Yuye, WANG Xinke,ZHANG Ping,et al. The transmission characters of terahertz radiation in simulating sand-dust storms[J]. Infrared and Laser, 2008,38(9):921–924.)
- [14] 许文忠,钟凯,梅嘉林,等. 太赫兹波在沙尘中衰减特性[J]. 红外与激光工程, 2015,44(2):523–527. (XU Wenzhong, ZHONG Kai,MEI Jialin,et al. THz wave attenuation characteristics in sand and dust[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(2):523–527.)
- [15] 董群锋,李应乐,许家栋,等. 沙尘的红外衰减特性研究[J]. 装备环境工程, 2012,9(2):4–6. (DONG Qunfeng,LI Yingle, XU Jiadong,et al. Study on characteristics of infrared attenuation in sand and dust storms[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012,9(2):4–6.)
- [16] 魏邦海. 气溶胶和冰水两相粒子的散射特性[D]. 南京:南京信息工程大学, 2015. (WEI Banghai. Scattering properties of aerosols and ice water two-phase particle[D]. Nanjing,China:Nanjing University of Information Science & Technology, 2015.)

作者简介:



董群锋(1977–), 男, 陕西省礼泉县人, 博士, 副教授, 主要研究方向为天线罩及电磁波传播, 承担国家自然科学基金等项目 7 项, 在国内外期刊发表论文多篇, SCI 收录 9 篇, EI 收录 18 篇.email:qunfengdong1028@163.com.

李应乐(1962–), 男, 陕西省蓝田县人, 教授, 主要研究方向为电磁波传播与散射.

郭立新(1968–), 男, 西安市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为复杂目标与地海环境电磁散射特性、随机介质中的电波传播特性、天线理论设计与微波技术等.

王明军(1979–), 男, 陕西省旬阳县人, 教授, 主要研究方向为电磁波传播与散射.