

# 基于 Mie 理论的带电沙尘媒质 微波衰减特性研究

董群锋<sup>1,2</sup>, 李应乐<sup>2</sup>, 李俊杰<sup>3</sup>, 张辉<sup>1</sup>

(1.咸阳师范学院 物理与电子工程学院, 陕西 咸阳 712000; 2.陕西学前师范学院  
物理与电子技术系, 西安 710100; 3.西安工业大学 理学院, 西安 710100)

**摘要:** **目的** 研究带电沙尘媒质中微波衰减特性。**方法** 根据带电球形粒子 Mie 散射理论, 分析带电沙尘粒子的散射特性及带电沙尘媒质的微波衰减。**结果** 在同一频率下, 消光系数随着沙粒半径增大而增大, 带电沙粒的消光系数要大于不带电沙粒的消光系数。对于同一频率和能见度, 带电沙的衰减要比不带电沙的衰减要大, 且衰减随能见度的增大而减小。**结论** 带电沙尘粒子对微波传播影响比中性沙尘粒子明显。

**关键词:** 微波; 带电沙尘; 衰减

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2018.06.019

**中图分类号:** TN011

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2018)06-0099-04

## Microwave Attenuation Characteristics in Charged Sand and Dust Medium Based on Mie Theory

DONG Qun-feng<sup>1,2</sup>, LI Lngi-le<sup>2</sup>, LI Jun-jie<sup>3</sup>, ZHANG Hui<sup>1</sup>

(1.School of Physics and Electronic Engineering, Xianyang Normal University, Xianyang 712000, China;

2.Department of Physics and Electronic Technology, Shaanxi Xueqian Normal University, Xi'an 710100, China;

3.School of Science, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710000, China)

**ABSTRACT: Objective** To research microwave attenuation characteristics in charged sand and dust. **Methods** According to Mie scattering theory for a charged spherical particle, the scattering of charged sand and dust particle and attenuation properties for a medium with charged sand and dust particles were investigated. **Results** At the same frequency, the normalized extinction cross section increased with increase of particle radius size. The extinction coefficient of charged sand particles was greater than that of uncharged sand particles. The attenuations induced by charged sand and dust particle were greater than those of uncharged sand, and wave attenuation decreased with the increase of visibility. **Conclusion** The effects of charged dust particles on microwave propagation are more obvious than those of neutral dust particles.

**KEY WORDS:** microwave; charged sand and dust; attenuation

沙尘暴对气候、空气质量及通信系统的影响研究一直是倍受关注的课题<sup>[1-2]</sup>。沙尘粒子对电磁波信号的吸收和散射效应, 使信号产生衰减和去极化效应,

甚至引起微波、毫米波通信系统中断<sup>[3]</sup>。当发生沙尘暴时, 沙尘粒子能上升到地面以上足够高度, 位于微波或毫米波无线电路径内, 形成吸收和散射效应, 使

收稿日期: 2018-03-08; 修订日期: 2018-04-04

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

作者简介: 董群锋(1977—), 男, 陕西人, 博士, 副教授, 主要研究方向为天线罩及电磁波传播。

信号能量损耗,并引起附加相移。这样会使通讯距离大大减小,通信质量严重下降,甚至中断局部地区的通讯联络<sup>[4]</sup>。近年来,国内外学者主要做了两方面工作:沙尘暴对陆地微波通信线路方面的影响<sup>[5-10]</sup>和对地空路径通信线路的影响<sup>[11-13]</sup>,主要研究衰减和交叉去极化效应。

沙尘导致电磁波衰减的因素中,应该考虑沙粒粒子所带电荷影响。已有实验和理论<sup>[14]</sup>分析表明,风沙流中的沙粒是带有电荷的。对于局部带电的球形沙尘粒子,基于 Rayleigh 散射理论,文献<sup>[15]</sup>研究了带电沙尘的微波衰减特性。文献<sup>[16-17]</sup>分别研究了沙尘尺寸分布为对数正态分布和均匀分布式的电磁波衰减效应。J.Klacka 和 M.Kocifaj 研究了各向同性带电球形粒子的散射特性<sup>[18]</sup>,给出了带电球形粒子 Mie 散射系数。考虑沙尘粒子均匀分布, Li 等人应用带电 Mie 散射理论研究了带电沙尘媒质的衰减特性<sup>[19]</sup>。对于带电球形粒子散射, Rayleigh 近似计算简单,是一种静电场近似,其仅仅考虑了颗粒带电时对其内部电偶极矩的影响,而并没有考虑入射波对颗粒表面带电微观离子的作用,适用范围有限<sup>[19]</sup>;而带电 Mie 理论有效解决了这一问题,能保证精度且适用范围广。文中基于沙尘粒子尺寸的对数正态分布,应用带电球形粒子的 Mie 散射理论研究带电沙尘对微波传播特性的影响。

### 1 带电球形粒子的 Mie 散射系数

当平面波入射一带电球粒子时,边界条件为<sup>[18]</sup>:

$$\hat{n} \times (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) = 0 \tag{1}$$

$$\hat{n} \times (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{K} \tag{2}$$

式中:  $\hat{n}$  为球粒子的表面外法向矢量;  $\vec{K}$  为表面电流密度。表面电流密度和表面电导之间的关系<sup>[18]</sup>可以表示为:

$$\vec{K} = \sigma_s \vec{E}_t \tag{3}$$

式(1)和(2)进一步表示为:

$$\begin{cases} E_{i\theta} + E_{s\theta} = E_{1\theta} & (r = a) \\ E_{i\phi} + E_{s\phi} = E_{1\phi} & (r = a) \\ H_{i\theta} + H_{s\theta} = H_{1\theta} + \sigma_s E_{1\phi} & (r = a) \\ H_{i\phi} + H_{s\phi} = H_{1\phi} + \sigma_s E_{1\theta} & (r = a) \end{cases} \tag{4}$$

于是可得方程:

$$j_n(mx) + h_n^{(1)}(x)b_n = j_n(mx) \tag{5}$$

$$[mxj_n(mx)]' d_n + m[xh_n^{(1)}(x)]' a_n = m[xj_n(x)]' \tag{6}$$

$$\left\{ [mxj_n(mx)]' - iw\sigma_s \mu_1 R j_n(mx) \right\} c_n + \frac{\mu_1}{\mu_0} [xh_n^{(1)}(x)]' b_n = \frac{\mu_1}{\mu_0} [xj_n(x)]' \tag{7}$$

$$\left\{ mxj_n(mx) + iw\sigma_s \mu_1 R \frac{[mxj_n(mx)]'}{mx} \right\} d_n + \frac{\mu_1}{\mu_0} xh_n^{(1)}(x)a_n = \frac{\mu_1}{\mu_0} xj_n(x)(r = a) \tag{8}$$

解上述方程组可得散射系数  $a_n$  和  $b_n$  为:

$$a_n = \frac{u_0^{-1} \psi_n(x) \psi_n'(mx) - m u_1^{-1} \psi_n(mx) \psi_n'(x) - a_{n0}}{u_0^{-1} \xi_n(x) \psi_n'(mx) - m u_1^{-1} \psi_n(mx) \xi_n'(x) - a_{n01}} \tag{9}$$

$$b_n = \frac{u_0^{-1} \psi_n'(x) \psi_n(mx) - m u_1^{-1} \psi_n(x) \psi_n'(mx) + b_{n0}}{u_0^{-1} \xi_n'(x) \psi_n(mx) - m u_1^{-1} \xi_n(x) \psi_n'(mx) + b_{n01}} \tag{10}$$

其中:  $a_{n0} = iw k^{-1} \sigma_s \psi_n'(x) \psi_n'(mx)$

$$a_{n01} = iw k^{-1} \sigma_s \xi_n'(x) \psi_n'(mx)$$

$$b_{n0} = iw k^{-1} \sigma_s \psi_n(x) \psi_n(mx)$$

$$b_{n01} = iw k^{-1} \sigma_s \xi_n(x) \psi_n(mx)$$

式中:  $m$  是粒子的折射率;  $x$  是粒子的尺寸参数;  $\sigma_s$  为表面电导。当  $\sigma_s = 0$  时,即不考虑粒子带电因素,散射系数回归到经典 Mie 理论。

### 2 带电沙尘粒子的消光特性

通常把沙尘粒子处理为球形,并利用带电球形粒子的 Mie 散射理论进行严格精确求解。假设球形粒子的直径为  $D$ ,入射光波长为  $\lambda$ ,粒子的复折射率为  $m$ ,单个粒子的消光截面  $Q_{ext}(D)$  表示为<sup>[10]</sup>:

$$\sigma_{ext}(D) = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \tag{11}$$

### 3 带电沙尘衰减

电磁波在离散随机介质中传播时信号的衰减,可由不同尺度的单个粒子的消光截面和介质中粒子的尺度分布决定。电磁波在沙尘暴中传播时的信号衰减可用下式计算<sup>[11]</sup>:

$$A = \frac{15 \int_0^{\infty} \sigma_{ext}(D) p(D) dD}{2\pi V_b \int_0^{\infty} D^2 p(D) dD} \tag{12}$$

式中:  $A$  为信号衰减量, dB/km;  $\sigma_{ext}(D)$  表示直径为  $D$  的单个粒子消光截面;  $p(D)$  为粒子尺度分布函数。在本文计算中,粒子尺寸分布模型为对数正态分布<sup>[9]</sup>:

$$P(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma D} \exp\left[-(\ln D - m)^2 / 2\sigma^2\right] \tag{13}$$

式中:  $m$  和  $\sigma$  分别为  $\ln D$  的均值和方差。参数取值见文献<sup>[9]</sup>。

### 4 数值计算

取频率为 24, 37 GHz,含水量均为 10%,沙粒

的介电常数<sup>[3]</sup>分别为 4.0-j1.325 和 5.1-j1.4, 带电和不带电沙尘的面电导率<sup>[18]</sup>分别为  $5 \times 10^{-4} \text{ S/m}^2$  和  $0 \text{ S/m}^2$  时, 应用带电粒子的 Mie 散射理论数值计算粒子的消光截面。不带电和带电时的球形沙尘粒子的消光截面  $Q_{\text{ext}}$  与沙粒半径  $a$  之间的变化关系如图 1 所示。可以看出, 随着频率的增加, 沙粒的消光系数增大。在同一频率下, 消光系数随着沙粒半径增大而增大, 带电沙粒的消光系数要大于不带电沙粒的消光系数。

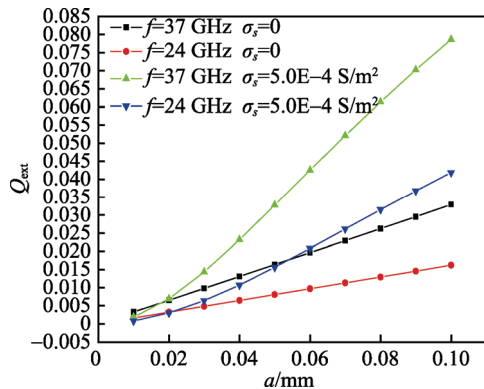


图 1 沙粒归一化消光截面与沙粒半径的关系

在沙粒衰减系数  $A$  的计算中, 分别在 14, 24, 37 GHz 的频率下, 应用式(12)进行了沙尘暴衰减预测, 结果如图 2 和 3 所示。图 2 表明, 对于同一频率和能见度, 带电沙的衰减要比不带电沙的衰减要大, 并且衰减随能见度的增大而减小。图 3 表示在不同频

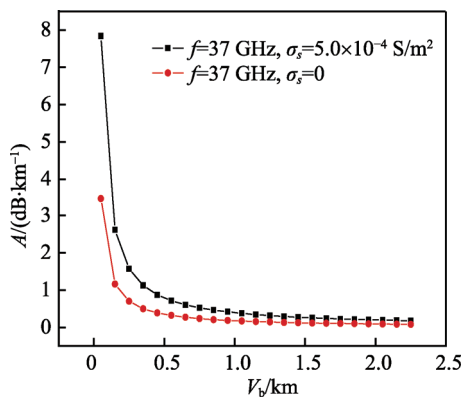


图 2 同一频率下带电的和不带电的沙尘衰减随能见度的变化

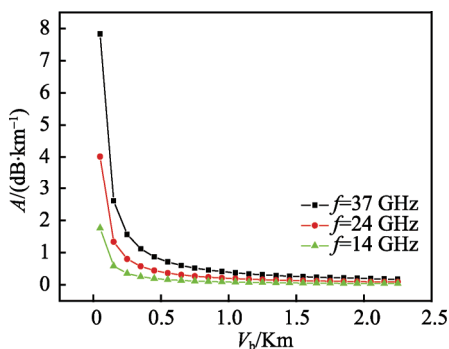


图 3 14, 24, 37 GHz 爆炸沙的衰减随能见度的变化

率下, 沙尘衰减随能见度的变化关系。可以看出, 频率越大, 衰减越大。

## 5 结论

文中应用带电球形粒子 Mie 散射理论, 研究了电磁波频率、面电导率和能见度对微波衰减的影响。对于同一频率和能见度, 带电沙的衰减要比不带电沙的衰减要大, 并且衰减随能见度的增大而减小。

## 参考文献

- [1] CHARISON R J, SCHWARTZ S E, HALES J M. Climate Forcing by Anthropogenic Aerosols[J]. Science, 1992, 255(5043): 423-430.
- [2] ALHAIDER M A. Radio Wave Propagation into Sandstorms System Design Based on Ten-years Visibility Data in RIYADH, Saudi Arabia in International[J]. Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 1986, 7: 1339-1359.
- [3] ANSARI A J, EVANS B G. Microwave Propagation in Sand and Dust Storms[J]. IEE Proc F, Commun, Radar & Signal Process, 1982, 129: 315-322.
- [4] DONG X Y, CHEN H Y. Microwave and Millimeter Wave Attenuation in Sand and Dust Storms[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011(10): 469-471.
- [5] CHEN H Y, KU C C. Calculation of Wave Attenuation in Sand and Dust Storms by the FDTD and Turning Bands Methods at 10~100 GHz[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 2012, 60(6): 2951-2960.
- [6] ADEL A A. Effect of Particle Size Distribution on Millimeter Wave Propagation into Sandstorms[J]. In J Inf Millim Waves, 1986, 7(6): 857-868.
- [7] AHMED A S, ADEL A A, ALHAIDER M A. Airborne Dust Size Analysis for Tropospheric Propagation of Millimetric Waves into Dust Storms[J]. IEEE Trans on Geosci and Remote sensing, 1987, 25(5): 599-693.
- [8] GOLDBIRSH J. Attenuation and Backscatter from a Derived Two-Dimensional Duststorm Model[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 2001, 49(12): 1703-1711.
- [9] 周旺. 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.
- [10] 杨瑞科, 鉴佃军, 姚荣辉. 沙尘暴中毫米波传播衰减及双频互相关函数研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2007, 34(6): 953-957.
- [11] 尹文言, 万伟. 沙尘暴对地-空微波、毫米波传播的影响[J]. 西北工业大学学报, 1991, 9(4): 484-492.
- [12] 徐英霞, 黄际英. 沙尘暴对地空路径上 Ka 频段电波传播的影响[J]. 电波科学学报, 2003, 18(3): 328-331.
- [13] ZHENG X J, HUANG N, ZHOU Y H. Laboratory Measurement of Electrification of Wind-blown Sands and Simulation of Its Effect on Sandsaltation Movement[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108, 43-22.

- [14] ZHOU Y, HE Q, ZHENG X. Attenuation of Electromagnetic Wave Propagation in Sandstorms Incorporating Charged Sand Particles[J]. *Eur Phys J E*, 2005, 17: 181-187.
- [15] DONG Q F, XU J D, LI Y L. Calculation of Microwave Attenuation Effect due to Charged Sand Particles[J]. *International Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 2010, 32 (1): 55-63.
- [16] 董群锋, 许家栋, 李应乐. 毫米波在带电沙尘中的传播特性[J]. *装备环境工程*, 2009, 6(5): 1-4.
- [17] KLACKA J, KOCIFAJ M. Scattering of Electromagnetic Waves by Charged Spheres and Some Physical Consequences[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2007, 106: 170-183.
- [18] LI X, LI X, ZHENG X. Attenuation of an Electromagnetic Wave by Charged Dust Particles in a Sandstorm[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(35): 6756.