



## 不同模态沙尘暴对太赫兹波的衰减分析

王红霞 张清华 侯维君 魏一苇

### Analysis of terahertz wave attenuated by sand and dust storms with different modes

Wang Hong-Xia Zhang Qing-Hua Hou Wei-Jun Wei Yi-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 064101 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201393

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201393>

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

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

时空非均匀等离子体鞘套中太赫兹波的传播特性

Propagation characteristics of terahertz waves in temporally and spatially inhomogeneous plasma sheath

物理学报. 2017, 66(8): 084102 <https://doi.org/10.7498/aps.66.084102>

基于多重查找表的太赫兹波段卷云微物理参数的反演方法

Retrieval method of cirrus microphysical parameters at terahertz wave based on multiple lookup tables

物理学报. 2017, 66(5): 054102 <https://doi.org/10.7498/aps.66.054102>

缺陷组合嵌入VO<sub>2</sub>薄膜结构的可调太赫兹吸收器

Tunable terahertz absorber with multi-defect combination embedded VO<sub>2</sub> thin film structure

物理学报. 2020, 69(2): 027801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191511>

利用连续激光抽运-太赫兹探测技术研究单晶和多晶二氧化钒纳米薄膜的相变

Study of phase transition of single crystal and polycrystalline vanadium dioxide nanofilms by using continuous laser pump-terahertz probe technique

物理学报. 2020, 69(20): 204205 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201188>

太赫兹液晶材料与器件研究进展

Research progress of terahertz liquid crystal materials and devices

物理学报. 2019, 68(8): 084205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182275>

基于超材料的可调谐的太赫兹波宽频吸收器

Tunable terahertz wave broadband absorber based on metamaterial

物理学报. 2019, 68(24): 247802 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191216>

# 不同模态沙尘暴对太赫兹波的衰减分析

王红霞<sup>†</sup> 张清华 侯维君 魏一苇

(火箭军工程大学基础部, 西安 710025)

(2020年8月24日收到; 2020年10月18日收到修改稿)

太赫兹波空间传输特性研究对于太赫兹波在空间中的应用具有重要意义. 为研究太赫兹波在沙尘暴天气中的传输特性, 本文根据沙尘粒子尺度的对数正态分布, 应用 Mie 散射理论和 Monte Carlo 方法, 分析了国内不同地域的六种干沙模态沙尘暴对 1—10 THz 频段太赫兹波的衰减特性, 给出了消光参量和衰减率与频率的关系. 结果表明, 随着频率的增大, 1—10 THz 频段太赫兹波的衰减率呈先增加后减小的趋势, 沙尘暴的模态不同, 太赫兹波衰减较强的频段范围有所不同. 为了分析沙粒含水量对太赫兹波传输衰减的影响, 计算了不同尺寸的沙尘粒子 3 个效率因子与含水量的关系, 发现粒子尺寸不同, 含水量对消光的影响也不同; 应用 Monte Carlo 方法计算了两种湿沙模态的沙尘暴对 1—10 THz 频段太赫兹波的衰减, 给出了衰减率与含水量及频率的关系. 结果表明, 随沙粒含水量增大, 沙尘暴对太赫兹波衰减较强的频段向低频方向移动, 含水量小于 5% 时, 太赫兹波衰减率随含水量增大显著增强, 湿度较大的沙尘暴天气对太赫兹波的传输衰减影响更大.

**关键词:** 太赫兹波, 沙尘暴, Monte Carlo, 衰减率**PACS:** 41.20.Jb, 92.60.Qx, 42.68.Jg, 87.55.K-**DOI:** 10.7498/aps.70.20201393

## 1 引言

太赫兹波位于微波与远红外光波之间, 其频率范围为 0.1—10 THz, 与其他波段的电磁波相比, 太赫兹波兼备电子学和光子学的双重特征, 极具研究和应用前景. 近几十年来, 太赫兹科学与技术发展迅速, 成为重要的科学研究前沿, 太赫兹波独特的性质决定了其在军事及民用领域的应用前景十分广阔, 已经证明太赫兹波在空间通信、雷达成像、大气与环境监测、遥感、安全检测、医学成像诊断等领域有着广泛的应用前景<sup>[1-5]</sup>. 太赫兹雷达成像相比于微波雷达成像具有分辨率更高、体积更小、质量轻的特性; 太赫兹通信具有通信容量大、定向性好、保密性及抗干扰能力强等特点. 太赫兹波大气传输特性研究是太赫兹波空间应用的基础, 因此, 太赫兹波大气传输研究备受人们的重视.

沙尘暴是指强风将地面大量尘沙卷入空中使空气特别浑浊, 水平能见度低于 1 km 的天气现象. 我国是世界上沙漠及沙漠化土地比较严重的国家之一, 在我国的西北部, 沙漠最为集中, 沙尘暴天气频繁出现, 沙尘暴天气产生的空中悬浮沙粒对电磁波的吸收和散射不仅会引起信号严重的衰减, 还容易导致信号相位波动、波形畸变、退偏和交叉极化现象, 因此, 沙尘暴天气对电磁波传播具有很大的影响. 国外学者自 20 世纪 40 年代就沙尘暴的物理特性和沙尘暴对无线电传播影响开展了理论研究和实验测量的工作, 不同学者根据不同条件建立了沙尘暴对电磁波的衰减模型<sup>[6-9]</sup>. 我国自 20 世纪 80 年代后期也开始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、陆地和卫星通信线路及对激光与红外信号的影响<sup>[10-14]</sup>. 但在太赫兹波段, 沙尘暴对其传输影响的研究工作报道的还非常少. 李宇晔等<sup>[15]</sup>使用太赫兹时域光谱

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: redlightw@163.com

技术测试了太赫兹脉冲对模拟沙尘的透射特性, 得到不同沙尘条件下太赫兹信号的透射光谱, 结果表明在 0.2—1.0 THz 范围, 透射率随着太赫兹频率的提高而降低; 许文忠等<sup>[16]</sup>理论分析了 3 THz 的太赫兹波在沙尘暴环境中传输的能量损耗, 指出沙尘暴对太赫兹波的衰减要大于对红外光波的衰减, 沙尘能见度较低时必须要考虑多次散射的影响; 董群锋等<sup>[17]</sup>应用 Mie 理论研究了沙尘单次散射对波长分别为 30, 35 和 40 μm 的太赫兹波传输衰减, 结果表明沙尘暴对太赫兹波传播影响明显. 沙尘暴对电磁波的传输影响不仅与频率有关, 还与沙尘的尺度分布、介电系数及沙粒含水量有关, 为进一步研究不同模态沙尘暴及沙粒含水量对太赫兹波的传输影响, 为太赫兹在遥感、雷达、通信及大气环境监测等方面的应用提供基础, 本文以国内沙粒尺度分布不同的六种模态沙尘暴为例, 基于 Mie 散射理论和 Monte Carlo 方法, 分析了多重散射对 1—10 THz 波段的太赫兹波的传输衰减特性. 鉴于 0.1—1 THz 波段的太赫兹波的传输衰减特性与 1—10 THz 波段存在较大差异, 该波段的衰减特性拟另文讨论.

## 2 沙尘粒子对太赫兹波的散射特性

沙尘暴对太赫兹波的传输衰减与单个沙尘粒子的散射特性有关, 悬浮在大气中的沙尘粒子形状虽然不是严格的球形, 但由于粒子形状的随机性和在空间取向的随机性, 大量沙尘粒子在各个方向散射的统计平均结果可等效于球形粒子的散射, 因此, 可用 Mie 理论分析沙尘粒子散射特性. 根据 Mie 散射理论, 单个粒子对入射电磁波的消光效率因子  $Q_e$ 、散射效率因子  $Q_s$  和吸收效率因子  $Q_a$  分别为

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

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

$$Q_a = Q_e - Q_s, \quad (3)$$

式中  $x = 2\pi r/\lambda$ , 其中  $r$  为粒子半径,  $\lambda$  为波长;  $a_n$  和  $b_n$  为 Mie 散射系数, 其计算过程要涉及粒子的复介电系数  $\epsilon$ , 沙尘粒子的复介电系数随含水量和入射波频率而不同, 干沙的复介电系数其实部与频

率无关, 即  $\epsilon'_s = 3$ , 虚部与电磁波频率的关系为<sup>[18]</sup>

$$\epsilon''_s = \begin{cases} 1.8 \times 10^{(2 \lg f - 2.8)}/f, & 0.8 \text{ GHz} \leq f \leq 80 \text{ GHz}, \\ 18.256/f, & f \geq 80 \text{ GHz}. \end{cases} \quad (4)$$

根据以上各式, 选取不同尺寸的干沙粒子, 计算得到了消光效率因子随太赫兹波频率的变化关系, 如图 1 所示. 结果表明: 在太赫兹频率小于 3 THz 时, 较小尺寸的沙尘粒子 ( $D < 20 \mu\text{m}$ ) 对太赫兹波的消光作用较弱, 大尺寸的沙尘粒子其消光作用比较显著; 随太赫兹频率的提高, 小粒子的消光作用逐渐增强, 大粒子的消光效率因子先是快速增大, 而后出现振荡性变化. 图 2 是频率为 1 THz 的太赫兹波 3 个效率因子与沙粒直径的关系, 可以看出, 沙粒的吸收作用很弱, 消光主要是散射作用所致, 直径  $D < 50 \mu\text{m}$  的沙粒对 1 THz 波的消光几乎不起作用, 直径在 200—370 μm 范围的沙尘粒子对 1 THz 波的消光非常显著.

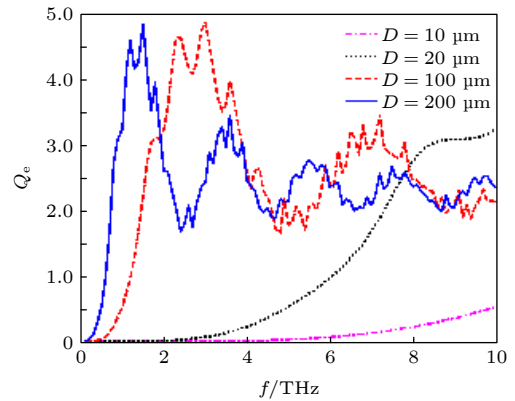


图 1 消光效率因子与频率的关系

Fig. 1. Relationship between extinction efficiency factor and frequency.

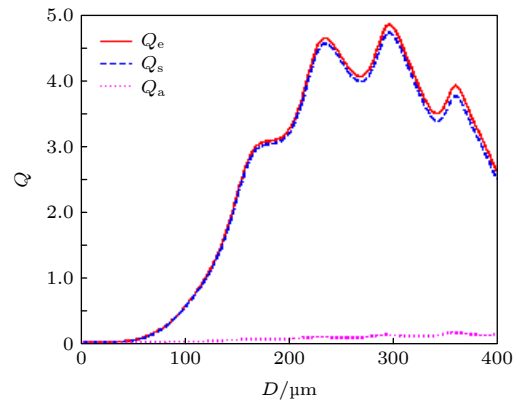


图 2 效率因子与沙粒直径的关系 (1 THz)

Fig. 2. Relationship between efficiency factor and sand diameter (1 THz).

在某些情况下, 沙尘粒子含有水分, 其复介电常数由沙和水的介电系数以及含水量决定, 且随频率变化. 因此, 沙尘粒子的复介电系数是含水量和频率的函数, 其等效值可用下式所示的 Maxwell-Garnett 公式<sup>[19]</sup>来计算:

$$\epsilon_e = \epsilon_s \left[ 1 + \frac{3p(\epsilon_w - \epsilon_s)/(\epsilon_w + 2\epsilon_s)}{1 - p(\epsilon_w - \epsilon_s)/(\epsilon_w + 2\epsilon_s)} \right], \quad (5)$$

式中,  $\epsilon_e$  为湿沙的等效复介电常数;  $\epsilon_s$  和  $\epsilon_w$  分别为干沙和水的复介电常数;  $p$  为含水量的体积百分比数. 本文下面的计算采用文献<sup>[20]</sup>提供的纯水在太赫兹波段的复折射率值.

以 1 THz 波为例, 选取不同尺寸的沙尘粒子, 计算得到消光、散射和吸收效率因子随含水量的变化如图 3 所示. 可以看出: 对于直径 20 和 100  $\mu\text{m}$  的沙尘粒子, 随着含水量的增大, 吸收效率因子和消光效率因子都增大; 而对于  $D = 200 \mu\text{m}$  的大尺寸沙尘粒子, 随着含水量的增大, 吸收效率因子增大, 但散射效率因子减小, 二者综合结果使消光效率因子先缓慢变化, 后基本保持不变; 对于  $D = 250 \mu\text{m}$  的更大尺寸沙尘粒子, 随着含水量的增大, 吸收效率因子虽然增大, 但散射效率因子减小更

多, 二者综合结果使消光效率因子逐渐减小. 因此, 对于确定频率的太赫兹波, 沙尘粒子尺寸不同, 含水量对消光的影响也不同.

### 3 干沙模态沙尘暴对太赫兹波的衰减特性

沙尘暴中含有多种尺度的沙尘粒子, 其粒径一般分布在 0.01—300  $\mu\text{m}$  范围, 粒子尺度分布不同对应沙尘暴模态也不同, 国内外学者通过研究发现可采用对数正态分布函数来描述沙尘粒子的尺度分布, 其表达式为<sup>[21,22]</sup>

$$N(r) = N_0 p(r) = \frac{N_0}{2r\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[\ln(2r) - m_0]^2}{2\sigma^2} \right\}, \quad (6)$$

式中,  $N_0$  是粒子数密度;  $p(r) = N(r)/N_0$  为粒子尺度分布密度函数;  $r$  为沙粒半径;  $m_0$  和  $\sigma$  分别为  $\ln(2r)$  的均值和标准偏差. 本文选取黄土沙、毛乌素沙、腾格里沙、塔克拉玛干沙、甘肃沙及海岸沙六种国内典型沙区的沙尘暴为例进行分析, 其沙粒尺度分布参数的统计结果如表 1 所列<sup>[22]</sup>.

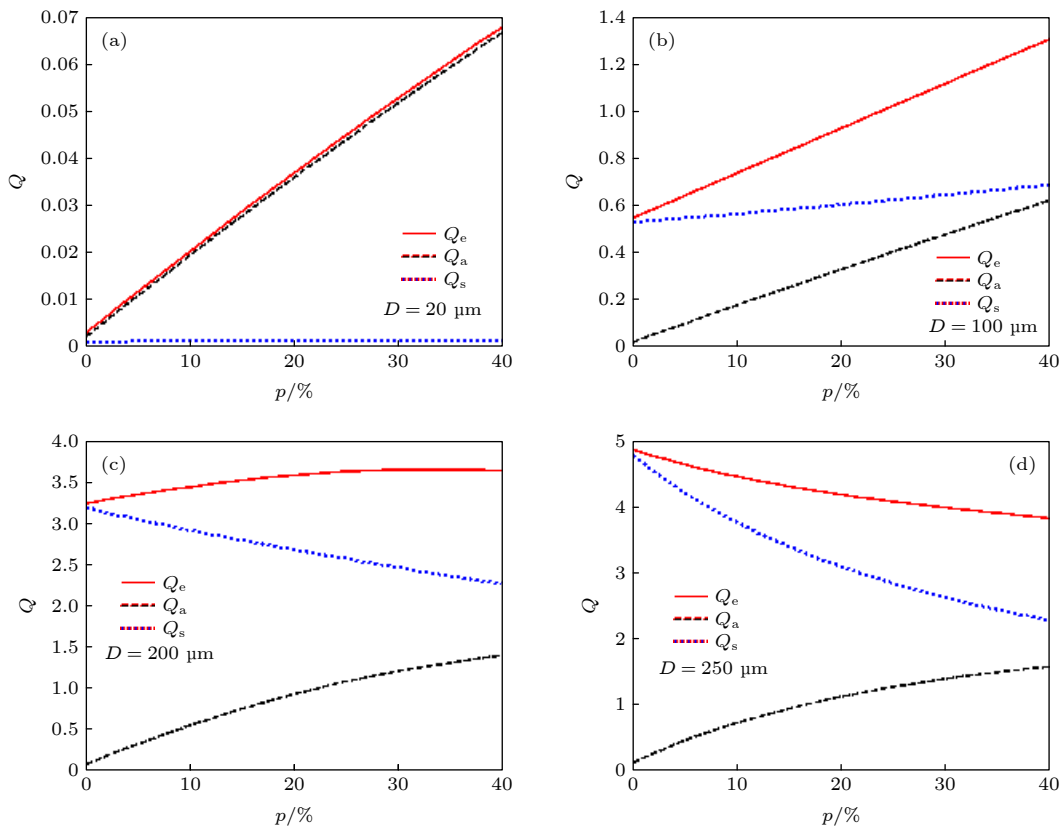


图 3 效率因子与沙粒含水量的关系 (1 THz)

Fig. 3. Relationship between efficiency factor and sand moisture content (1 THz).

表 1 沙粒的尺度分布参数  
Table 1. Size distribution parameters of sand particles.

Sand source	$m_0$	$\sigma$
Loess	-3.08	0.491
Maowusu	-2.96	0.380
Tengger	-2.31	0.296
Taklimakan	-2.26	0.276
Gansu	-2.19	0.279
Coast	-1.83	0.166

沙尘暴群粒子对太赫兹波总的消光是所有尺度粒尘粒子消光共同贡献的结果, 总的消光系数为

$$\mu = \int_0^\infty \pi r^2 Q_e(r) N_0 p(r) dr, \quad (7)$$

式中, 粒子数密度  $N_0$  是一个很难测量的物理量, 人们通常借助于光学能见度  $V_b$  来表示, 二者的关系为<sup>[23]</sup>

$$N_0 = \frac{15}{4.343 \cdot V_b \int_0^\infty 2\pi r^2 p(r) dr}. \quad (8)$$

(7) 式所示的消光系数反映了不同尺度的群粒子对入射波的平均消光作用, 其值与多相群粒子的尺度分布、入射频率及粒子数密度等因素有关.

### 3.1 蒙特卡罗方法

对于较低能见度的沙尘暴天气, 沙粒数密度较大, 多重散射现象显著, 对衰减结果产生的影响不可忽略. 对于存在多重散射的辐射传输问题, 人们已提出了多种研究方法, 其中蒙特卡罗法<sup>[24-27]</sup>是以概率模型为基础, 用随机数和概率统计方法研究电磁波在随机分布介质中的传输问题, 其基本思想是把电磁辐射看成由很多光子组成的光子束, 电磁辐射的传输问题就转化为光子的传输问题, 只要光子数取足够多, 通过对每个光子的跟踪, 就能比较准确地模拟随机介质的多重散射问题. 本文在利用 Mie 散射理论计算出消光参量的基础上, 进一步根据蒙特卡罗方法分析太赫兹波在沙尘暴中的多重散射传输衰减问题.

利用加权蒙特卡罗方法求太赫兹波在沙尘暴中的传输衰减主要步骤如下.

#### 1) 光子初始状态

设光子从坐标原点沿  $z$  轴方向垂直入射到厚度为  $H$  的沙尘暴中, 任意时刻的位置用  $(x, y, z)$

表示, 运动方向由方向余弦  $(\mu_x, \mu_y, \mu_z)$  表示, 每一步的运动步长用  $L$  表示,  $\theta$  和  $\varphi$  分别表示散射后光子运动方向的散射角和方位角, 光子的初始状态为

$$\begin{aligned} x = y = z = 0, \\ \mu_x = \mu_y = \mu_z = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

#### 2) 光子运动步长

光子运动步长是基于对光子自由程概率分布抽样的基础上确定的. 根据消光系数的定义, 可以得到自由程的抽样函数为

$$L = -\frac{1}{\mu} \ln \xi, \quad (10)$$

其中  $\xi$  表示  $(0, 1)$  上均匀分布的随机数,  $\mu$  是由 (7) 式所确定的消光系数.

#### 3) 光子的吸收

当光子在沙尘暴中传输时, 由于吸收作用而使光子的权重减小. 初始权重设为  $W_0 = 1$ , 每次光子与沙粒碰撞后, 权重变为

$$W_i = W_{i-1} \cdot \omega, \quad (11)$$

其中  $W_{i-1}$  是第  $i$  次碰撞前的权重;  $W_i$  是第  $i$  次碰撞后的权重;  $\omega$  为多相粒子群单次散射平均反照率, 反映了散射作用在消光中所占比重, 其值与多相粒子群的尺度分布有关, 计算式为

$$\omega = \frac{\int_0^\infty \pi r^2 Q_s(r) N_0 p(r) dr}{\int_0^\infty \pi r^2 Q_e(r) N_0 p(r) dr}. \quad (12)$$

#### 4) 光子的散射方向

根据 Henyey-Greenstein 散射相函数可得光子在某点与沙尘粒子碰撞后散射角  $\theta$  的抽样值为<sup>[28]</sup>

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{2g} \left[ (1+g)^2 - \left( \frac{1-g^2}{1-g+2g\xi} \right)^2 \right] \right\}, \quad (13)$$

其中  $g$  为不对称因子, 反映了散射的各向异性程度, 可根据 Mie 散射理论和群粒子的尺度分布函数求得

$$g = \frac{\int_0^\infty \pi r^2 Q_s(r) g(r) N_0 p(r) dr}{\int_0^\infty \pi r^2 Q_s(r) N_0 p(r) dr}. \quad (14)$$

光子散射方位角  $\varphi$  可认为在  $(0, 2\pi)$  内均匀分布, 其抽样值为

$$\phi = 2\pi\xi. \quad (15)$$

光子的方向余弦  $(\mu'_x, \mu'_y, \mu'_z)$  可通过坐标变换得到

$$\begin{aligned} \mu'_x &= \frac{\sin \theta}{\sqrt{1 - \mu_z^2}} (\mu_x \mu_z \cos \phi - \mu_y \sin \phi) + \mu_x \cos \theta, \\ \mu'_y &= \frac{\sin \theta}{\sqrt{1 - \mu_z^2}} (\mu_x \mu_z \cos \phi + \mu_x \sin \phi) + \mu_y \cos \theta, \\ \mu'_z &= -\sin \theta \cos \phi \sqrt{1 - \mu_z^2} + \mu_x \cos \theta. \end{aligned} \quad (16)$$

5) 跟踪终止条件

光子与沙粒碰撞后在介质中的新坐标位置可根据方向余弦和运动步长求得

$$x' = x + \mu'_x L, \quad y' = y + \mu'_y L, \quad z' = z + \mu'_z L. \quad (17)$$

如果光子所在位置  $z' < 0$  或  $z' > H$ , 则表示光子从沙尘暴中逃逸出去, 上述跟踪过程结束; 如果光子的权重因子  $W$  小于设定的阈值 (本文取  $10^{-6}$ ), 则表示光子被吸收, 跟踪过程也结束; 如果光子既没被吸收, 也没逃逸出去, 重复上述步骤, 直至光子到达接受界面为止.

6) 衰减率统计

跟踪  $N$  个光子 (取  $N = 10^6$ ), 则平均透过率的估值为

$$T = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^m W_n, \quad (18)$$

式中,  $W_n$  为第  $n$  个出射光子的权重,  $m$  为出射光子的数目.

根据透射率  $T$ , 可求出太赫兹波在沙尘暴中传播单位距离的衰减率为

$$A = -\frac{10}{H} \log T. \quad (19)$$

3.2 干沙模态沙尘暴对太赫兹波衰减与频率的关系

根据以上分析, 选取能见度  $V_b = 1$  km, 频率范围  $f$  为 1—10 THz, 对每一模态的沙尘暴, 首先根据 (6) 式、(8) 式和表 1 计算出沙尘粒子数密度  $N_0$ , 再根据 Mie 理论和 (7) 式、(12) 式和 (14) 式分别计算出不同频率相应的消光系数  $\mu$ 、反照率  $\omega$  及不对称因子  $g$ . 积分计算时, 取沙粒半径  $r$  的范围为 0.1—150  $\mu\text{m}$ , 半径间隔  $dr = 0.3 \mu\text{m}$ . 从计算式可以看出, 3 个消光参量与群粒子尺度分布密度函数  $p$  密切相关, 对于同一频率的太赫兹波, 由于不同模态的沙尘暴群粒子尺度分布不同, 3 个消光参量必然不同. 图 4(a)、图 4(b) 和图 4(c) 是基于 Mie 散射理论及沙粒尺度分布函数计算得到的不同模态沙尘暴的 3 个消光参量随太赫兹波频率的

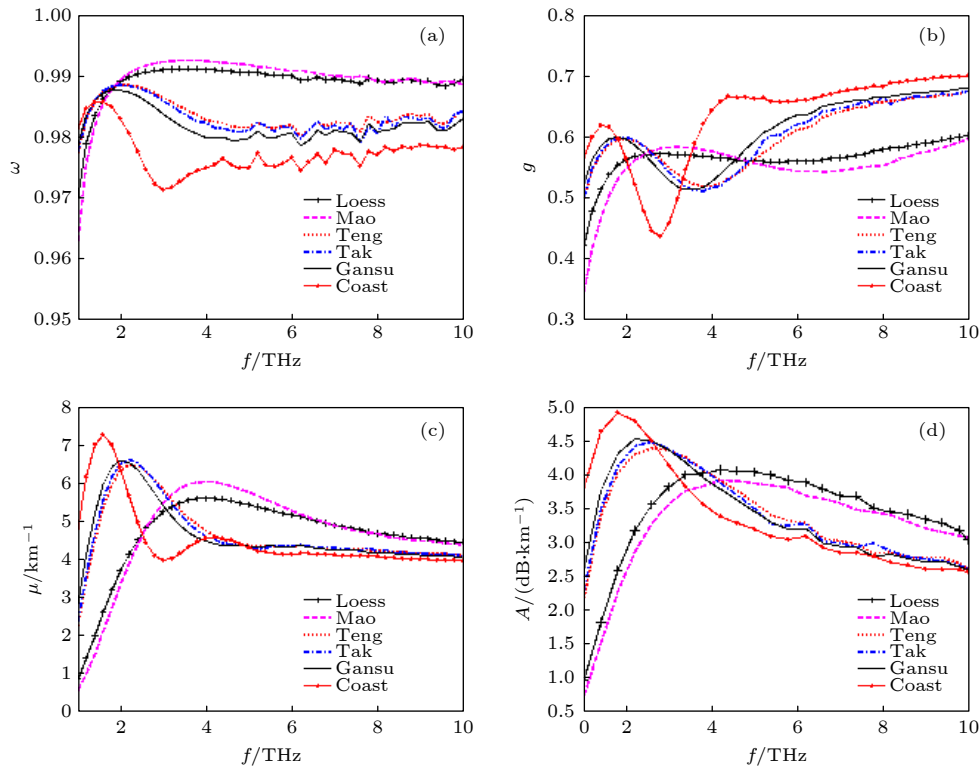


图 4 六种干沙模态沙尘暴对太赫兹波的衰减与频率的关系 (a)  $\omega$  vs.  $f$ ; (b)  $g$  vs.  $f$ ; (c)  $\mu$  vs.  $f$ ; (d)  $A$  vs.  $f$ .

Fig. 4. Relationship of THz wave attenuation caused by six dry sand and dust storms to frequency: (a)  $\omega$  vs.  $f$ ; (b)  $g$  vs.  $f$ ; (c)  $\mu$  vs.  $f$ ; (d)  $A$  vs.  $f$ .

变化情况, 图 4(d) 是基于蒙特卡罗方法计算得到的衰减率  $A$  随太赫兹波频率的变化情况, 计算时取光子数  $N = 10^6$ .

图 4(a) 表明六种干沙模态沙尘暴对 THz 波散射反照率都比较高 ( $\omega > 0.96$ ), 说明散射远强于吸收, 消光主要是散射作用导致的结果; 比较图 4(c) 和图 4(d) 可以看出, 消光系数  $\mu$  和衰减率  $A$  随 THz 波频率的变化情况不完全一致, 这是因为前者仅反映单次散射的消光情况, 后者则是反映多次散射的衰减. 在沙尘暴这种粒子浓度比较大的天气环境中, 多次散射现象比较显著, 如果不考虑多次散射, 仅依据单次散射进行计算, 结果会出现比较大的偏差 [14,25,26]. 因此, 图 4(d) 反映多重散射的蒙特卡罗方法计算结果更接近沙尘暴对太赫兹波传输衰减的真实情况.

从图 4(d) 可以看出: 六种干沙模态沙尘暴对 1—10 THz 波段的太赫兹波衰减率都是随频率的变化先增加后减小; 在 1—2.5 THz 波段, 衰减率随 THz 波频率的增大变化非常显著, 相对而言, 该频段海岸沙尘暴相应的衰减率最大, 甘肃、塔克拉玛干及腾格里沙尘暴的衰减次之, 毛乌素和黄土沙尘暴的衰减相对最小; 而在 4.2—10 THz 高频波段, 衰减率随太赫兹波频率的增加非常缓慢地减小, 在该波段毛乌素和黄土沙尘暴的衰减率大于另外四种模态沙尘暴的衰减率, 相对而言, 海岸沙尘暴的衰减率最小. 各模态沙尘暴对太赫兹波衰减最强的频段有所不同, 海岸沙尘暴的最强衰减频率范围为 1—3.2 THz, 甘肃、塔克拉玛干及腾格里沙尘暴的最强衰减大致是在 1.6—4.2 THz 范围; 毛乌素和黄土沙尘暴对 3—7 THz 频段内的太赫兹波都有较强的衰减.

根据 Mie 散射理论可知, 粒子对波长比较接近自身尺度的入射波散射较强. 沙尘暴模态不同, 对太赫兹波衰减最强的频段也不同, 其主要原因是沙尘群粒子的尺度分布不同所致. 根据表 1 所列的沙粒的尺度分布参数可知, 黄土和毛乌素沙尘粒子的尺度分布比较接近, 大多数粒子直径在 30—70  $\mu\text{m}$  范围, 在六种模态中, 这两种沙尘粒子的尺度相对最小, 故相应强衰减的入射波的波长最小, 频率最高; 腾格里、塔克拉玛干及甘肃沙粒的尺度分布比较接近, 多数粒子直径分布在 80—130  $\mu\text{m}$  之间, 明显大于黄土和毛乌素沙尘粒子的粒径, 故这三种模式的沙尘暴强衰减的入射波波长大于前两种; 相

对而言, 海岸沙粒的尺寸最大, 多数粒子直径在 130—180  $\mu\text{m}$  范围, 因此, 强衰减的入射波波长相对最长, 频率相对最低.

## 4 湿沙模态沙尘暴对太赫兹波的衰减特性

对于黄土和海岸沙尘暴, 由于沙源靠近水系, 沙尘粒子中常含有水分, 本节分析 THz 波在含有水分的湿沙模态沙尘暴中的传输衰减情况.

### 4.1 衰减率与含水量的关系

选取频率分别为 1, 2, 3, 5 和 8 THz 的太赫兹波, 在 19  $^{\circ}\text{C}$  时, 水在这些频率处的复介电系数分别为  $4.06 + i2.26$ ,  $3.70 + i1.66$ ,  $3.53 + i1.69$ ,  $2.68 + i1.81$  和  $2.25 + i0.94$  [20], 首先根据 (5) 式计算不同含水量的湿沙粒子的等效复介电系数, 其余计算过程与第 3 节干沙模态类同. 在能见度  $V_b = 1 \text{ km}$  的条件下, 计算得到两种湿沙模态沙尘暴对几种太赫兹波的消光参量、衰减率与沙粒含水量的关系如图 5 和图 6 所示.

从图 5(a) 和图 6(a) 可以看出, 两种沙尘暴对各频率太赫兹波的散射反照率  $\omega$  随沙粒含水量的增大而减小, 这是由于吸收作用随含水量的增大而增加的缘故.

图 5(c) 说明, 对于黄土沙尘暴, 1 和 2 THz 波消光系数随含水量增大略有增大, 8 THz 波消光系数对含水量不敏感, 3 和 5 THz 波消光系数随含水量增大而略有减小, 这是由于尽管沙粒群的吸收作用随含水量增加而加强了, 但散射作用减弱, 导致总的消光系数减小. 从蒙特卡罗方法计算的图 5(d) 结果可以看出: 1, 2 及 3 THz 波衰减率随含水量增大而显著增大; 对于高频的 5 和 8 THz 波, 含水量小于 5% 时, 衰减率随含水量增大而显著增大, 当含水量大于 15% 时, 衰减率随含水量增大变化减缓.

图 6(c) 说明, 对于海岸沙尘暴, 1 和 3 THz 波消光系数随含水量增大略有增大, 5 和 8 THz 波消光系数对含水量不敏感, 2 THz 波消光系数随含水量增大而明显减小. 图 6(d) 所示的蒙特卡罗方法计算结果表明: 含水量小于 5% 时, 各频率太赫兹波的衰减率随含水量增大都显著增大; 在含水量大于 15% 时, 频率越高, 其衰减率随含水量增大变化越缓慢.

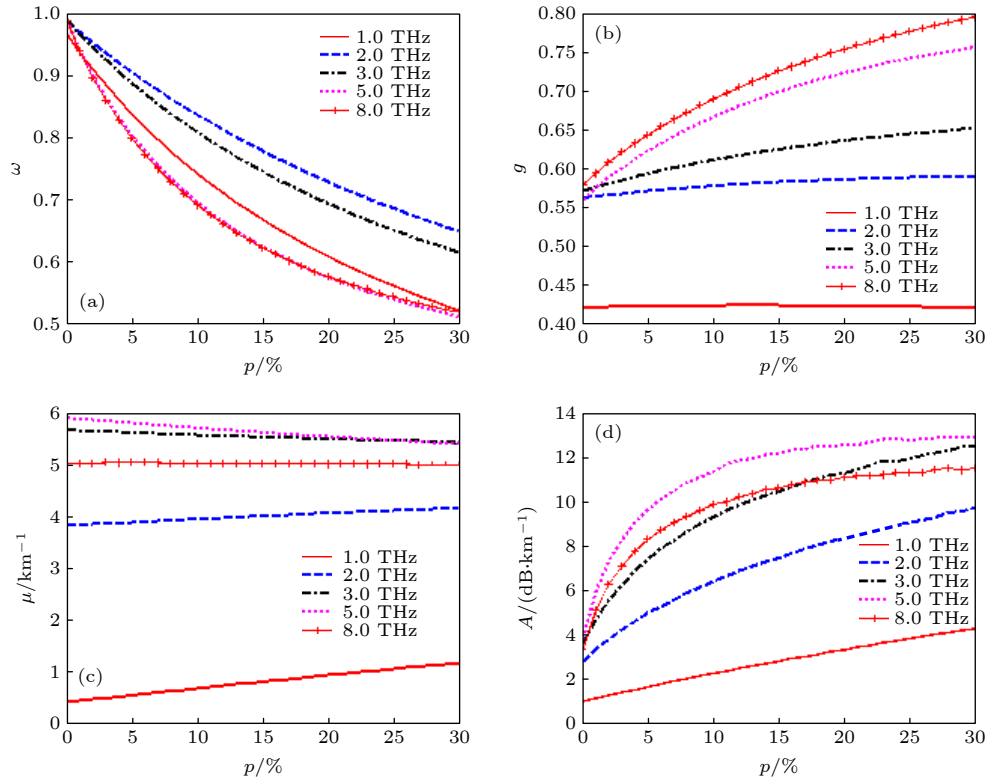


图 5 黄土沙尘暴对太赫兹波的衰减与含水量的关系 (a)  $\omega$  vs.  $p$ ; (b)  $g$  vs.  $p$ ; (c)  $\mu$  vs.  $p$ ; (d)  $A$  vs.  $p$

Fig. 5. Relationship between THz wave attenuation and water content of loess sand and dust storms: (a)  $\omega$  vs.  $p$ ; (b)  $g$  vs.  $p$ ; (c)  $\mu$  vs.  $p$ ; (d)  $A$  vs.  $p$ .

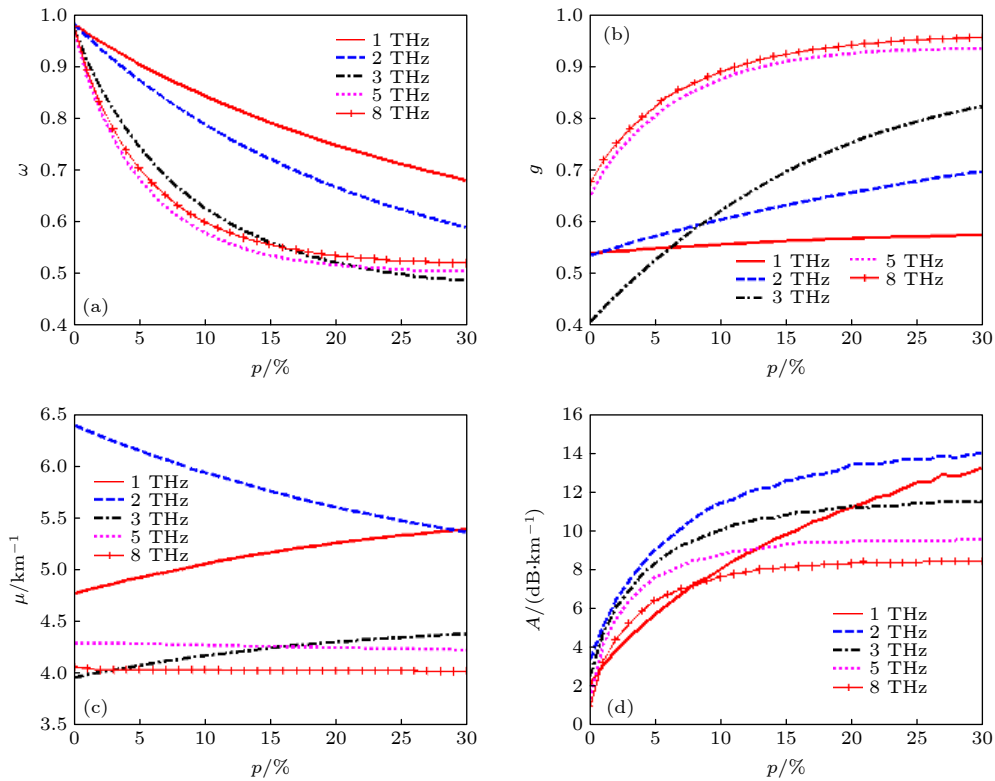


图 6 海岸沙尘暴对太赫兹波的衰减与含水量的关系 (a)  $\omega$  vs.  $p$ ; (b)  $g$  vs.  $p$ ; (c)  $\mu$  vs.  $p$ ; (d)  $A$  vs.  $p$

Fig. 6. Relationship between THz wave attenuation and water content of coastal sand and dust storms: (a)  $\omega$  vs.  $p$ ; (b)  $g$  vs.  $p$ ; (c)  $\mu$  vs.  $p$ ; (d)  $A$  vs.  $p$ .

### 4.2 衰减率与频率的关系

在能见度  $V_b = 1 \text{ km}$  的条件下, 选取 1—10 THz 范围的太赫兹波频率, 采用与上类同的方法, 计算得到含水量不同时 (5%, 10%, 20%, 30%), 两种湿沙模态沙尘暴对太赫兹波消光参量、衰减率与频率的关系如图 7 和图 8 所示, 为了与干沙相比较, 还同时在图中呈现了干沙 (0%) 的计算结果.

从图 7(a) 和图 8(a) 可以看出, 湿沙模态沙尘暴的反照率随频率的增大呈波浪式变化, 其值明显小于干沙模态沙尘暴的反照率, 说明湿沙模态沙尘暴的消光效应是散射和吸收共同作用的结果, 而干沙模态沙尘暴的消光效应是散射作用的结果, 沙尘粒子含水量越高, 反照率越小, 吸收作用越强.

图 7(d) 和图 8(d) 表明: 不同含水量时两种湿沙模态沙尘暴对太赫兹波的衰减率都是随频率增大先增大而后逐渐减小, 随含水量增大, 衰减强的频段向低频方向移动; 此外, 还可以看出, 当频率大于 5 THz 时, 20% 和 30% 的两条曲线比较接近, 进一步说明沙尘暴对高频段的太赫兹波 ( $> 5 \text{ THz}$ ) 衰减随含水量的进一步增大变化减缓.

### 5 结论

沙尘暴的沙粒尺度与太赫兹波的波长比较接近, 因此, 沙尘暴天气对太赫兹波的传输必然产生很大的影响. 本文选取国内粒径尺度分布不同的六种模态的沙尘暴, 应用 Mie 散射理论和 Monte Carlo 方法, 分析了沙尘暴对 1—10 THz 频段太赫兹波的衰减特性. 文中计算的同种模态沙尘暴的消光系数和衰减率随频率和含水量的变化不完全一致, 说明在沙尘暴这种粒子浓度比较大的天气环境中, 多次散射现象比较显著, 用 Monte Carlo 方法计算的多重散射衰减率比消光系数更能真实反映沙尘暴对太赫兹波的传输衰减影响.

通过数值计算, 给出了六种干沙模态沙尘暴对太赫兹波的消光参量和衰减率与频率的关系. 结果显示, 各干沙模态散射反照率都很高, 消光主要是散射作用所致. 在 1—2 THz 波段, 衰减率随太赫兹波频率的增大而增强, 而在 4.2—10 THz 高频波段, 衰减率随太赫兹波频率的增加非常缓慢地减小, 各模态沙尘暴的沙粒尺度分布不同, 其衰减率较强的频段范围也不同, 干沙模态的海岸沙尘暴其

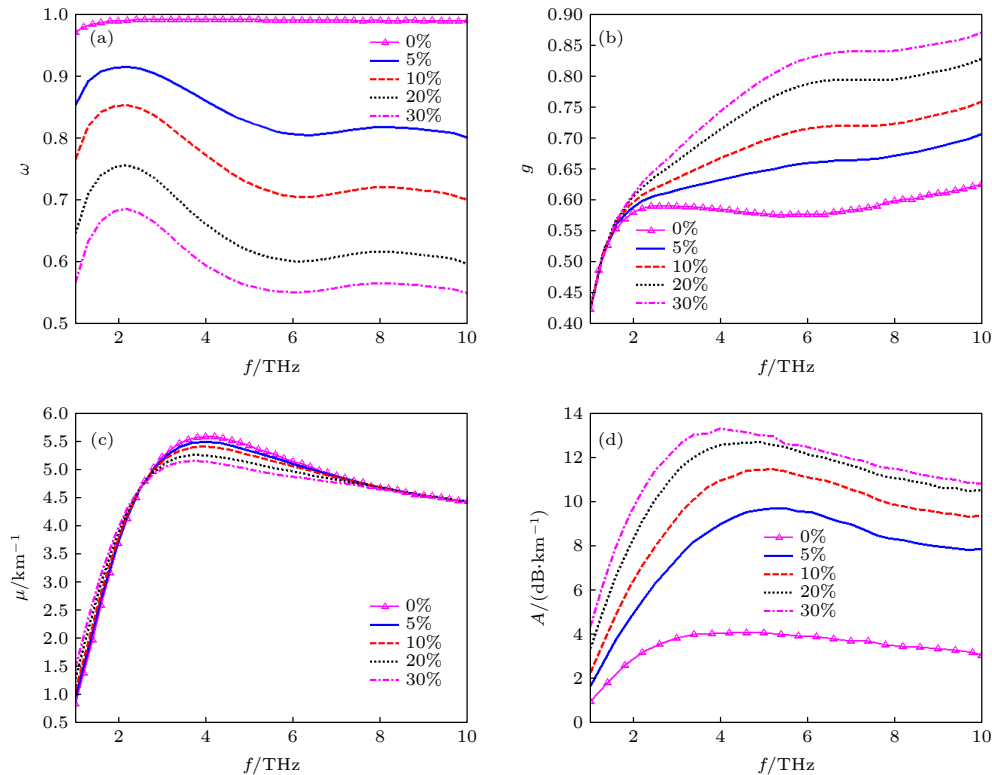


图 7 不同含水量的黄土沙尘暴对太赫兹波的衰减与频率的关系 (a)  $\omega$  vs.  $f$ ; (b)  $g$  vs.  $f$ ; (c)  $\mu$  vs.  $f$ ; (d)  $A$  vs.  $f$ .

Fig. 7. Relationship of THz wave attenuation caused by loess sand and dust storms with different water content to frequency: (a)  $\omega$  vs.  $f$ ; (b)  $g$  vs.  $f$ ; (c)  $\mu$  vs.  $f$ ; (d)  $A$  vs.  $f$ .

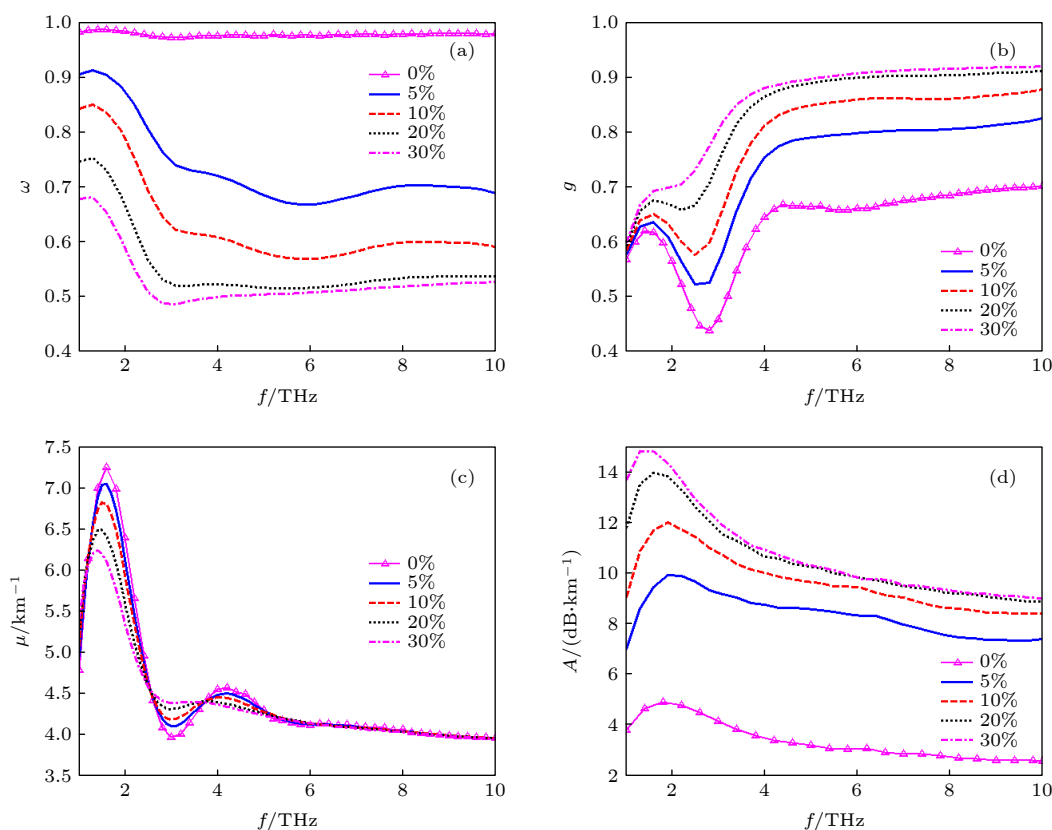


图 8 不同含水量的海岸沙尘暴对太赫兹波的衰减与频率的关系 (a)  $\omega$  vs.  $p$ ; (b)  $g$  vs.  $p$ ; (c)  $\mu$  vs.  $p$ ; (d)  $A$  vs.  $p$

Fig. 8. Relationship between THz wave attenuation caused by coastal sand and dust storms with different water content to frequency: (a)  $\omega$  vs.  $p$ ; (b)  $g$  vs.  $p$ ; (c)  $\mu$  vs.  $p$ ; (d)  $A$  vs.  $p$ .

沙粒尺寸相对较大, 对 1—3.2 THz 频段的太赫兹波有较强的衰减, 甘肃、塔克拉玛干及腾格里三种沙尘暴的沙粒尺寸分布比较一致, 衰减较强的频段是在 1.6—4.2 THz 范围, 而毛乌素和黄土沙尘暴其沙粒尺寸相对较小, 对 3—7.0 THz 频段内的太赫兹波衰减较强. 因此, 根据不同模式的沙尘暴天气对太赫兹波的衰减规律, 在不同地区可避开强衰减的太赫兹波频段, 选用低衰减的工作频段.

分析了两种湿沙模态沙尘暴含水量对太赫兹波的消光参量和衰减率的影响, 并和干沙模态沙尘暴的计算结果进行了比较. 结果显示, 湿沙模态沙尘暴的反照率明显小于相同尺度分布的干沙模态沙尘暴的反照率, 消光是散射和吸收共同作用的结果, 吸收作用随含水量的增大而增强. 太赫兹波频率不同, 含水量对衰减率的影响也不同, 随沙粒含水量增大, 湿沙模态沙尘暴强衰减频段向低频方向移动. 含水量小于 5% 时, 衰减率随含水量增大而显著增大, 当含水量大于 15% 时, 高频段的太赫兹波衰减率随含水量的进一步增大变化减缓; 相对而言, 湿沙模态沙尘暴比干沙模态沙尘暴对太赫兹波

传播的衰减影响更为显著.

### 参考文献

- [1] Sariieddeen H, Alouini M S, Al-Naffouri T Y 2019 *IEEE J. Sel. Areas Commun.* **37** 2040
- [2] Chong H, Yi C 2018 *IEEE Commun. Mag.* **56** 96
- [3] Jiang Y, Deng B, Wang H 2016 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **28** 1684
- [4] Hu B B, Nuss M C 1995 *Opt. Lett.* **20** 1716
- [5] Mellinger J S, Yang Y, Mandehgar M 2012 *Opt. Express* **20** 6788
- [6] Elsheikh E A A, Islam M R, Habaebi M H 2017 *IEEE Trans. Anten. Propag.* **65** 4200
- [7] Chen H Y, Ku C C 2011 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **10** 469
- [8] Chiou M M, Kiang J F 2016 *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* **13** 1
- [9] Chu T S 2013 *Bell Labs Tech. J.* **58** 549
- [10] Li X C, Gao X, Wang J 2019 *Chin. Phys. B* **28** 34208
- [11] Dong Q F, Li Y L, Xu J D, Zhang H, Wang M J 2013 *IEEE Trans. Anten. Propag.* **61** 910
- [12] Wu Zh S, You J G, Yang R K 2004 *Chin. J. Las.* **31** 1075 (in Chinese) [吴振森, 由金光, 杨瑞科 2004 *中国激光* **31** 1075]
- [13] Wang H X, Sun H H, Zhang Q H 2020 *Infrared Laser Eng.* **49** 20201022 (in Chinese) [王红霞, 孙红辉, 张清华 2020 *红外与激光工程* **49** 20201022]
- [14] Yang R K, Li Q Q, Yao R H 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 094205

- (in Chinese) [杨瑞科, 李茜茜, 姚荣辉 2016 物理学报 **65** 094205]
- [15] Li Y H, Wang H K, Zhang P 2008 *Laser Infr.* **9** 921 (in Chinese) [李宇晔, 王新柯, 张平 2008 激光与红外 **9** 921]
- [16] Xu W Z, Zhong K, Mei J L 2015 *Infrared Laser Eng.* **44** 523 (in Chinese) [许文忠, 钟凯, 梅嘉林 2015 红外与激光工程 **44** 523]
- [17] Dong Q F, Guo L X, Li Y L, Wang M J 2018 *J. Terahertz Sci. Electron. Inf. Technol.* **16** 599 (in Chinese) [董群锋, 郭立新, 李应乐, 王明军 2018 太赫兹科学与电子信息学报 **16** 599]
- [18] Zhou W, Zhong D F, Hou D T 2005 *High Pow. Las. Part. Beam.* **17** 1259 (in Chinese) [周旺, 周东方, 侯德亭 2005 强激光与粒子束 **17** 1259]
- [19] Sihvola A H, Kong J A 1988 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **26** 420
- [20] Liebe H J, Hufford G A, Manabe T 1991 *Int. J. Infrared Millimeter Waves* **12** 659
- [21] Ahmed A S 1987 *IEE Proc. H* **134** 55
- [22] Dong Q S 1997 *Chin. J. Radio Sci.* **12** 15 (in Chinese) [董庆生 1997 电波科学学报 **12** 15]
- [23] Ansari A J, Evans B G 1982 *IEE Proc. F* **129** 315
- [24] Seyoung M, Dongyun K, Eunji S 2008 *Appl. Opt.* **47** 336
- [25] 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, 李爱君 2013 物理学报 **62** 024214]
- [26] Gao Z W, Zhou Y H, Zheng X J 2008 *Sci. Chin. Ser. G* **38** 955 (in Chinese) [高志文, 周又和, 郑晓静 2008 中国科学 G 辑 **38** 955]
- [27] Prahl S A, Keijzer M, Jacques S L 1989 *SPIE Proceedings IS* **5** 102
- [28] Binzoni T, Leung T S, Gandjbakhche A H 2006 *Phys. Med. Biol.* **51** 313

## Analysis of terahertz wave attenuated by sand and dust storms with different modes

Wang Hong-Xia<sup>†</sup> Zhang Qing-Hua Hou Wei-Jun Wei Yi-Wei

(Basic Department, Rocket Force Engineering University, Xi'an 710025, China)

(Received 24 August 2020; revised manuscript received 18 October 2020)

### Abstract

The research on space transmission characteristics of terahertz wave is of great significance for the application of terahertz wave in space. In order to study the transmission characteristics of terahertz wave in sand and dust storm weather, according to the lognormal distribution of dust particle sizes, Mie scattering theory and Monte Carlo method are used to analyze the attenuation characteristics of six dry sand modes of sand and dust storm in different regions of China in a frequency band of 1–10 THz, and the relationship of the extinction parameters and attenuation rate to the frequency is given. The results show that with the increase of frequency, the attenuation rate of 1–10 THz terahertz wave first increases and then decreases. Different mode of sand and dust storm leads to different frequency range of strong attenuation of terahertz wave. In order to analyze the influence of sand dust particle moisture content on terahertz wave propagation attenuation, the relationship of three efficiency factors to water content of sand dust particles with different sizes is calculated. The results show that the influence of water content on extinction is different from that of the particle size. Monte Carlo method is used to calculate the attenuation of terahertz wave by sand and dust storm in two kinds of wet sand modes, and the relationship of the attenuation rate and water content to the frequency is given, the results are compared with those from the dry sand mode, showing that the albedo of wet sand mode is obviously lower than that of dry sand mode with the same size distribution. The absorption of wet sand particles increases with water content increasing. The extinction of wet sand and dust storm results from scattering and absorption. With the increase of water content in sand particles, the frequency band with strong attenuation of terahertz wave by wet sand and dust storm moves toward low frequency. When the water content is less than 5%, the attenuation rate of terahertz wave increases significantly with the increase of water content. Sand and dust storms with higher humidity have a greater influence on the transmission attenuation of terahertz wave.

**Keywords:** terahertz wave, sand and dust storm, Monte Carlo, attenuation rate

**PACS:** 41.20.Jb, 92.60.Qx, 42.68.Jg, 87.55.K-

**DOI:** 10.7498/aps.70.20201393

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [redlightw@163.com](mailto:redlightw@163.com)