

弱沙尘环境中太赫兹波的散射与传输特性研究

汪加洁¹, 张明¹, 史怡雯², 姜婷², 徐强¹, 韩一平¹

(1. 西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;

2. 西安电子科技大学通信工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要:基于 HITRAN2012 数据库,采用三次样条插值算法给出了太赫兹波段沙尘颗粒的复折射率随电磁波频率的变化曲线。采用 Mie 散射理论,分析了不同粒径沙尘颗粒对太赫兹波的散射及消光特性。基于单次散射假定,研究了太赫兹波在浮尘、扬沙等弱沙尘环境中的散射与传输特性,考虑不同条件下沙尘粒子的谱分布,分析了入射频率、粒径分布等因素对散射及衰减特性的影响。结果表明:在 1 THz~4 THz 太赫兹波段,单个沙尘粒子的散射及消光特性分布主要由粒子的尺寸参数决定。对于尺寸较小的沙尘粒子,后向散射系数随着尺寸的增加而增大。当粒子尺寸较大处于 Mie 振荡区时,后向散射系数起伏变化较大。在浮沉和弱沙尘两种天气条件下,沙尘粒子群的统计消光系数随着入射频率的增大具有相似的增大趋势。本文研究结果对太赫兹波技术在应急通信、大气环境监测、风沙探测等相关领域中的应用具有参考价值。

关键词:太赫兹波;沙尘颗粒;单次散射;散射与传输特性;Mie 散射理论

中图分类号: O436.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2021.06.018

Research of scattering and propagation characteristic of terahertz wave in weak sand dust atmosphere

WANG Jia-jie¹, ZHANG Ming¹, SHI Yi-wen², JIANG Ting², XU Qiang¹, HAN Yi-ping¹

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Based on the HITRAN2012 database, the variation of complex refractive index of sand dust in the terahertz bands was obtained by using the method of cubic spline interpolation. Using the Mie theory, scattering properties of sand particle with different sizes illuminated by the terahertz wave were analyzed. Propagation characteristic of terahertz wave in weak sand dust atmosphere condition was investigated, where only single scattering effect was considered due to the low volume ratio of the particles. The results show that the scattering intensity distributions of the sand particle in the range of 1 THz to 4 THz depend mainly on the size parameter of the sand particle. For small particles, the backscattering efficiency increases monotonically with the increase of the size parameter. While big oscillation was found for particle with large size parameter. In different sand atmosphere conditions characterized using different size distributions of sand dust, the statistic extinction efficiency increases as the increase of the frequency. This paper provides useful reference for the application of terahertz wave in emergence communication, atmosphere monitor, and detection of sands.

Keywords: terahertz wave; sand dust; single scattering; scattering and propagation properties; Mie theory

基金项目: 博士后基金项目 (No. 2015M582609); 国家自然科学基金项目 (No. 61975158) 资助。

作者简介: 汪加洁 (1985 -), 男, 副教授, 主要从事复杂粒子及粒子体系对电磁波/光波的散射与传输特性研究。

E-mail: wangjiajie@xidian.edu.cn

收稿日期: 2020-09-20; **修订日期:** 2020-10-28

1 引言

随着太赫兹波波源、太赫兹探测器、调制器等研制的快速发展,太赫兹技术在雷达、无线通讯、大气环境监测、无伤探测等多个领域展现出广阔的应用前景,近年来得到越来越多的关注和持续的科研投入。在通信方面,与微波波段相比,太赫兹波段具有更大的带宽,传输效率更高,可以进一步提升现有的微波通信能力。樊勇等人^[1]构建了 220 GHz 无线通信实验验证系统,在太赫兹频段成功进行了高速无线数据传输实验。目前已有报道支持 10 Gbps 的数据传输^[2]。与光学波段相比,太赫兹波波长更长,在传输过程中由气溶胶颗粒造成的散射损失更少,可以在沙尘、灰尘、烟雾、等离子体等特殊条件下进行通信,是解决超高速飞行器大气飞行过程中通信黑障问题的方案之一^[3]。此外,与激光通信相比,其波束宽度适中,对平台稳定性和跟瞄要求较低,大气对太赫兹波的吸收较强,有利于实现空间保密通信。太赫兹作为光通信的有效备用应急手段,其硬件加工也更加方便,不必转换光通信的不同硬件装置。可以说,太赫兹在一定条件下集成了微波通信与光通信的优点,是未来无线通信的重要手段^[4]。

太赫兹波在在大气环境中传输时,来自于水分子的吸收是造成信号衰减的主要原因^[5]。邓琥等人^[6]采用太赫兹时域光谱技术,分析了在不同行程、不同湿度条件下的太赫兹波在水蒸汽中的传输特性。王玉文、董志伟等人^[7]建立了太赫兹波大气传输衰减模型,并考察了相对湿度对太赫兹波大气传输衰减特性的影响。崔海霞^[8]给出了在太赫兹时域光谱下大气传输的方案设计。除了大气吸收外,大气气溶胶颗粒对太赫兹波的散射和吸收是需要考虑的另外一个重要因素。特别对于中国广袤的西北区域,大气环境中包含了沙粒、煤烟粒子、氮化合物、灰尘、硫化物等多种离散随机介质,其中以沙尘颗粒居多。当有扬沙、浮尘天气发生时,直径大于 2.0 μm 的粒子比清洁大气时要增加 20 ~ 30 倍,当发生沙尘暴天气时大粒子所占的比例会更高^[9],太赫兹波的波长范围在 30 μm ~ 3 mm 之间,这与大气气溶胶中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必须考虑沙尘粒子的散射和吸收造成的消光影响^[10]。许文忠等人^[10]采用蒙特卡洛方法对太赫兹在沙尘中的多次散射特性进行了模拟仿真,得出在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时的结论。

目前关于沙尘颗粒对太赫兹波的散射和传输特性研究大多数都是针对特定几个太赫兹波长或频率进行的分析,缺乏对于太赫兹波段宽频带在沙尘环境中散射与传输特性的较为系统的研究。本文基于 HITRAN2012 数据库^[11]给出的有限数据点,采用插值算法给出了频率在 1 THz ~ 4 THz 波段太赫兹波沙尘颗粒的复折射率随频率的变化曲线。基于 Mie 散射理论,研究了太赫兹波在浮尘、扬沙等弱沙尘环境中的散射与传输特性,分析了波长、尺寸参数等因素对散射信号的影响。考虑沙尘粒子谱分布,分析了太赫兹信号在弱沙尘环境中不同粒子谱下的衰减特性。

2 Mie 散射理论

当空气中悬浮的颗粒的体积浓度低于 0.01 % 时,每个粒子对光波的散射可以近似为独立于其他粒子进行的,即只需考虑单次散射,比如我国北方常见的弱沙尘天气就属于这种情况。气溶胶粒子的实际形状复杂,将粒子等效为球形,采用等效球形粒径大小加以度量是个较为有效的办法^[9]。本文基于球形粒子单次散射假定,采用 Mie 散射理论分析弱沙尘环境下粒子对太赫兹波的散射特性。

在粒子与电磁波相互作用中,粒子散射特性的分析依赖于散射系数的求解。球形粒子的散射系数 a_n 和 b_n 的数学表达形式为^[12-13]:

$$a_n = \frac{\Psi_n(x)\Psi'_n(mx) - m\Psi'_n(x)\Psi_n(mx)}{\Phi_n(x)\Psi'_n(mx) - m\Phi_n(x)\Psi_n(mx)} \quad (1)$$

$$b_n = \frac{m\Psi_n(x)\Psi'_n(mx) - \Psi'_n(x)\Psi_n(mx)}{m\Phi_n(x)\Psi'_n(mx) - m\Phi_n(x)\Psi_n(mx)} \quad (2)$$

其中:

$$\begin{cases} \Psi_n(x) = \sqrt{\frac{x\pi}{2}} J_{n+\frac{1}{2}}(x) \\ \Phi_n(x) = \sqrt{\frac{x\pi}{2}} H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(x) \end{cases} \quad (3)$$

其中, $J_{n+\frac{1}{2}}(x)$ 和 $H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(x)$ 分别为半奇阶的第一类贝塞尔函数和第二类汉克尔函数。

粒子对电磁波作用可分别用消光效率因子 Q_{ext} 、散射效率因子 Q_{sca} 、以及后向散射效率因子 Q_b 等进行描述,表达式分别为^[12-13]:

$$Q_{\text{ext}} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (5)$$

$$Q_{\text{sca}} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(a_n^2 + b_n^2) \quad (6)$$

$$Q_b = \frac{1}{x^2} \left| \sum_{n=1}^{\infty} \left(n + \frac{1}{2}\right) (-1)^n (b_n - a_n) \right|^2 \quad (7)$$

其中, $x = 2\pi r/\lambda$ 是尺寸参数(r 为球形微粒的半径); $m = n + ik$ 是微粒的相对复折射率。吸收效率因子 $Q_{\text{abs}} = Q_{\text{ext}} - Q_{\text{sca}}$, 散射光的强度分布基于振幅函数 S_1 和 S_2 计算:

$$\begin{cases} S_1(\cos\theta) \\ S_2(\cos\theta) \end{cases} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} \begin{pmatrix} a_n \pi_n + b_n \tau_n \\ a_n \tau_n + b_n \pi_n \end{pmatrix} \quad (8)$$

其中, S_1 为垂直于散射面的偏振分量; S_2 为平行于散射面的偏振分量。式中角函数 π_n 和 τ_n 定义为:

$$\begin{cases} \pi_n = \frac{dP_n(\cos\theta)}{d(\cos\theta)} \\ \tau_n = \frac{d}{d\theta} P_n(\cos\theta) \end{cases} \quad (9)$$

其中, $P_n(\cos\theta)$ 为第一类勒让德函数; θ 为散射角。

对于 Mie 散射算法的改进, 国内外诸多学者做了广泛的研究, 目前已经趋于成熟^[14-16]。本文作者基于 Matlab 语言开发了适用于任意尺寸大小、任意复折射率的球形粒子的光散射程序, 读者如有需要, 可以通过邮件和本文作者联系。

3 单个沙尘颗粒对太赫兹波的散射特性

3.1 复折射率谱

粒子的复折射率是粒子散射特性分析的关键要素。如表 1 所示, HITRAN2012^[11] 中给出的太赫兹波段若干频率对应的沙尘性粒子的复折射率。

表 1 HITRAN2012 中沙尘性粒子的复折射率

Tab. 1 Complex refractive index of sand dust cited from HITRAN2012^[11]

Frequency/THz	Refractive index
1	2.296 + 0.00106i
1.5	2.299 + 0.00121i
2	2.31 + 0.00143i
3	2.326 + 0.00187i
3.75	2.347 + 0.00494i

基于表 1 数据, 采用三次样条插值算法和多项式函数拟合, 分别得到沙尘性粒子在 1 THz 至 3.75 THz 频率范围内的复折射率实部及虚部变化曲线, 如图 1。太赫兹波在大气环境中传输时存在几个典型的大气窗口频率^[17], 包括 1.024 THz、1.342 THz、

1.5 THz、1.984 THz、2.524 THz 和 3.437 THz 等。基于图 1, 可以得到典型大气窗口频率下对应的沙尘性粒子的复折射率值, 如表 2 所示。

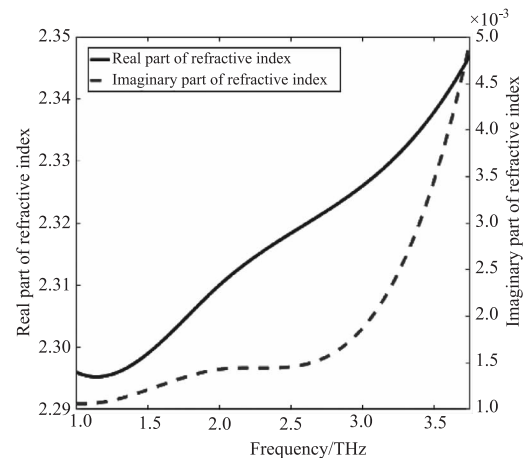


图 1 太赫兹波段沙尘性粒子的复折射率谱

Fig. 1 Spectrum of complex refractive index of sand dust in the terahertz wave band

表 2 大气窗口下沙尘性粒子的复折射率拟合值

Tab. 2 List of complex refractive index of sand dust corresponds to the atmosphere window in the Terahertz band obtained using cubic spline data interpolation

Frequency/THz	Refractive index
1.024	2.2924 + 0.00083i
1.342	2.2981 + 0.00124i
1.5	2.3008 + 0.00133i
1.984	2.3088 + 0.00137i
2.524	2.3179 + 0.0014i
3.437	2.3366 + 0.0032i

3.2 粒子尺寸对散射强度分布的影响

我国有着广阔的沙化地区, 不同沙化地区的沙尘有着其特有的成分和粒径的分布。这里我们分别取毛乌素沙漠、塔克拉玛干沙漠、甘肃沙和海岸沙的沙尘在距地面 18 ~ 20 cm 处的沙尘粒径拟合数据^[18], 对不同沙漠中沙尘的粒径谱取各自概率密度曲线极大值处对应的粒径大小, 得到沙尘粒径为 31 μm 、81 μm 和 154 μm 。

如图 2 所示, 分别给出了大气窗口频率 2.524 THz 下, 4 种不同粒径大小单个沙尘性粒子的散射强度随散射角的变化情况。从图中可以看出, 当沙尘粒子粒径处于较小尺寸(如 31 μm)时, 散射强度随散射角度波动不太明显, 前向散射强度与后向散射强度相当。随着粒径增大, 散射强度总体增强, 散射强度随

散射角度变化明显,震荡加剧。

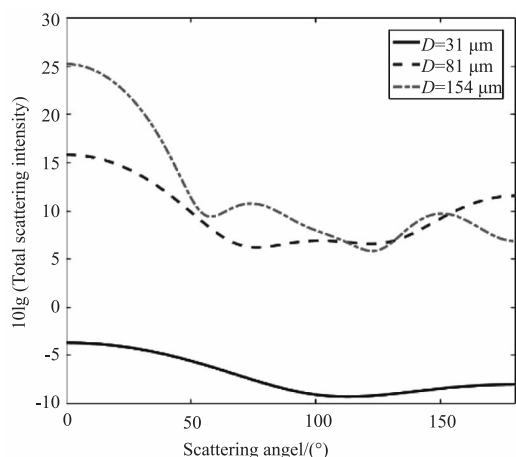


图2 不同粒径的沙尘粒子对太赫兹波散射强度随散射角 θ 的变化情况,入射波频率 $f=2.524$ THz

Fig. 2 Angular distributions of scattering intensity of a single sand dust with different particle size ($f=2.524$ THz)

3.3 太赫兹频率对散射强度分布的影响

为了分析频率对散射特性的影响,取甘肃沙的粒径分布谱的极大值处对应粒径为 $81 \mu\text{m}$ 的沙粒^[18],取大气窗口频率分别为 1.5THz 、 2.524THz 和 3.437THz ,图3给出了不同频率太赫兹波入射下粒子散射强度随散射角的分布情况。

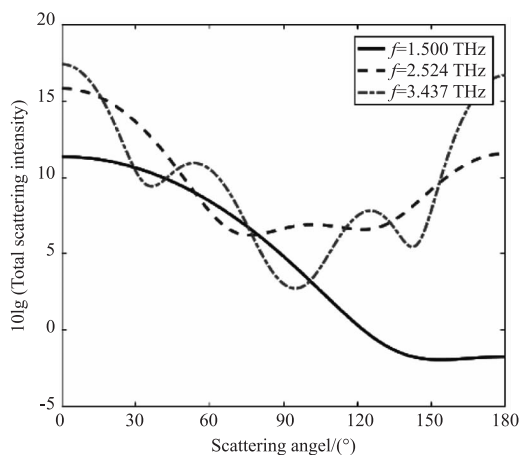


图3 不同频率下散射强度随散射角 θ 的变化图 (粒径尺寸 $D=81 \mu\text{m}$)

Fig. 3 Angular distributions of scattering intensity of a single sand dust for different frequencies of incident wave (diameter of sand $D=81 \mu\text{m}$)

3.4 沙尘粒子散射参量仿真

消光系数、吸收系数、散射系数和后向散射系数是沙尘性粒子重要的散射参量,这些参量可以反映沙尘性粒子对太赫兹波的散射及吸收特性。如图4所示,我们给出了入射波频率为 1.984THz 时,三种散射参量随粒径在 $1 \sim 500 \mu\text{m}$ 范围内变化时的变

化趋势图。

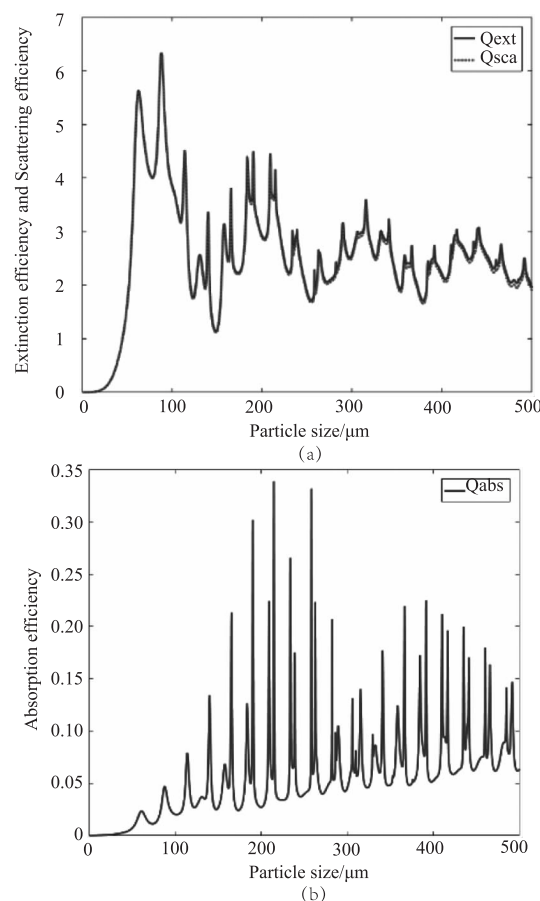


图4 散射参量 Q_{sca} 、 q_{ext} 和 q_{abs} 随粒径尺寸 D 的变化情况,入射波频率 $f=1.984\text{THz}$

Fig. 4 Variation of Q_{sca} 、 q_{ext} and q_{abs} with the change of the particle diameter ($f=1.984\text{THz}$)

从图4中可以看出,在粒径小于 $50 \mu\text{m}$ 时,消光系数和散射系数呈现出单调增长。而随着粒径的不断增大,它们在 $2.0 \sim 3.0$ 区间附近呈现较大震荡变化。消光系数和散射系数数值相差不大,这个结果可以从图4(b)中吸收系数的值看出。总体来说,随着粒径的增大,消光系数和散射系数震荡剧烈,但总体在一定值附近变化,而吸收系数的最小值变化不大,但有所增加。

考虑到不同粒径对不同频率的太赫兹波消光情况各有差异,我们仿真得到消光系数随粒径大小和频率变化的三维图形,如图5所示。

从图5中可以看出,在偏向A区处表明了消光系数的极大值,而颜色越偏向B区,则说明消光系数越小。曲线峰值处说明在此粒径处的沙尘环境中,太赫兹波衰减最大。图6给出了毛乌素沙漠、塔克拉玛干沙漠、甘肃沙和海岸沙等四种沙尘中的最大概然粒径处,消光系数随频率的变化情况。

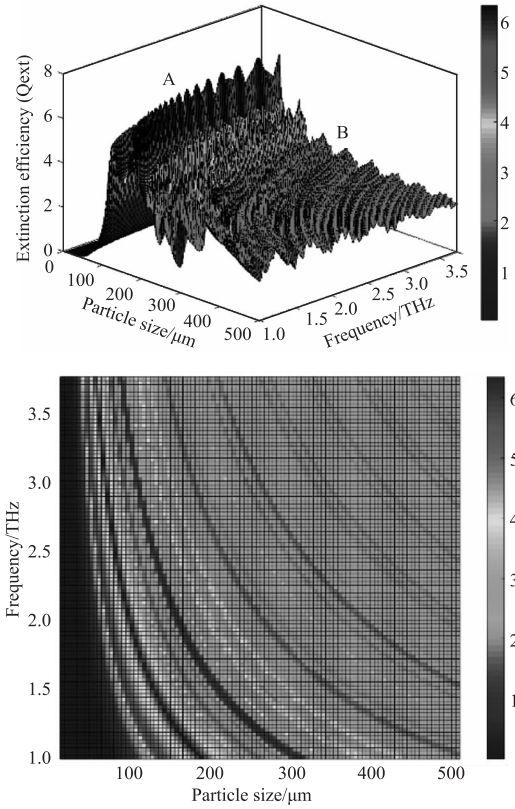


图 5 粒子粒径大小和入射波频率对消光系数的影响
Fig. 5 Influence of particle size and wave frequency on the extinction efficiency

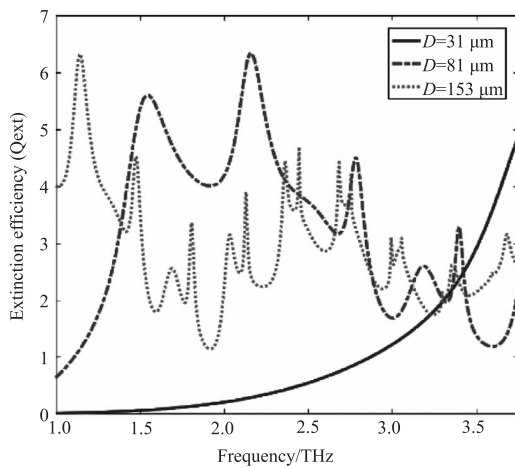


图 6 典型粒径沙尘粒子的消光因子随频率的变化趋势图
(粒径尺寸分别为 $D = 31 \mu\text{m}$, $81 \mu\text{m}$, $153 \mu\text{m}$)
Fig. 6 Variation trend of extinction rate with frequency under specific particle size ($D = 31 \mu\text{m}$, $81 \mu\text{m}$, $153 \mu\text{m}$)

对于粒径较小时,如 $31 \mu\text{m}$ 时,消光系数随频率增大而增加,粒径较大时,消光系数震荡变化。在实际的应急通信中,要综合考虑粒径大小和太赫兹波段的双重影响。

后向散射系数是大气环境监测依据的重要参数。如图 7 和图 8 所示,我们分别给出了 1.984 THz

频率下,后向散射系数 Q_b 、后向散射系数 Q_b 与散射系数 Q_{sca} 的比值随粒径的变化情况。

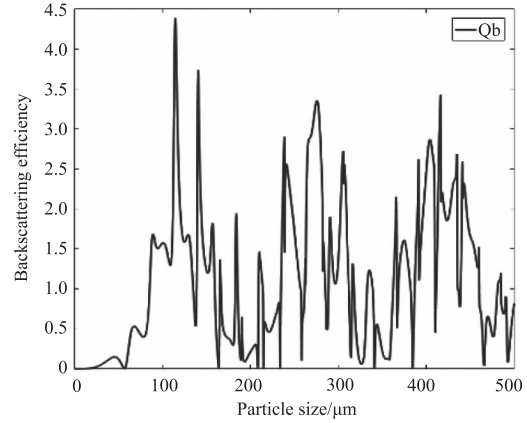


图 7 后向散射系数 Q_b 随粒径 D 变化图,
入射波频率 $f = 1.984 \text{ THz}$

Fig. 7 Variation of backscattering intensity as a function of particle size ($f = 1.984 \text{ THz}$)

从图 7 可以看出,在粒径较小时,后向散射系数很小,然后随着粒径的增大开始震荡增加。粒径较大时,后向散射系数的变化较为复杂,整体上呈现一定的周期性变化趋势,在某些粒径处存在极小值或极大值。在极小值粒径处太赫兹波对沙尘的后向散射很小,而峰值处表明存在较大的后向散射,这种变化趋势为基于太赫兹波对沙尘颗粒的探测提供了理论依据。

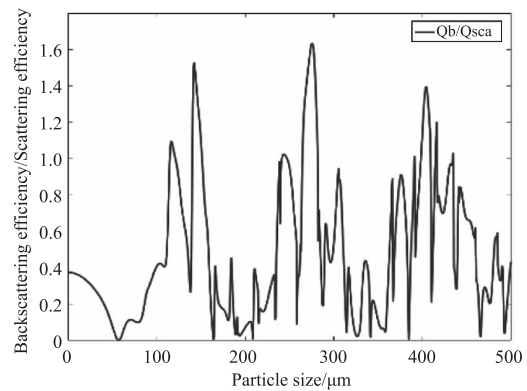


图 8 后向散射系数 Q_b 与散射系数 Q_{sca} 的比值随粒径 D 变化情况,入射波频率 $f = 1.984 \text{ THz}$

Fig. 8 Variation of ratio of backscattering efficiency to scattering efficiency as a function of particle size ($f = 1.984 \text{ THz}$)

与图 7 类似,图 8 中后向散射系数与散射系数的比值随粒径大小变化也较为复杂,整体上呈现一定的周期性变化趋势,存在一定的极大值和极小值变化。

4 弱沙尘环境中太赫兹波衰减分析

我国北方多有沙尘天气,如浮沉天气,扬沙天气和沙尘暴天气等。将太赫兹波技术应用于通信方

面,特别是应急通信时,必须要考虑沙尘天气对太赫兹波传输的影响,本节分析在弱沙尘环境下太赫兹波的传输特性。

离散在空气中的沙尘的粒径分布,会受到地域、高度和风力等因素的制约,选择恰当的分布函数来描述沙尘粒子的粒径分布是个关键问题。目前,用来描述沙尘粒子的尺寸分布的模型有指数分布模型、正态分布模型和对数正态分布模型等。对于我国北方地区沙漠、沙地和戈壁等地区,沙尘粒子的粒径分布更加贴近于对数正态分布^[19-20]:

$$P(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\eta D} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln D - \delta)^2}{2\eta^2}\right) \quad (10)$$

其中, D 表示粒子直径; $P(D)$ 表示曲线在 D 点处的概率密度; η 和 δ 为拟合参数。参考贺兰山地区三大沙漠(毛乌素沙漠、腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠)春季沙尘气溶胶观测数据对不同的地点和时间取其平均值,得到浮尘、扬沙和沙尘暴天气的气溶胶的粒径分布,如表3所示^[9]。运用对数正态分布函数模型进行拟合,得到相应粒径的对数正态分布谱,如图9所示。

表3 不同天气条件下粒径谱对数正态分布的拟合参数

Tab.3 Size distribution of sand dust in different atmosphere conditions^[9]

Weather type	Parameter η	Parameter δ	Particle number concentration ($10^6/\text{m}^3$)
Sand floating	0.79	-7.7	554.5
Sand blowing	0.89	-7.68	1289.2
Sandstorm	0.995	-7.48	3029.5

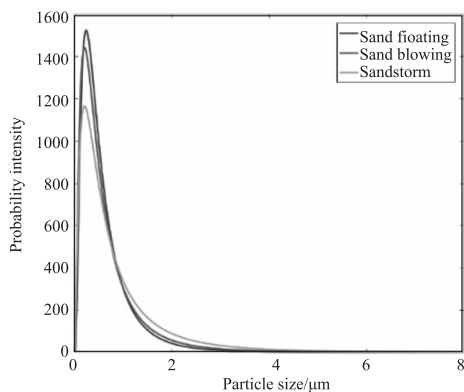


图9 浮沉、扬沙和沙尘暴天气沙尘粒径对数正态分布谱拟合图

Fig.9 Size distributions of sand dust in three different atmosphere conditions

从图9可以看出,三种天气下沙尘的粒径谱差别不大,粒径大小绝大多数处于 $6\ \mu\text{m}$ 以下。不同天气条件下的主要差别在于粒子数密度。沙尘暴天气下沙尘粒子数体积浓度比浮层天气下要增加20~30倍^[9]。为了分析太赫兹波在弱沙尘天气下的传输特性,引入消光系数的统计平均值:

$$\bar{Q}_{\text{ext}} = \int_{D_1}^{D_2} Q_{\text{ext}}(D) \cdot P(D) dD \quad (11)$$

其中, D_1 和 D_2 分别为沙尘粒径分布谱的粒径最小值和最大值。

如图10所示给出了浮沉和扬沙两种天气对应的粒径谱分布下,1 THz~3.75 THz 波段太赫兹波的统计平均消光系数变化情况。从图8中可以看出,两种粒径谱的统计消光率具有相同的增长趋势。在3 THz以下呈缓慢增长趋势,3 THz以上平均消光系数增长加快,该结果表明在太赫兹频率较小时信息传输的损耗较少,且损耗随频率的增加而增加。

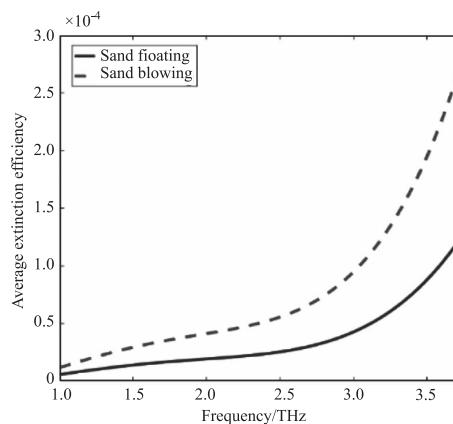


图10 浮沉天气和扬沙天气关于沙尘粒径谱的消光系数统计平均值

Fig.10 Average extinction efficiency in two different atmosphere conditions

5 结论

基于Mie散射理论,本文针对浮尘、扬沙等弱沙尘环境中太赫兹波的散射与传输特性进行了数值仿真。基于HITRAN2012中提供的有限数据点,采用插值算法给出了频率在1 THz~4 THz 波段太赫兹波段沙尘颗粒的复折射率随频率的变化曲线。分析了波长、尺寸参数等因素对单个沙尘粒子散射信号的影响,分析了粒子后向散射特性随粒子尺寸的变化情况。考虑沙尘粒子谱分布,分析太赫兹信号在弱沙尘环境中不同粒子谱下的衰减特性。本文研究结果对于烟尘、风沙等大气环境的监测、特殊战场气

溶胶环境下太赫兹通信及太赫兹目标探测与识别具有参考价值。

参考文献:

- [1] Fan Yong, Chen Zhe, Zhang Bo. Key technologies of terahertz high speed communication system front end [J]. ZTE Communications, 2018, 24 (3): 15 - 20. (in Chinese)
樊勇, 陈哲, 张波. 太赫兹高速通信系统前端关键技术 [J]. 中兴通讯技术, 2018, 24(3): 15 - 20.
- [2] Kürner T, Priebe S. Towards THz communications—status in research, standardization and regulation [J]. Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2013, 35 (1): 68.
- [3] Zhong Yumin, Li Yanhua. Discussion and analysis of terahertz communication for blackout elimination [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2019, 40(1): 14 - 19. (in Chinese)
钟育民, 李艳华. 太赫兹通信解决黑障问题的探讨与分析 [J]. 遥测遥控, 2019, 40(1): 14 - 19.
- [4] Barros M T, Mullins R, Balasubramaniam S. Integrated terahertz communication with reflectors for 5G small cell networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016: 1 - 1.
- [5] Akyildiz I F, Jornet J M, Han C. Terahertz band: next frontier for wireless communications [J]. Physical Communication, 2014, 12(4): 16 - 32.
- [6] Zhou Xun, Deng Hu, Luo Zhenfei, et al. Study of transmission characteristics of water vapor based on terahertz time—domain spectroscopy [J]. Infrared, 2013, 34 (6): 20 - 24. (in Chinese)
周逊, 邓琥, 罗振飞, 等. 基于太赫兹时域光谱技术的水蒸气传输特性研究 [J]. 红外, 2013, 34(6): 20 - 24.
- [7] Wang Yuwen, Dong Zhiwei, Zhou Xun, et al. THz atmospheric attenuation model [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(10): 88 - 93. (in Chinese)
王玉文, 董志伟, 周逊, 等. 太赫兹波大气传输衰减模型 [J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(10): 88 - 93.
- [8] Cui Haixia. The study on some questions of transmission and sensing with terahertz wave [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011: 18 - 28. (in Chinese)
崔海霞. 太赫兹波传输及传感若干问题的研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2011: 18 - 28.
- [9] Cheng Tiantao, Shen Zhibao. A numerical simulation of optical characteristics for atmospheric dust aerosols in northwest China [J]. Plateau Meteorology, 2001, 20(3): 291 - 297. (in Chinese)
成天涛, 沈志宝. 中国西北大气沙尘光学特性的数值试验 [J]. 高原气象, 2001, 20(3): 291 - 297.
- [10] 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. (in Chinese)
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.
- [11] Hitran database, <https://www.cfa.harvard.edu/HITRAN/HITRAN2012/>.
- [12] Van de Hulst, H. C., Twersky, V. Light scattering by small Particles [J]. Physics Today, 10(12): 28 - 30.
- [13] Bohren C. F., Huffman D. R. Absorption and scattering of light by small particles [M]. New York Wiley, 1983.
- [14] Zheng Gang, Cai Xiaoshu, Wang Raining. Numerical calculation of mie scattering [J]. Applied Laser, 1992, 12 (5): 220 - 222. (in Chinese)
郑刚, 蔡小舒, 王乃宁. Mie 散射的数值计算 [J]. 应用激光, 1992, 12(5): 220 - 222.
- [15] Wang Shimin, Zhu Zhen, Ye Mao, et al. Two improved numerical algorithms of mie theory in the particle sizing by light scattering method [J]. Acta Metrol Sin, 1999, 20 (4): 279 - 285. (in Chinese)
王式民, 朱震, 叶茂, 等. 光散射粒度测量中 Mie 理论两种改进的数值计算方法 [J]. 计量学报, 1999, 20(4): 279 - 285.
- [16] Shen Jiang, Liu Lei. An improved algorithm of classical mie scattering calculation [J]. China Powder Science and Technology, 2005, 11(4): 1 - 5. (in Chinese)
沈建琪, 刘蕾. 经典 Mie 散射的数值计算方法改进 [J]. 中国粉体技术, 2005, 11(4): 1 - 5.
- [17] Guo Shibe. Theoretical and experimental study on broadband terahertz atmospheric transmission characteristics [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016: 1 - 74. (in Chinese)
郭拾贝. 宽频段太赫兹大气传输特性的理论与实验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2016: 1 - 74.
- [18] Dong Qingsheng. Physical characteristics of the sand and dust in different deserts of China [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.
- [19] Zhou Wang, Zhou Dongfang, Hou Deting, et al. Calculation and simulation of sand and dust attenuation in microwave propagation [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(8): 1259 - 1262. (in Chinese)
周旺, 周东方, 侯德亭, 等. 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.
- [20] Dong Qunfeng, Xu Jiadong, Li Yingle, et al. Effect of particle size distribution on microwave transmission [J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(5): 1 - 3, 19. (in Chinese)
董群锋, 许家栋, 李应乐, 等. 沙尘尺寸分布对微波传输特性的影响 [J]. 装备环境工程, 2010, 7(5): 1 - 3, 19.