

沙尘大气电磁波多重散射及衰减

杨瑞科 李茜茜 姚荣辉

Multiple scattering and attenuation for electromagnetic wave propagation in sand and dust atmosphere

Yang Rui-Ke Li Qian-Qian Yao Rong-Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 094205 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.094205

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094205>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Pearcey 光束簇的实验产生和光学结构研究

Generation of a family of Pearcey beams and their optical structure

物理学报.2015, 64(23): 234205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234205>

背景辐射对被动测距精度影响分析及实验研究

Influence of background radiation on the precision of passive ranging

物理学报.2015, 64(3): 034216 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034216>

温度、湿度及压强对激光在水中衰减特性的影响

Influences of temperature humidity and pressure on the attenuation characteristics of laser beam in water

物理学报.2015, 64(2): 024215 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024215>

大气环境下基于目标照明回光的视轴误差校正实验研究

Experimental research of boresight error correction using returning signals from the illuminated targets through atmosphere

物理学报.2015, 64(2): 024216 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024216>

湍流介质折射率结构常数 C_n^2 对双半高斯空心光束传输特性影响的研究

Effects of turbulent medium refractive index structure constant C_n^2 on the propagation characteristics of double-half hollow Gaussian beams

物理学报.2014, 63(16): 164208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.164208>

沙尘大气电磁波多重散射及衰减*

杨瑞科[†] 李茜茜 姚荣辉

(西安电子科技大学物理与光电工程学院, 西安 710071)

(2015年10月8日收到; 2016年1月25日收到修改稿)

为了使干旱沙漠地区的电子系统能够全天候的工作, 必须开展沙尘大气的电磁波多重散射及衰减特性研究. 根据 Mie 理论、沙尘大气粒子尺寸分布和能见度的关系得到了电磁波沙尘大气传播衰减的计算方法, 计算了不同沙尘大气能见度的 37 GHz 电磁波的衰减, 与其他经验公式及文献中的实验结果进行比较, 文中方法得到的结果更接近于测量结果. 为了研究较低能见度沙尘暴中电磁波的传播特性, 需研究沙尘大气的多重散射效应. 应用 Monte Carlo 模拟方法, 在沙尘粒子为干燥和 5% 水含量时, 模拟了 37 GHz 和 93 GHz 电磁波在沙尘大气中传播时考虑多重散射效应的衰减, 并与基于 Mie 理论的计算结果进行比较, 结果显示, 在 37 GHz 时, 沙尘大气的多重散射对衰减的影响小, 在 93 GHz 时多重散射显著, 沙尘大气能见度越低, 多重散射的影响越显著. 粒子水含量增加使电磁波的衰减显著增大, 对多重散射的影响不明显. 因此, 在相同大气能见度下, 沙尘天气越干燥, 多重散射影响越大, 电磁波衰减减小越显著.

关键词: 电磁波, 沙尘大气, 衰减, 多重散射

PACS: 42.68.Ay, 92.60.Mt, 87.55.K-, 42.68.Jg

DOI: 10.7498/aps.65.094205

1 引言

频率高于 30 GHz 的电磁波, 即毫米波, 由于带宽宽、数据传输速率和分辨率高, 系统可小型化, 具有灵活的机动性, 可装配在不同平台和不同环境中, 备受各国及有关方面的重视, 在通信、雷达和成像等领域有广泛的应用前景. 然而, 随着频率的升高, 系统工作受大气环境影响严重, 甚至会使系统失效. 众所周知, 降雨产生的毫米波信号的衰减是最主要的因素之一, 然而对于工作于占世界陆地近三分之一的干旱沙漠化、风沙化和半干旱地区, 沙尘天气及沙尘暴对毫米波传播的衰减将成为最关键的因素之一, 沙尘暴会造成系统性能严重下降. 中国也是世界上沙漠及沙漠化土地最严重的国家之一, 因此, 在干旱及半干旱地区对自然风沙天气、沙尘暴等对电磁波系统性能影响的研究具有重要的实际价值.

在沙漠地区中, 风沙天气形成空中悬浮的沙尘粒子对电磁波的吸收和散射会引起其严重的衰减. 随着沙尘大气能见度的降低, 大气中沙尘粒子浓度增加, 散射和衰减会迅速增大, 同时, 粒子对电磁波的多重散射效应也会显著提高, 因此, 为了研究沙尘暴大气对无线电系统性能的影响, 先需系统地研究沙尘大气电磁波衰减, 进一步研究较低能见度沙尘大气中粒子多重散射对电磁波传播衰减的影响, 可为更高频率的电子系统全天候的工作奠定基础 and 提供依据.

对沙尘大气中电磁波传播衰减特性的研究较多. 1979年, Chu^[1] 为了研究将更高的微波频率应用于干旱少雨的沙漠地区, 在 Rayleigh 近似和应用光学能见度描述沙尘大气时, 讨论了厘米波段的沙尘暴引起的相位漂移和衰减. 1987年, Ahmed 等^[2,3] 根据实际测量和分析, 以光学能见度作为沙尘暴参量, 计算了 37 GHz 的衰减, 指出对数正态分布能描述沙尘暴粒子的尺度分布, 分析了粒子

* 电磁环境特性及模化技术国防科技重点实验室项目资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: yrk1868@163.com

尺度分布对毫米波沙尘暴传播衰减及相位漂移的影响. Sihvola 和 Kong^[4] 给出了离散散射体介质的多相混合介质的等效介电常数的一般表达式, 可用于不同水含量的沙尘粒子的等效介电常数的计算^[5]. 1997年, 董庆生^[6] 基于中国典型沙区的理论和实验研究对沙尘的物理特性进行了系统讨论与分析, 给出了不同类型沙尘暴的粒子尺度分布和粒子介电常数等参量. 2005年, 周旺等^[5] 利用等效不同含水量的沙尘粒子介电常数, 分析了不同含水量的自然沙尘的微波衰减, 表明沙尘衰减随含水量的增加上升明显. 2007年, 杨瑞科等^[7] 研究了沙尘暴中毫米波传播衰减及脉冲信号双频互相关函数, 研究了毫米波在雨中的多重散射和后向散射增强效应及对雷达特性的影响^[8], 也对激光脉冲在沙尘大气中传播的形变和延迟等开展了研究^[9]. 王红霞等^[10] 研究了激光在不同气溶胶大气中传播的衰减及多重散射效应, 指出当能见度较低时, 单次散射计算存在很大误差, 用 Monte Carlo 模拟方法更能揭示多重散射现象. 王海华等^[11] 利用广义 Mie 理论和 Monte Carlo 方法开展了水云滴内和外混合黑碳气溶胶的光散射的多重散射特性. 2011年, Dong 等^[12] 应用等效介电常数法研究了微波在沙尘暴中的衰减和相位漂移, 并用 Ghobrial 公式计算的衰减进行验证. 2012年, Alhuwaimel 等^[13] 讨论了干旱和半干旱地区沙尘暴引起雷达信号的衰减, 并对几种衰减模型的预测结果和测量结果进行比较, 指出计算结果都小于实验结果. 2013年 Dong 等^[14] 基于 Rayleigh 近似下的粒子前向散射幅度给出了微波在沙尘暴中传播衰减和相位漂移的一般公式, 与其他公式和模型进行比较, 计算的衰减与 Goldhirsh 公式计算的结果一致. 2014年, 吴良海等^[15] 为了解决天空偏振光模式的描述问题, 在考虑大气气溶胶粒子的多次散射特性的情况下, 构建了一种天空偏振光模式的解析模型. Islam 等^[16] 利用几个经验模型估算了 40 GHz 微波沙尘大气的衰减, 并与测量结果进行比较, 结果表明几个模型估算结果偏离并低于测量值.

当前沙尘大气衰减研究主要是基于 Rayleigh 近似和 Mie 散射理论得到经验公式或方法, 计算的结果一般较实验观测结果小, 并且计算模型大多是针对于 40 GHz 以下, 对于更高频率电磁波及适用于较低能见度的计算及方法还很少, 而对沙尘粒子多重散射效应对电磁波衰减影响等研究开展得

更少. 因此, 本文根据电磁波在离散随机介质中传播和散射理论, 基于测量和计算沙尘大气的一些物理特性, 应用 Mie 理论计算粒子的吸收和散射特性, 应用 Monte Carlo 模拟法在考虑粒子多次散射的情况下, 模拟计算电磁波通过沙尘大气传播时的衰减, 分析不同类型、不同能见度及不同水含量的沙尘天气中粒子的多重散射效应对电磁波传播衰减的影响. 为开发应用于沙尘大气中更高频段电子系统提供更可靠的理论和工程依据.

2 衰减计算方法

离散随机介质中粒子消光截面和粒子尺度分布函数乘积的积分, 用于计算电磁波在降雨及沙尘大气中传播的衰减率 (dB/km)^[7,17], 其表示式为

$$\alpha = 4.343 \times 10^3 \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \sigma_{\text{ext}}(r) N(r) dr \quad [\text{dB/km}], \quad (1)$$

其中粒子尺度分布函数 $N(r) = N_0 p(r)$, N_0 为介质的粒子数密度, 即单位体积介质中的粒子数; $\sigma_{\text{ext}}(r)$ 是粒子半径为 r 的消光截面.

对于沙尘大气及沙尘暴的强弱一般采用光学能见度来度量, 在光学上, 光波强度在大气中传播的衰减随距离变化具有指数的规律, 若用 α_0 表示光波在沙尘大气中的衰减, 用 C 表示一个黑体目标与亮背景下的对比度, Ansari 和 Evans^[18] 给出了光波在沙尘大气中的衰减率与能见度之间的关系为

$$C = \exp(-\alpha_0 V_b), \quad (2)$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{V_b} \ln \frac{1}{C} = 4.343 \frac{1}{V_b} \ln \frac{1}{C} \quad [\text{dB/km}], \quad (3)$$

其中 C 一般取 0.031, 则 $\alpha_0 \approx 15/V_b$. 对于光波衰减, 由于粒子尺度较波长为大, 光波沙尘粒子的消光截面近似满足 $\sigma_t \approx 2\pi r^2$, 根据 (1) 式, 即可得到沙尘大气中粒子数密度与能见度之间的关系

$$N_0 = \frac{15/4.343 \times 10^{-3}}{2\pi V_b \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} r^2 p(r) dr}. \quad (4)$$

将 (4) 式应用于 (1) 式, 经过一些推导, 可得到电磁波在不同能见度的沙尘暴大气中传播的衰减率计

算公式为

$$A_r = \frac{15}{V_b} \frac{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} p(r) \sigma_t(r) dr}{2\pi \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} r^2 p(r) dr} \text{ [dB/km]}, \quad (5)$$

该式建立了电磁波衰减率与沙尘大气能见度、沙尘暴中粒子尺度分布概率、粒子消光截面之间的关系, 粒子消光截面 $\sigma_t(r)$ 可应用 Mie 散射方法精确地计算, 使得沙尘暴电磁波衰减预测更为精确. 沙尘大气中沙尘粒子尺度分布概率一般采用对数正态概率密度函数来描述 [3,6], 其形式为

$$p(r) = \frac{1}{r\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln r - m)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (6)$$

其中 $m = \ln(\bar{r})$ 为均值, $\sigma = \ln\sigma_g$ 为方差, \bar{r} 是平均粒子半径, σ_g 是标准偏差. 若对所有尺寸粒子的 $p(r)dr$ 进行积分, 应该趋于 1, 即满足 $\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} p(r)dr = 1.0$, 其中 r_{\min} 和 r_{\max} 分别表示沙尘大气中最小和最大粒子半径值.

为了与已有的其他计算公式和方法进行比较, 给出几种基于 Rayleigh 近似和 Mie 散射理论得到的公式和模型. Chen 和 Ku [19] 基于有限时域差分法 (FDTD) 和 Turning Bands 的方法, 得到沙尘粒子的散射截面计算的经验公式为

$$\sigma_{\text{ext}} = \frac{8.05 \times 10^{-7} (f^{1.2} + 1)}{V_b^{0.3} r} G, \quad (7)$$

式中 f 为 GHz 表示的频率, 频率范围 10—100 GHz; V_b 为大气能见度, 范围为 0.001—1 km; r 是以微米表示的粒子半径, $G = \frac{\epsilon''}{(\epsilon' + 2)^2 + \epsilon''^2}$, 其中 ϵ' 和 ϵ'' 分别是沙尘粒子介电常数的实部和虚部.

Dong 等 [12] 应用等效介质特性的方法, 研究了微波毫米波在沙尘暴大气中传播的复数传播因子, 得到沙尘暴大气中衰减率的表示式为

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{\epsilon'_{\text{eq}}}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1) \right]^{1/2}, \quad (8)$$

其中, 损耗正切 $\tan \delta = \epsilon''_{\text{eq}}/\epsilon'_{\text{eq}}$, 沙尘粒子的等效复介电常数应用 (9) 式计算, 其表示为

$$\begin{aligned} \epsilon_{\text{eq}}^* &= \epsilon'_{\text{eq}} - j\epsilon''_{\text{eq}} \\ &= \epsilon_{\text{air}} + \frac{3V_f \epsilon_{\text{air}} (\epsilon_s^* - \epsilon_{\text{air}}) / (\epsilon_s^* + 2\epsilon_{\text{air}})}{1 - V_f (\epsilon_s^* - \epsilon_{\text{air}}) / (\epsilon_s^* + 2\epsilon_{\text{air}})}, \end{aligned} \quad (9)$$

式中 ϵ_{air} 是空气的相对介电常数, V_f 是单位体积中沙尘粒子所占的体积百分比, ϵ_s^* 是沙尘粒子的复数相对介电常数.

根据 Rayleigh 散射近似, Goldhrish [20] 得到计算微波沙尘暴衰减率的公式

$$\alpha = \frac{2.317 \times 10^{-3}}{V^{1.07} \lambda} G, \quad (10)$$

其中 λ 是大气中的波长.

Ahmed 等 [2] 基于测量的沙尘粒子尺度分布的概率密度函数, 应用 Mie 理论, 得到了毫米波在沙尘暴大气中传播的衰减率计算的简化表示式

$$\alpha = 5.67 \times 10^2 \frac{r_e}{\lambda V} G, \quad (11)$$

其中 r_e 是以微米表示的等效粒子半径.

Elabdin 等 [21] 根据 Mie 散射理论和每个粒子消光的积分 (1) 式, 得到了计算微波沙尘暴大气衰减率的经验计算式

$$\alpha = \frac{r_e f}{V} (X + Y r_e^2 f^2 + Z r_e^3 f^3), \quad (12)$$

其中 $X = 1886G$

$$\begin{aligned} Y &= 137 \times 10^3 \times \epsilon'' \left\{ 1.2 \right. \\ &\quad \times \frac{7(\epsilon'^2 + \epsilon''^2) + 4\epsilon' - 20}{[(\epsilon' + 2)^2 + \epsilon''^2]^2} \\ &\quad \left. + \frac{1}{15} + \frac{5}{3(2\epsilon' + 3)^2 + 12\epsilon''^2} \right\}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z &= 379 \times 10^4 \{ (\epsilon' - 1)^2 (\epsilon' + 2) \\ &\quad + [2(\epsilon' - 1)(\epsilon' + 2) - 9] + \epsilon''^4 \\ &\quad \times [(\epsilon' + 2)^2 + \epsilon''^2]^{-2} \}, \end{aligned}$$

而 f 是以 GHz 表示的频率, r_e 是等效粒子半径.

3 计算结果分析

应用 Mie 散射理论, 当沙尘粒子介电常数为 $2.5 - j0.373(5\% \text{ 含水量})$ 时, 计算了 37 GHz 毫米波的散射、吸收和消光截面. 对于典型扬沙尘大气, 粒子尺度分布参量 $\bar{r} = 0.0237 \text{ mm}$, $\sigma_g = 2.0$, 应用文中给出的几种计算方法分别估算了不同能见度沙尘大气中 37 GHz 电波传播的衰减率, 并与文献 [13, 22] 中的实验和预估数据比较, 如图 1 所示.

图 1 (a) 是各种计算方法得到结果的对数-对数坐标, 能清楚地看出各种方法的计算结果和实验结果的差别; 图 1 (b) 应用直角-对数坐标, 能更清楚地反映出低能见度时各种计算方法得到结果的差异. 从图 1 中结果可看出, 基于 Mie 散射得到的几个经验公式 (如: Ahmed, Elabdin) 和文中计算方法 (Y-Mie) 得到的结果较根据 Rayleigh 散射的计算公式 (Dong 和 Goldhrish 方法) 得到的结果要

大, Chen 的方法预测的结果在大能见度时较小, 而在小能见度时稍大. 因此, 在 37 GHz, 基于 Mie 理论的 Ahmed 与本文讨论的方法结果非常接近, 且更接近于实验结果 (S. A. -Meas), Elabdin 方法的结果与文献 [13] 中的预测结果 (S. A. -Math) 接近, 但较实验结果为小. 从图 1 (b) 可看出, 随着能见度的降低, 各种方法计算结果间的差别愈来愈大, 表明在低能见度沙尘大气中电磁波衰减的估算方法需要进一步研究. 根据随机介质中波传播机理和理论, 当介质中粒子密度较大, 对于沙尘大气来说, 能见度较低时, 沙尘暴中粒子的多重散射效应愈来愈强, 那么, 在衰减预测中就必需要考虑它的影响.

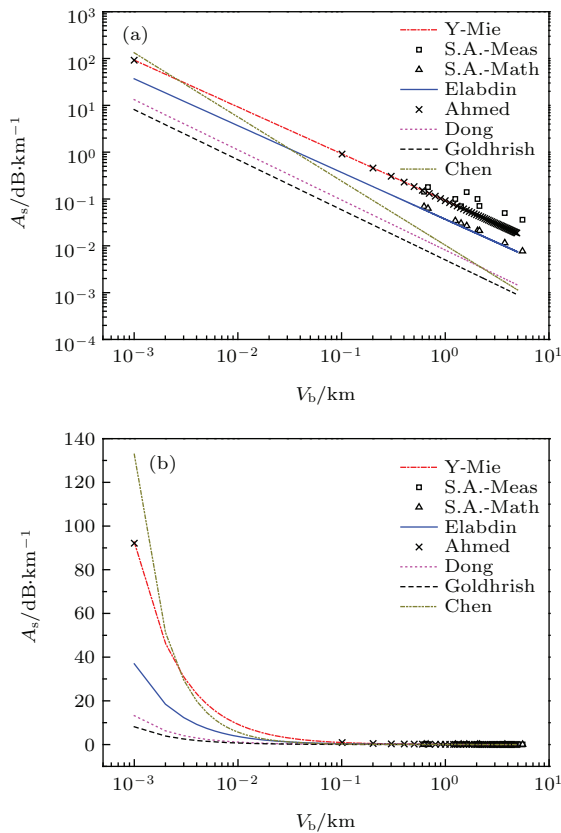


图 1 (网刊彩色) 各种方法计算的 37 GHz 衰减率与实验值的比较 (a) 对数 - 对数坐标; (b) 线性 - 对数坐标

Fig. 1. (color online) The comparison between the calculation and experiment attenuation data: (a) Log-log coordinates; (b) linear-log coordinates.

4 沙尘大气中的多重散射

4.1 多重散射模拟方法

基于单次散射计算的衰减只适用沙尘所占大气空间体积较小的情况. 随着沙尘大气能见度的减小, 粒子数密度增大, 大气介质光学厚度增加, 电

磁波在沙尘粒子间的多重散射就会加强. Monte Carlo(MC)方法是通过光子被介质中随机分布粒子的多次散射和吸收过程来模拟分析电磁波的传播特性. 因此, MC方法可用于研究电磁波在离散随机介质中, 如沙尘大气中传播的多重散射效应对信号衰减的影响.

MC方法认为光子在随机分布的沙尘粒子中或被散射, 或被粒子吸收, 或从介质中逃逸出. 没有被吸收的光子可能与其他粒子碰撞再次遭到散射, 当某个光子遭受多重散射时, 每一次散射只与前一次散射有关, 即可把光子的历史状态序列用马尔可夫过程描述, 用光子经过 m 次空间传播和散射后的状态序列 $\{s_l\}(l = 1, \dots, m)$ 构成样本空间. 光子在沙尘介质层中经传播和散射后到达相空间点 s 是由 $m(m = 0, 1, \dots, M)$ 个相互排斥的事件构成的. 利用全概率公式, 这一事件的概率可以写成 [8-10,23]

$$P(s) = \sum_{m=0}^{\infty} P_m(s), \quad (13)$$

上式中 $P_m(s)$ 为光子在沙尘暴中经过 m 次空间传播或散射后到达相空间点 s 的概率. 由于光子在沙尘介质中的随机游动是一种马尔可夫过程, 则有

$$P(s) = P(s_0)P(s_1/s_0) \cdots P(s/s_{m-1}), \quad (14)$$

式中条件概率 $P(s_l/s_{l-1})(l = 1, \dots, m)$ 表示光子相空间点 s_{l-1} 经过传播或散射后到达的相空间点 s_l 的概率, 则估计函数可以表示为

$$\begin{aligned} P_t &= \sum_{m=0}^{\infty} P_m \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} W_m \exp \left[-C_t \frac{h - z_m}{\cos \alpha_m} \right] \cdot \eta(\cos \alpha_m) \\ &\quad \times \prod_{l=1}^m \eta(h - z_l) \eta(z_l), \end{aligned} \quad (15)$$

式中 $C_t = \rho \langle \sigma_t \rangle$, $\langle \sigma_t \rangle$ 为粒子平均消光截面, 而 ρ 为离散随机介质中散射元的体密度. 这里引入 $\eta(x) = 1(x > 0)$; $\eta(x) = 0(x \leq 0)$. 权函数 W_m 可以表示为

$$W_{m+1} = W_m \exp \left[-C_a \left| \frac{z_{m+1} - z_m}{\cos \alpha_m} \right| \right], \quad (16)$$

式中 α_m 为光子第 m 次散射方向与 z 轴的夹角, $C_a = \rho \langle \sigma_a \rangle$, $W_0 = 1$ 为光子的初始权重. 跟踪 N 个光子, 通过对光子散射路径抽样以及对光子散射方向和位置跟踪, 最后检验从介质中逃逸和被吸

收的光子. 可以获得平均透过率为

$$T = \frac{1}{N} \sum_1^N P_t. \quad (17)$$

4.2 计算与分析

根据Mie散射理论计算的37和93 GHz电磁波在不同类型沙尘大气(扬沙尘大气和腾格里沙漠地区的沙尘暴)中传播的粒子散射、消光、反照率、不对称因子等特性,应用MC模拟计算考虑沙尘粒子多重散射效应的电磁波传播衰减,并与基于Mie理论的考虑单次散射的衰减进行比较,结果如图2—图4所示.

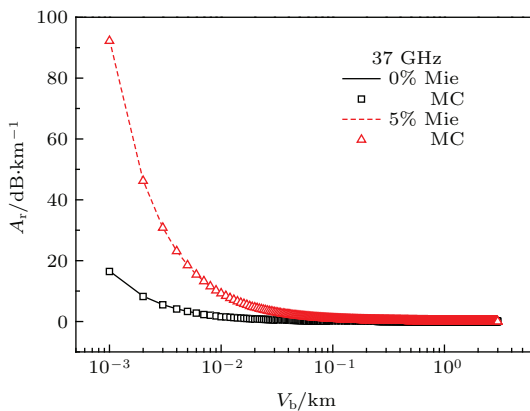


图2 (网刊彩色) 扬沙多重散射对37 GHz电波衰减影响
Fig. 2. (color online) The effect of multiple scattering on attenuation vs. V_b in blowing sand and dust atmosphere at 37 GHz.

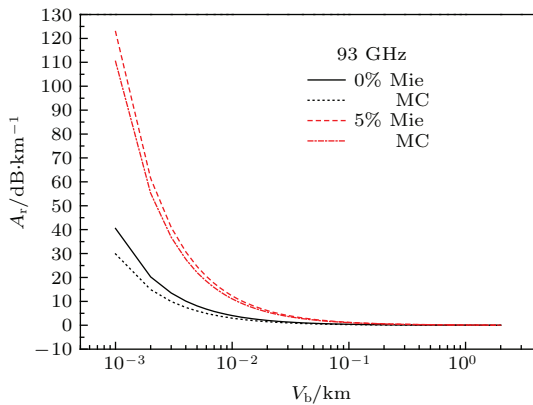


图3 (网刊彩色) 扬沙多重散射对93 GHz电波衰减影响
Fig. 3. (color online) The effect of multiple scattering on attenuation vs. V_b in blowing sand and dust atmosphere at 93 GHz.

对于典型的扬沙尘天气,当干旱地区的粒子含水量接近于零时,沙尘粒子的介电常数: 37 GHz为 $2.5-j0.063$, 93 GHz为 $3.05-j0.055$; 粒子尺度

分布参数: $\bar{r} = 0.0237$ mm, $\sigma_g = 2.0$ [6,18]. 腾格里沙尘暴的沙尘粒子的介电常数: 37 GHz为 $5.43-j0.074$; 93 GHz为 $3.69-j0.053$; 粒子尺度分布参数: $m = -2.31$, $\sigma = 0.296$ [6]. 沙尘大气中沙尘粒子的成分的稍许变化,就会导致介电常数的变化,从而会引起沙尘暴电磁波衰减和多重散射的变化. 大气湿度不同,使得沙尘粒子水含量不同,为了分析粒子水含量对电磁波衰减和多重散射的影响,我们对沙尘粒子含水量为5%的沙尘大气衰减也进行了分析,含水量为5%的沙尘粒子的介电常数,37 GHz的为 $2.6-j0.373$, 93 GHz为 $3.318-j0.225$,应用等效介电常数的方法进行计算 [4,5].

在扬沙尘大气环境下,计算了干沙尘大气(粒子水含量接近于零)和粒子含水量为5%时的沙尘大气对37 GHz和93 GHz电磁波传播的衰减和粒子的多重散射对衰减的影响,结果如图2和3所示. 从图2的37 GHz结果可看出,基于Mie和MC计算的结果差别很小,随着大气湿度增加,粒子含水量为5%时,衰减有大的增加,但多重散射对衰减的影响很小,因此,当电磁波频率低于37 GHz时,沙尘暴大气多重散射对电磁波衰减的影响可以忽略不计. 对于93 GHz的衰减,如图3所示,粒子中水含量的增加对衰减的影响很大,多重散射对衰减的影响随着大气能见度的降低变得越来越显著.

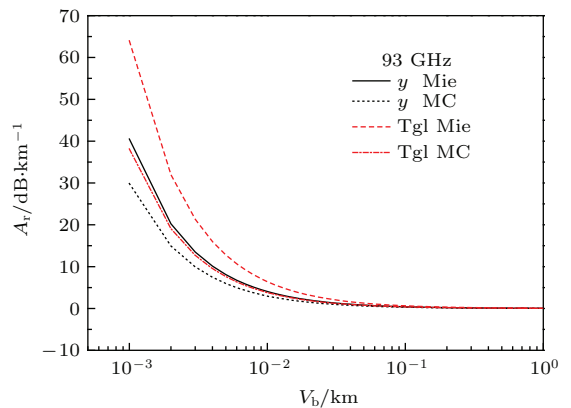


图4 (网刊彩色) 扬沙与沙尘暴多重散射对93 GHz电波衰减影响
Fig. 4. (color online) Comparison of the effects of multiple scattering in blowing sand and dust atmosphere with storm at 93 GHz.

图4给出了在扬沙尘大气和沙尘暴大气环境下93 GHz电磁波的衰减,图中“y”表示扬沙尘天气的衰减,“Tgl”表示腾格里沙尘暴的电磁波的衰减. 从结果可看出,沙尘暴的衰减要大于扬沙尘天

气的衰减,沙尘暴大气中粒子的多重散射对衰减的影响也要显著些.因此,对较高频率的电磁波在沙尘大气中传播时,大气衰减必须要计算预测,同时沙尘粒子多重散射的影响也必须要考虑.

5 结 论

基于能见度与沙尘大气中粒子数密度的关系、粒子尺度分布,应用Mie散射计算粒子消光特性,给出了沙尘大气中电磁波衰减的计算方法,对37 GHz电磁波衰减进行计算,并与现有的计算公式或模型及文献中实测数据进行比较,文中方法所得到的结果与实测数据更为接近;而各个方法的计算结果间的差别随着沙尘大气能见度的降低变得越来越大,因此,较低能见度沙尘大气需要进一步研究.

目前,对于较低沙尘大气能见度的电磁波衰减的计算不多,实验观测很少看到.我们应用MC在考虑粒子多重散射情况下模拟分析了37, 93 GHz波在沙尘暴大气中传播的衰减,并与文中基于Mie理论的计算结果进行比较,发现当能见度较低时,沙尘暴中粒子的多重散射影响越来越严重,基于Mie和MC的结果差别逐渐增大,且当电磁波频率低于37 GHz时,多重散射对衰减的影响可以不考虑,大于37 GHz时,无论是扬沙尘天气还是沙尘暴,沙尘粒子的多重散射对电磁波衰减的影响随着频率升高而变得越来越显著.

沙尘粒子含水量对电磁波衰减影响的研究表明,粒子水含量的增加会使粒子对电磁波的吸收增加,使得沙尘大气的电磁波损耗有大的增大,而多重散射影响变化不很显著.总之,湿度较大的沙尘暴天气对电磁波传播的损耗影响更为严重,而干旱地区的沙尘暴大气对电磁波的衰减相对要小,可望采用较高频率的无线电系统进行监测.

参考文献

[1] Chu T S 1979 *Bell Syst. Tech. J.* **58** 549

[2] Ahmed A S, Ali A A, Alhaider M A 1987 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **GH-25** 593

- [3] Ahmed A S 1987 *IEE Proc.* **134** 55
- [4] Sihvola A H, Kong J A 1988 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **26** 420
- [5] Zhou W, Zhou D F, Hou D T, Hu T, Weng L W 2005 *High Power Laser and Partical Beams* **17** 1259 (in Chinese) [周旺, 周东方, 侯德亭, 胡涛, 翁凌雯 2005 强激光与粒子束 **17** 第1259页]
- [6] Dong Q S 1997 *Chin. J. Radio Sci.* **12** 15 (in Chinese) [董庆生 1997 电波科学学报 **12** 15]
- [7] Yang R K, Jian D J, Yao R H 2007 *J. Xidian Univ.* **34** 953 (in Chinese) [杨瑞科, 鉴佃军, 姚荣辉 2007 西安电子科技大学学报 **34** 953]
- [8] Yang R K, Li L, Ma H H 2013 *Indian J. Radio and Space Phys.* **42** 404
- [9] Yang R K, Ma C L, Li L C 2007 *Chin. J. Lasers* **34** 1393 (in Chinese) [杨瑞科, 马春林, 李良超 2007 中国激光 **34** 第1393页]
- [10] Wang H X, Zhu Y Z, Tian T, Li A J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 024214 (in Chinese) [王红霞, 竹有章, 田涛, 李爱军 2013 物理学报 **62** 024214]
- [11] Wang H H, Sun X M 2012 *Chin. Phys. B* **21** 054204
- [12] Dong X Y, Chen H Y, Guo D H 2011 *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* **10** 469
- [13] Alhuwaimel S, Mishra A, Inngs M 2013 *Proceeding of 2012 International Conference on Electromagnetics in Advanced Application (ICEAA)* Cape Town, South Africa, IEEE Sept. 2-7, 2012 p1096
- [14] Dong Q F, Li Y L, Xu J D, Zhang H, Wang M J 2013 *IEEE Trans. Anten. Propag.* **61** 910
- [15] Wu L H, Zhang J, Fan Z G, Gao J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 114201 (in Chinese) [吴良海, 张俊, 范之国, 高隽 2014 物理学报 **63** 114201]
- [16] Islam M R, Elsheikh E, Ismail A F, Bashir S O, Chebil J 2014 *Fifth International Conference on Computer and Communication Engineering* Kuala Lumpur, Malaysia, Sept. 23-25, 2014 p224
- [17] Oguchi T 1983 *Proc. IEEE* **71** 1029
- [18] Ansari A J, Evans B G 1982 *IEE Proc.* **129** 315
- [19] Chen H Y, Ku C C 2012 *IEEE Trans. Anten. Propag.* **60** 2951
- [20] Goldhirsh J 1982 *IEEE Trans. Anten. Propag.* **30** 1121
- [21] Elabdin Z E O, Islam M R, Khalifa O O, Abd-El-Raouf H E 2009 *PIER M* **6** 139
- [22] Alhaider M A, Ali A A 1989 *Sixth International Conference on Antennas and Propagation* Coventry United Kingdom, April 4-7, 1989 p268
- [23] Nie Z P, Fang D G 2009 *Modeling of Electromagnetic Scattering Characteristics for Target and Environment* (first edition) pp323-327 (Beijing: Defense Industrial Press) (in Chinese) [聂在平, 方大纲 2009 目标与环境电磁散射特性建模(第一版)(北京:国防工业出版社) 第323—372页]

Multiple scattering and attenuation for electromagnetic wave propagation in sand and dust atmosphere*

Yang Rui-Ke[†] Li Qian-Qian Yao Rong-Hui

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 8 October 2015; revised manuscript received 25 January 2016)

Abstract

For an electronic system operation under the conditions of all-weather in arid and semiarid areas, the studies of the attenuation and multiple scattering are necessary for electromagnetic wave propagations in sand and dust atmosphere. Based on Mie theory, a method of calculating the attenuations for electromagnetic wave propagation through sand and dust atmosphere is presented in this paper, which relate to the particle size distributions and visibilities for sand and dust atmosphere. The attenuations at 37 GHz are given for various visibilities, and are compared with the results calculated from other formulas and the experimental data from the literature. The attenuations are closer to the experimental results. In order to investigate into electromagnetic wave propagations in lower visibility sand and dust atmosphere, the multiple scattering in sand and dust storms are necessarily analyzed. At 37 and 93 GHz, the extinction cross sections, albedos and asymmetry factors are calculated by Mie theory for various size sand and dust particles. By the Monte Carlo (MC) simulation method, the attenuations for including the multiple scattering effects are calculated under the conditions of dry and 5% water content in sand and dust particles, respectively, and are compared with the results from Mie theory. The results are shown that the difference between the attenuation obtained by Mie and that by MC is small at 37 GHz. The influence of the multiple scattering on attenuation is small and may be ignored at 37 GHz. At 93 GHz, the difference between the attenuation obtained by Mie and that by MC is clear, and the attenuation obtained by using Mc simulation is smaller than that based on Mie theory. The effect of the multiple scattering on attenuation is evident at 93 GHz. The lower the visibility, the more notable the effect on attenuation is. For different sand and dust storms, the particle refractive indexes and the particle size distributions are different. For the sand and dust storms in Tengger desert and the blowing sand and dust atmosphere in north China, the attenuations at 93 GHz are analysed. In Tengger desert, the attenuation and the multiple scattering are larger than in blowing sand and dust atmosphere. The results show that the more the large size particles in sand and dust storms, the stronger the effect multiple scattering on attenuation is. Hence, for stronger sand and dust storms, the attenuation and the effect of multiple scattering become important. With the increase of water content in particle, the imaginary part of refractive index increases, the attenuation greatly increases, and the effect of the multiple scattering on attenuation is weakly varied. The analyses show that the attenuations for electromagnetic wave propagation in arid sand and dust atmosphere are smaller than in moisture sand and dust atmosphere under the condition of the same visibility.

Keywords: electromagnetic wave, sand and dust atmosphere, attenuation, multiple scattering

PACS: 42.68.Ay, 92.60.Mt, 87.55.K-, 42.68.Jg

DOI: 10.7498/aps.65.094205

* Project supported by the National Key Laboratory of Electromagnetic Environment.

[†] Corresponding author. E-mail: yrk1868@163.com